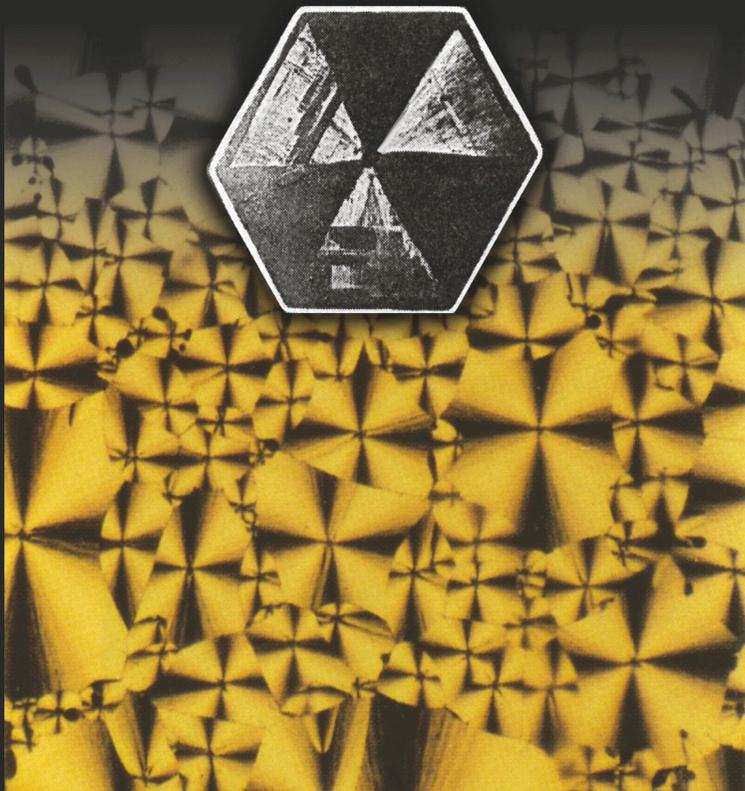


---

М. Г. Томилин    Г. Е. Невская

---

# ФОТОНИКА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ



*М. Г. Томилин, Г. Е. Невская*

# ФОТОНИКА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Санкт-Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2011

*Томилин М. Г. Фотоника жидких кристаллов* / М. Г. Томилин, Г. Е. Невская. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. — 2011. — 741 с.

Рецензенты: к.ф.-м.н. Беренберг В.А., д.х.н. Пестов С.М., к.ф.-м.н. Сомс Л.Н.

Монография посвящена направлению прикладной оптики, связанному с разработкой и применением оптических приборов на основе жидких кристаллов (ЖК). Успехи, достигнутые в синтезе широкого класса жидкокристаллических материалов, изучение их физических свойств и оптических эффектов, а также разработка новых технологий позволили создать новую элементную базу оптического приборостроения. Разработанные элементы в ряде случаев обладают уникальными свойствами, что привело к существенному прогрессу в развитии оптических приборов. К важнейшим достижениям следует отнести возможность плавного и локального управления параметрами излучения: светопропусканием, светорассеянием, преломлением, отражением и поглощением света, цветовыми характеристиками и др.

В монографии приводится классификация ЖК, описана их структура и свойства. Рассмотрены основные оптические эффекты в жидкокристаллических материалах, которые нашли применение в современных информационных технологиях. Описаны применения ЖК в дисплеях, составляющих основу современных систем отображения информации и выпускающихся миллионными тиражами, в оптических устройствах и в качестве регистрирующих сред. Применение ЖК в оптических приборах приводит к улучшению эксплуатационных параметров и расширению их возможностей. Использование ЖК в качестве регистрирующих сред позволяет осуществлять запись голографических решеток и детектирование полей различной физической природы (электрических, магнитных, световых, температурных и полей межмолекулярных взаимодействий). Они могут работать как в реальном масштабе времени, так и с памятью.

Книга предназначена для научных сотрудников, работающих в области фотоники жидких кристаллов, а также для студентов и аспирантов.

Монография издана при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Научный редактор д. ф.-м. н. Данилов Владимир Васильевич

© Томилин М. Г., Невская Г. Е., 2011

© Издательство государственного  
политехнического университета, 2011

ISBN

*Посвящаем нашим детям Алексею,  
Светлане и Наталье, а также внукам  
Виктору, Инге, Егору, Екатерине, Юрию и Таисии.*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список обозначений и сокращений .....	7
Предисловие научного редактора .....	15
Введение .....	19
<b>Часть 1. Структура и основные свойства жидких кристаллов .....</b>	<b>23</b>
<i>Глава 1. Структура жидких кристаллов .....</i>	<i>24</i>
1.1. Жидкокристаллическое состояние вещества .....	24
1.2. Классификация жидких кристаллов .....	26
1.3. Химическое строение жидких кристаллов .....	36
1.3.1. Материалы для дисплеев .....	43
1.3.2. Материалы для оптических устройств на основе ЖК с управляемыми параметрами .....	47
1.3.3. ЖКМ для регистрирующих сред .....	49
1.3.4. Жидкокристаллические композиты .....	56
Литература к главе 1 .....	61
<i>Глава 2. Физические свойства жидких кристаллов .....</i>	<i>69</i>
2.1. Степень ориентационного порядка .....	69
2.2. Температурный интервал мезофазы .....	75
2.3. Электрические свойства .....	77
2.3.1. Диэлектрические свойства .....	77
2.3.2. Электропроводность .....	83
2.4. Оптические свойства .....	87
2.4.1. Оптическая анизотропия НЖК .....	88
2.4.2. Спектральные характеристики НЖК .....	101
2.4.3. Оптические свойства ХЖК .....	107
2.5. Магнитные свойства .....	113
2.6. Поверхностное натяжение .....	114
2.7. Вязкость .....	121
2.8. Упругие свойства .....	124
Литература к главе 2 .....	129

<b>Часть II. Оптические эффекты в жидких кристаллах .....</b>	<b>143</b>
<i>Глава 3. Жидкокристаллическая ячейка и ориентация молекул ЖК .....</i>	<i>145</i>
3.1. Жидкокристаллическая ячейка .....	145
3.2. Ориентация ЖК .....	152
3.2.1. Энергия сцепления .....	152
3.2.2. Методы ориентации НЖК на подложке .....	156
3.2.3. Планарная ориентация НЖК .....	158
3.2.4. Гомеотропная и наклонная ориентации НЖК .....	165
3.2.5. Светоиндуцированная ориентация НЖК .....	170
3.2.6. Бистабильная и мультистабильная ориентации .....	178
3.2.7. Ориентационные переходы в НЖК .....	181
3.2.8. Ориентация ХЖК, СЖК, СЖК* и ДЖК .....	183
3.2.9. Микроскопические методы исследования ориентации ЖК .....	189
Литература к главе 3 .....	194
<i>Глава 4. Электро- и магнитооптические эффекты в НЖК .....</i>	<i>205</i>
4.1 Ориентационные (поляризационные) эффекты .....	205
4.1.1. Переходы Фредерикса .....	206
4.1.2. Эффект «гость – хозяин» .....	212
4.1.3 Твист- и супертвист эффекты .....	214
4.1.4. Эффекты бистабильности .....	224
4.1.5. Флексоэлектрический эффект .....	228
4.2. Эффекты проводимости (светорассеивающие) .....	231
4.3. Магнитооптические эффекты в НЖК .....	235
4.4. Термооптические эффекты в НЖК .....	238
Литература к главе 4 .....	239
<i>Глава 5. Электрооптические эффекты в холестерических и смектических жидких кристаллах и полимерных композитах .....</i>	<i>242</i>
5.1. Текстурные переходы в ХЖК в электрическом поле .....	242
5.2. Переходы Фредерикса и ЭГДН в смектиках А и С .....	245
5.3. Электрооптические эффекты в сегнетоэлектрических смектиках .....	249
5.3.1. Эффект Кларка-Лагерволла .....	249
5.3.2. Эффект деформации геликоида .....	251
5.3.3. Электроклинный эффект .....	253
5.4. Эффекты в полимерных жидкокристаллических композитах ....	255
5.4.1. Жидкие кристаллы, диспергированные в полимере .....	256
5.4.2. ЖК, стабилизированные полимером .....	261
Литература к главе 5 .....	265
<i>Глава 6. Нелинейные эффекты в жидких кристаллах .....</i>	<i>267</i>
6.1. Гигантская оптическая нелинейность в жидких кристаллах .....	268
6.2. Самофокусировка света .....	271

6.3. Распространение солитонов в НЖК .....	273
6.4. Оптическое волновое смещение .....	276
6.5. Светоиндуцированные эффекты в смесях ХЖК со светочувствительным НЖК .....	279
6.6. Использование нелинейных эффектов в ЖК для локального ограничения излучения .....	281
Литература к главе 6 .....	286
<b>Часть III. Дисплеи</b> .....	290
<i>Глава 7. Общие сведения о дисплеях и развитии дисплейных технологий</i> .....	291
7.1. Современные дисплейные технологии .....	293
7.1.1. Основные требования, предъявляемые к дисплеям .....	294
7.1.2. Классификация дисплеев .....	294
7.1.3. Краткий анализ современных систем отображения информации .....	296
7.2. Основные этапы развития жидкокристаллических дисплеев .....	303
Литература к главе 7 .....	314
<i>Глава 8. Жидкокристаллические дисплеи</i> .....	320
8.1. Просветные жидкокристаллические дисплеи прямого видения .....	321
8.2. Отражательные жидкокристаллические дисплеи прямого видения .....	338
8.3. Проекция изображений на большой экран .....	344
8.4. ЖКД на эластичной подложке .....	352
8.5. Дисплеи для отображения 3-х мерных объектов .....	354
8.5.1. Объемные дисплеи – дисплеи реального трехмерного изображения .....	357
8.5.2. Стереоскопические дисплеи .....	363
8.5.3. Автостереоскопические дисплеи .....	366
8.5.4. Голографические дисплеи .....	370
8.5.5. Ретинальные дисплеи .....	372
Литература к главе 8 .....	375
<b>Часть IV. Жидкокристаллические оптические элементы и устройства</b> ...	383
<i>Глава 9. Микролазеры на жидких кристаллах</i> .....	386
9.1. Генерация лазерного излучения в хиральных ЖК .....	387
9.1.1. Физические основы лазерной генерации в хиральных ЖК .....	387
9.1.2. Материалы и красители .....	393
9.1.3. Общие свойства лазерной генерации в хиральных ЖК .....	394
9.1.4. Управление лазерной генерацией в хиральных ЖК .....	398
9.1.5. Лазерная генерация в полимерах и дефектные моды .....	403
9.2. Квазиволноводный и волноводный режимы лазерной генерации .....	406

9.2.1 Лазерная генерация на вытекающих модах (квазиволноводный режим) .....	406
9.2.2. Волноводный режим лазерной генерации .....	408
9.3. Лазерная генерация в специфических материалах и жидкокристаллических фазах .....	411
9.4. Усилители лазерного излучения на жидких кристаллах .....	412
9.5. Управляемые оптические диоды на основе хиральных ЖК .....	414
Литература к главе 9 .....	420

*Глава 10.* Использование электрически управляемых  
пространственно-временных модуляторов света

в оптических устройствах .....	426
10.1. Дефлекторы .....	428
10.1.1. Дефлекторы на основе дифракции .....	429
10.1.2. Призмённые дефлекторы .....	433
10.1.3. Дефлекторы света на явлении полного внутреннего отражения в НЖК и С*ЖК .....	435
10.2. ЖК элементы в системах телекоммуникации .....	436
10.2.1. Оптические аттенуаторы .....	436
10.2.2. Переключатели 2×2 световодов на основе поляризационных эффектов в С*ЖК .....	441
10.2.3. Голографические оптические переключатели для 1×N положений .....	444
10.2.4. Голографические оптические переключатели для N×N положений .....	449
10.3. Управляемые фильтры .....	450
10.3.1. Фильтр с плавным управлением типа Фабри-Перо .....	450
10.3.2. Дискретные управляемые оптические фильтры .....	454
10.3.3. Дискретно переключаемый фильтр на основе композита ЖК-фотонный кристалл .....	457
10.3.4. Управляемые цветные фильтры .....	457
10.4. Оптические световоды, переключатели и модуляторы .....	461
10.4.1. Оптические световоды на С*ЖК .....	462
10.4.2. Быстродействующий электрооптический призмённый ЖК модулятор .....	465
10.4.3. Модуляторы, работающие в неполяризованном свете .....	466
10.4.4. Оптические модуляторы на основе капсулированных в полимере С*ЖК .....	468
Литература к главе 10 .....	470

*Глава 11.* Адаптивные линзы и фазовые корректоры

на основе жидких кристаллов .....	475
11.1. Адаптивные линзы .....	475
11.1.1. Теоретические основы .....	476

11.1.2. Оптические характеристики микролинз .....	482
11.1.3. Оптические характеристики адаптивных линз .....	491
11.1.4. Линзы на основе композита полимер — ЖК .....	492
11.1.5. Применение адаптивных линз в оптических системах ....	495
11.2. Фазовые корректоры .....	502
11.2.1. ПМС на ЖК для оптической компенсации аббераций в астрономии .....	504
11.2.2. ПМС на ЖК для оптической компенсации аббераций в офтальмологии .....	512
Литература к главе 11 .....	515
<i>Глава 12. Использование оптически адресуемых пространственно-вре-</i> <i>менных модуляторов света в оптических устройствах .....</i>	522
12.1. Характеристики оптически адресуемых пространственно-временных модуляторов света .....	523
12.2. Применение ОА ПМС в адаптивной оптике .....	534
12.3. ОА ПМС для внутррезонаторного управления пространствен- ной структурой лазерного излучения .....	539
12.4. Оптические корреляторы .....	552
12.5. Оптическая фильтрация .....	557
12.6. Оконтуривание изображений .....	559
12.7. Оптический процессор для выполнения операций Булевой алгебры .....	560
12.8. Оптические нейронные сети .....	563
12.9. Модуляторы для защиты наблюдателя от слепящих источников излучения .....	565
12.9.1. Динамические ослабители на основе ЖК с модуляцией излучения по всему полю зрения .....	567
12.9.2. Динамические ослабители на основе ЖКЭ с локальной модуляцией .....	569
Литература к главе 12 .....	575
<b>Часть V. Регистрирующие среды .....</b>	582
<i>Глава 13. Жидкие кристаллы в динамической голографии .....</i>	584
13.1. Запись голографических решеток на жидких кристаллах .....	588
13.2. Динамическая голография при ориентации молекул ЖК электрическим полем .....	608
Литература к главе 13 .....	616
<i>Глава 14. Визуализация локальных деформаций слоя НЖК, обусловленных неоднородностью структуры поверхности .....</i>	624
14.1. Анализ локальных деформаций слоя НЖК вблизи неидеальной поверхности .....	624
14.2. Экспериментальные исследования свойств поверхности при нанесении свободного слоя НЖК .....	636

14.2.1. Изучение дефектов микрорельефа .....	637
14.2.2. Изучение структурных дефектов в материалах .....	641
14.2.3. Изучение структуры твердых компонентов растворов ....	652
14.2.4. Изучение структуры биологических объектов .....	657
14.3. Визуализация структур с неоднородными магнитными полями .....	666
Литература к главе 14 .....	671
<i>Глава 15.</i> Визуализация неоднородных электрических полей .....	674
15.1. Теоретическое описание деформации директора в неоднородных электрических полях .....	674
15.1.1. Общая теория деформации НЖК в неоднородных электрических полях .....	674
15.1.2. Деформация директора НЖК и электрооптический отклик в неоднородных полях .....	677
15.2. Визуализация дефектов с помощью НЖК .....	684
15.2.1. Визуализация дефектов в диэлектрических слоях .....	684
15.2.2. Визуализация электрически активных дефектов поверхности полупроводниковых пластин .....	689
15.2.3. Визуализация неоднородных электрических полей и дефектов в монокристаллах полупроводников в пространственных модуляторах света на ЖК .....	691
15.2.4. Визуализация доменных структур в сегнетоэлектриках ...	693
15.2.5 Применение НЖК для контроля технологических операций при изготовлении интегральных схем и проверки работоспособности приборов .....	696
15.3. Визуализация электрических полей биологических объектов .....	703
Литература к главе 15 .....	707
<i>Глава 16.</i> Визуализация тепловых и акустических полей .....	710
16.1. Визуализация тепловых полей с помощью ХЖК .....	711
16.2. Сметические ЖК для термооптической записи информации .....	715
16.3 Результаты экспериментальных исследований тепловых полей с помощью ХЖК .....	716
16.4. ХЖК в аэродинамических исследованиях .....	718
16.5. Визуализация акустических полей .....	724
Литература к главе 16 .....	736
Заключение .....	740

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ЖК	— жидкий кристалл
ЖКМ	— жидкокристаллический материал
ЖКЯ	— жидкокристаллическая ячейка
НЖК	— нематический жидкий кристалл
ХЖК	— холестерический жидкий кристалл
СЖК	— смектический жидкий кристалл
С*ЖК	— хиральный смектик
АЦБФ	— алкилцианобифенил
ЦБ	— цианобифенилы
ПАА	— п-азоксианизол
ПАФ	— п-азоксифенетол
БМАОБ	— п-бутил-п'-метоксиазоксибензол
МББА	— п-метоксибензилиден-п'-бутиланилин
ЭББА	— п-этоксibenзилиден-п'-бутиланилин
ЦБООА	— п-цианобензилиден-п'-н-октилоксианилин
ДОБАМБЦ	— 4-децилоксибензилиден-4'-амино-(2-метилбутил)циннамат
65ОБК	— 4-гексил-4'-пентилокси (бифенилкарбоксилат)
$\chi_{  }, \chi_{\perp}$	— диамагнитная восприимчивость в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации молекул ЖК [ $\text{см}^3/\text{моль}$ ]
$\alpha$	— поляризуемость [ $\text{см}^3/\text{моль}$ ]
$\Delta\Phi$	— фазовая задержка
$\varepsilon_{  }, \varepsilon_{\perp}$	— диэлектрические проницаемости в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации молекул ЖК
$\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{  } - \varepsilon_{\perp})$	— диэлектрическая анизотропия
$\Delta\varepsilon_a$	— диэлектрическая анизотропия на световой частоте
$\gamma_{  }, \gamma_{\perp}$	— поверхностное натяжение ЖК в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации молекул ЖК [ $\text{мН/м}$ ]

$\eta$	— динамическая вязкость [Па·с]
$\nu$	— кинематическая вязкость [мм <sup>2</sup> /с]
$\gamma_1$	— вращательная вязкость [Па·с]
$\varphi$	— азимутальный угол ориентации длинной оси молекулы ЖК
$\theta$	— полярный угол ориентации длинной оси молекулы ЖК
$\lambda$	— длина волны излучения [нм]
$\mu_{\parallel}, \mu_{\perp}$	— дипольные моменты в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению преимущественной ориентации молекул ЖК [1Д = 3,336·10 <sup>-30</sup> Кл·м]
$V$	— молярный объем [см <sup>3</sup> /моль]
$\rho$	— плотность [г/см <sup>3</sup> ]
$\sigma$	— электропроводность (Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup> )
$c$	— скорость света [3·10 <sup>8</sup> м/с]
$d$	— толщина слоя ЖК [мкм]
$D$	— оптическая плотность
$e$	— заряд электрона [1,602·10 <sup>-19</sup> Кл]
$\mathbf{e}$	— вектор поляризации света
$\mathbf{E}$	— вектор напряженности электрического поля
$f$	— частота напряжения [Гц]
$F$	— плотность свободной энергии
$\Delta H$	— энтальпия фазового перехода [ккал/моль]
$k$	— показатель поглощения [см <sup>-1</sup> ]
$K_{ii}$	— модули упругости ЖК
$K_{11}$	— модуль поперечного изгиба
$K_{22}$	— модуль кручения
$K_{33}$	— модуль продольного изгиба
$k_B$	— постоянная Больцмана [1,38·10 <sup>-23</sup> Дж/К]
$\mathbf{n}$	— направление преимущественной ориентации молекул ЖК (директор)
$n_e, n_o$	— главные показатели преломления соответственно для необыкновенного и обыкновенного лучей
$\Delta n = (n_e - n_o)$	— оптическая анизотропия
$N_A$	— число Авогадро [6,023·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup> ]
$p$	— шаг холестерической спирали [мкм]
$\mathbf{P}_S$	— вектор спонтанной поляризуемости
$R$	— коэффициент отражения
$P, Q$	— параметры внутреннего поля по Онзагеру
$S$	— параметр ориентационного порядка
$T$	— температура
$T_{пл}$	— температура плавления
$T_{пр}$	— температура просветления
$E_a$	— энергия активации [ккал/моль]

<i>U</i>	— напряжение питания [В]
ЖКД	— жидкокристаллический дисплей
ЖКМС	— жидкокристаллический модулятор света
АМ ЖКД	— активно матричный ЖК дисплей
БЖКД	— бистабильный ЖК дисплей
ВФД	— вакуумный флуоресцентный дисплей
ОЖКД	— отражательный ЖК дисплей
ПП	— плазменная панель
ПЭД	— полевой эмиссионный дисплей
РД	— ретинальный дисплей
СД	— светодиод
СОИ	— система отображения информации
ТПТ	— тонкопленочные транзисторы
ФКПМ	— флуоресцентный конфокальный поляризационный микроскоп
$\alpha$ -Si	— (amorphous silicon) — аморфный кремний
x-Si	— (single crystal Si) — монокристаллический кремний
$\alpha$ -Si TFT	— (amorphous silicon thin-film transistor) — тонкопленочный транзистор на аморфном кремнии
AC	— (alternating current) — переменный ток
ADC	— (analogue to digital converter) — аналог цифрового преобразователя
AFLC	— (antiferroelectric liquid crystal) — антисегнетоэлектрический ЖК
ALCOM	— (advanced LC optical materials) — передовые жидкокристаллические оптические материалы (название научного центра)
АМ	— (active matrix) — активная матрица
AMLCD	— (active matrix liquid crystal display) — активно матричный жидкокристаллический дисплей
APCVD	— (atmospheric pressure chemical vapor deposition) — химическое осаждение при атмосферном давлении
BEF	— (brightness-enhancement film) — пленка для увеличения яркости
BTN	— (bistable twist nematic) — бистабильный твистовый нематик
CCD	— (charge coupled device) — устройство с зарядовой связью
CD-ROM	— (compact disc reading only memory) — компакт дисковое запоминающее устройство
CDT	— (color display tubes) — цветные дисплейные трубки
CF	— (color filters) — цветные фильтры

ChLC	— (cholesteric liquid crystal) — холестерический жидкий кристалл
CMD	— (color matrix display) - цветной матричный дисплей
CMF	— (color-matrix filter) — цветной матричный фильтр
CMF	— (color matching function) — функция цветового баланса
CMOS	— (complementary metal oxide semiconductor) — комплементарный (добавочный) полупроводник на основе окиси металла
CPT	— (colorpicture tubes) — трубки для цветных изображений
CR	— (contrast ratio) — контрастное отношение
CRT	— (cathode ray tube) — электронно-лучевая трубка
CSTN	— (color super twist nematic) — цветной супер twist нematic
DAP	— (deformation of aligned phase) — деформация ориентированной фазы
DC	— (direct current) — постоянный ток
DFD	— (depth-focused 3D) — объемные дисплеи с фокусировкой в пространстве
DHF	— (deformation of ferroelectric helix) — деформация спирали геликоида
DMD	— (digital micromirror device) — микрозеркала с цифровым управлением
DPI	— (dots per inch) — точек на дюйм (характеристика пространственного разрешения)
DSM	— (dynamic scattering mode) — динамическое рассеяние света
ECB	— (electrically controlled birefringence) — электрически управляемое двулучепреломление
ESC	— (electrically surface command) — электрически управляемая «командная» ориентирующая поверхность
ECD	— (electrochromic display) — электрохромный дисплей
EL	— (electro luminescence) - электролюминесценция
ELD	— (electro luminescent display) — электролюминесцентный дисплей
EPHD	— (electrophoretic display) — электрофоретический дисплей
FED	— (field emission display) — дисплей на полевой эмиссии
FCPM	— (fluorescence confocal polarizing microscopy) — флуоресцентная конфокальная поляризационная микроскопия
FLC	— (ferroelectric LC) — сегнетоэлектрический ЖК
FLCD	— (ferroelectric liquid crystal display) — сегнетоэлектрический ЖК дисплей

FoM	— (figure of merit) — коэффициент качества ЖКМ, характеризуемый отношением $K\Delta n^2/\nu_1$ , где $K$ — константа упругости, $\Delta n$ — двулучепреломление, $\nu_1$ — вращательная вязкость
FMLCD	— (fast-response multi-stable liquid crystal display) — быстродействующий мультистабильный ЖК дисплей
FOV	— (field of view) — поле зрения
FPD	— (flat panel displays) — плоскопанельные дисплеи
FPS	— (frame per second) — число кадров в секунду
GH	— (guest-host) — гость-хозяин (эффект)
HAN cell	— (hybrid aligned nematic cell) — жидкокристаллическая ячейка на основе нематика с гибридной ориентацией
HCI	— (human-computer interaction) — взаимодействие человека с компьютером
HDD	— (head down display) — дисплей, наблюдаемый опусканием головы
HDTV	— (high definition television) — телевизионный стандарт высокой четкости
HMD	— (helmet- or head-mounted display) — дисплей, размещенный на шлеме или голове
HPDLC	— (holographic polymer dispersed liquid crystal) — голографическим методом диспергированные в полимере жидкие кристаллы
HUD	— (head up display) — дисплей, наблюдаемый поднятием головы
HVS	— (human visual system) — визуальная система человека
IC	— (integrated circuit) — интегральная схема
IPS	— (in-plane switching) — переключение в плоскости
ITO	— (indium tin oxide) — сплав двуокиси олова и индия
IVR	— (immersive virtual reality) — окружающая виртуальная реальность
LC	— (liquid crystal) — жидкий кристалл
LCC	— (liquid crystal cell) — жидкокристаллическая ячейка
LCD	— (liquid crystal display) — жидкокристаллический дисплей
LCM	— (liquid crystal modules) — жидкокристаллические модули
LC-MWC	— (LC modal wave corrector) — ЖК модальный волновой корректор
LCoS	— (liquid crystals on silicon) — жидкие кристаллы на кремнии
LCSD	— (liquid crystal stereoscopic display) — жидкокристаллический стереоскопический дисплей

LCVR	— (liquid crystal variable retarder) — жидкокристаллический элемент с изменяемой фазовой задержкой
LED	— (light emission diode) — светодиод
LEP	— (light emitting polymer) — светоизлучающий полимер
LPP	— (linear photopolymer) — линейный фотополимер
LRD	— (light-induced reorientation of the director) — светоиндуцированная переориентация директора
LSF	— (line-spread function) — функция рассеяния линии
LSI	— (large-scale integration) — высокий уровень интеграции
LV	— (light valve) — световой клапан (модулятор)
MDP	— (molecularly-doped polymer) — полимер с молекулярной добавкой
MEM	— (microelectromechanical) — микроэлектромеханический
MIM	— (metal-isolator-metal) — металл-изолятор-металл
MOS	— (metal-oxide-semiconductor) — металл-окисел-полупроводник
MTF	— (modulation transfer function) — функция передачи модуляции
MVA	— (multidomain vertical alignment) — мультидоменная вертикальная ориентация
NA	— (numerical aperture) — цифровая апертура
NLC	— (nematic liquid crystal) — нематический жидкий кристалл
OAD	— (optically active dopant) — оптически активная добавка
OA LC SLM	— (optically addressed liquid crystal spatial light modulator) — оптически адресуемый жидкокристаллический пространственный модулятор света
OLED	— (organic light emission diode) — органический светодиод
OCB	— (optically self-compensated birefringence) — оптически самокомпенсируемое двулучепреломление
OIC	— (optical imaging system) — оптическая система формирования изображений
PALC	— (plasma addressing liquid crystal) — ЖК, возбуждаемый плазмой
PA-LCD	— (photoactive LCD) — возбуждаемый светом ЖКД
PBS	— (polarizing beam splitter) — поляризационный расщепитель лучей
PC	— (personal computer) — персональный компьютер
PDLC	— (polymer dispersed liquid crystal) — жидкий кристалл, диспергированный в полимере
PDP	— (plasma display panel) — плазменно-дисплейные панели

PIPS	— (polymerization induced phase separation) — фазовое разделение полимеризацией
PLC	— (polymer liquid crystal) — полимерный жидкий кристалл
P-LCD	— (projection liquid crystal display) — проекционный жидкокристаллический дисплей
PLED	— (polymer light emitted display) полимерный СДД
PM	— (passive matrix) — пассивная матрица
PMLC	— (polymer modified LC) — ЖК, модифицированный полимером
Poli-Si	— (polycrystalline-silicon) — поликристаллический кремний
PSF	— (point spread function) — функция рассеяния точки
PSLC	— (polymer stabilized LC) — ЖК, стабилизированный полимером
PSCT	— (polymer stabilized cholesteric texture) — холестерик, стабилизированный полимером
PVCN	— (polyvinilcinnamate) — поливинилциннамат (фотоориентант)
R-CSH mode	— (reflective-color super homeotropic) mode — отражательная цветная супергомеотропная мода
R-LCD	— (reflective LCD) — отражательный ЖКД
RGB	— (red, green, blue) — красный, зеленый, синий; основные цвета, смешением которых в оптике получают белый цвет
RSA	— (reverse saturable absorbtion) — обратимое насыщаемое поглощение
SBE	— (super twist birefringence effect) — супертвистовый эффект на основе двулучепреломления
SEM	— (scanning electron microscope) — сканирующий электронный микроскоп
SFT	— (super thin film transistor) — сверхтонкий пленочный транзистор
SIPS	— (solvent induced phase separation) — фазовое разделение раствором
SLM	— (special light modulator) — пространственный модулятор света
SmLC	— (smectic liquid crystal) — смектический жидкий кристалл
SRB	— (selective reflection band) — полоса селективного отражения
SPD	— (spectral power distribution) — спектральное распределение мощности

SSCT	— (surface-stabilized cholesteric texture) — холестерическая текстура, стабилизированная поверхностью
SSFLCD	— (surface stabilized ferroelectric liquid crystal display) — стабилизированный поверхностью сегнетоэлектрический жидкокристаллический дисплей
STN	— (super twist nematic) — супертвистовый нематик, закрученный более, чем на 90°, например на 270°
SUFTLA	— (surface-free technology by laser annealing) — технология лазерного отжига свободной поверхности
TFELD	— (thin film electro luminescent display) — тонкопленочный электролюминесцентный дисплей
TIPS	— (thermally induced phase separation) — фазовое разделение, осуществляемое термически
TIR	— (total internal reflection) — полное внутреннее отражение
TFT	— (thin film transistor) — тонкопленочный транзистор
TMA	— (thin film micromirrors array) — токопленочные микророзеркала
TN	— (twist nematic) — твистовый нематик
TPA	— (two-photon absorption) двухфотонное поглощение
TPACS	— (two-photon absorption cross section) — поперечное сечение двухфотонного поглощения
VA(N)	— (vertically aligned) nematic — вертикально ориентированный нематик
VDS	— (visual display system) — визуальная дисплейная система
VFD	— (vacuum fluorescent display) — вакуумно-люминесцентный дисплей
VGA (640×480)	— SVGA (800×600), XGA (1024×768), SXGA (1280×1024), UXGA (1600×1200), QSXGA (2560×2048) — компьютерные форматы изображения
VHR	— (voltage holding ratio) — отношение напряжений (например, при изменении температуры)
VR	— (virtual reality) — виртуальная реальность
VRD	— (virtual retinal display) — виртуальный ретинальный дисплей
ZBTN	— (zenital bistable twist nematic) — зенитальный бистабильный твист-нематик
3DDAC	— (3 — dimensial display with accommodative compensation) — объемные дисплеи с компенсацией аккомодации

## ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Вниманию читателей представляется объемная монография «Фотоника жидких кристаллов» профессоров М. Г. Томилина и Г. Е. Невской, отражающая результаты работы авторов и их коллег в мире в этой области за последние 40 лет. Это первая в отечественной научно-технической литературе монография, которая, помимо описания общих сведений о жидких кристаллах (структуры, химических и физических свойств, а также основных оптических эффектов), посвящена применению жидких кристаллов (ЖК) в плоских информационных дисплеях, устройствах фотоники и в качестве регистрирующих сред. По широте охвата рассматриваемых вопросов и глубине их изложения она не имеет аналогов ни в отечественных, ни в зарубежных изданиях.

Само понятие *фотоника*, вошедшее в заголовок книги, имеет несколько значений. В России и странах бывшего СССР оно обычно используется в смысле, приданном ему академиком А.Н. Терениным, как наука о фотопроцессах в молекулярных системах. В зарубежной литературе фотоника — это скорее наука о способах преобразования и организации излучения. В этой книге термин *фотоника* надо понимать скорее во втором смысле.

До недавнего времени в СССР насчитывалось большое число ученых, работавших в области физики и химии жидких кристаллов. Значительными были и достижения отечественных специалистов, превративших нашу страну в один из самых передовых центров жидкокристаллической науки. К несомненным достоинствам монографии относится стремление авторов с максимальной полнотой отразить вклад отечественных ученых, который незаслуженно обходится молчанием во многих зарубежных изданиях. Сегодня большинство из этих ныне работающих ученых живет и успешно

работает за пределами России. Научных учреждений в нашей стране, где продолжают исследования по ЖК тематике, осталось немного. Существенно сузилась технологическая база для синтеза жидкокристаллических материалов и производства жидкокристаллических устройств. И все же определенные положительные достижения имеются. Причина этому — начало смены парадигм направлений научных исследований. Сегодня интерес к ЖК проявляют ученые, работающие в области нелинейной оптики, физики наночастиц, оптических информационных систем, лазерной физики и других передовых информационных технологиях. Это области, где рождаются новые эффекты, материалы и технологии. Вот для таких специалистов и предназначена эта монография. Она состоит из пяти частей.

В первой части последовательно приводятся общие сведения о ЖК, начиная с их строения и классификации, известные еще с середины прошлого столетия, но без которых дальнейшее знакомство с содержанием монографии было бы затруднено. К достоинствам этого раздела стоит отнести стремление авторов связать общие представления о ЖК с характеристиками жидкокристаллических материалов, используемых на практике. При описании физических свойств ЖК основное внимание уделено оптическим характеристикам материалов, некоторые из которых получены непосредственно авторами. Следует отметить пионерскую работу Зверевой Г. Е. (Невской) и Капустина А. П., в которой впервые были обнаружены домены, позже детально изученные Вильямсом и получившие название «домены Капустина — Вильямса».

Вторая часть посвящена подробному описанию основных оптических эффектов в ЖК при воздействии внешних электрических, магнитных и температурных полей. Описанию эффектов предшествует детальное рассмотрение поверхностных явлений в ЖК ячейках и проблем ориентации ЖК. Традиционные методы ориентации существенно дополнены сведениями о новых передовых способах светоиндуцированной ориентации, впервые разработанной в нашей стране. Описание электро- и магнитооптических эффектов в ЖК опирается на традиции, заложенные петербургской школой и развитые московской школой физиков. Подробно рассмотрены быстродействующие эффекты в сегнетоэлектрических жидких кристаллах. Особое внимание уделено нелинейным оптическим эффектам в ЖК и их описанию, в чем передовую роль также сыграли отечественные ученые.

Часть третья — «Дисплеи» (главы 8 и 9) является лучшей во всей книге. Профессор М.Г. Томилин был организатором российского отделения международного общества информационных дисплеев и долгое время его возглавлял. Это сказалось на содержательности материала и качестве его изложения. Хорошему впечатлению не мешает ряд излишних для заявленной авторами темы «фотоника» подробностей.

Часть IV наиболее эклектична. Она посвящена различным применениям эффектов в ЖК для задач генерации и управления световыми и прежде всего лазерными потоками. В главе 10 рассматривается новое направление применения ЖК для целей лазерной генерации, которое будет полезно отечественным специалистам, работающим в области лазерной техники. И хотя уверенность в том, что жидкие кристаллы состоятся как лазерный материал, не велика, исследования в этом направлении существенно расширяют представления о теории генерации в анизотропных средах. Глава 11 посвящена анализу последних достижений жидкокристаллических материалов в электрически управляемых пространственных модуляторах света. Их конкретному практическому применению посвящена глава 12, в которой впервые в отечественной литературе приводятся подробные сведения по адаптивной оптике на основе жидкокристаллических сред. Анализу характеристик оптически управляемых пространственных модуляторов света и перспективам их использования в оптических устройствах посвящена глава 13.

Пятая часть монографии посвящена регистрирующим средам на основе ЖК. Она состоит из четырех глав. Первая из них (глава 14), посвященная динамической голографии и записи голографических решеток, методически отличается от последующих трех глав, где, скорее всего, описываются методы ЖК дефектоскопии. Разработка методов дефектоскопии является оригинальным вкладом авторов в фотонику ЖК. Объединяет эти главы то, что этот материал впервые представлен в полном объеме как самостоятельное научное направление.

Оба автора монографии являются известными учеными, давно и плодотворно работающими в области жидких кристаллов. С каждым из них связано развитие определенного направления в жидкокристаллической науке. Их публикации и монографии М.Г. Томина хорошо известны как в нашей стране, так и за рубежом. Материалы этих монографий «Свойства жидкокристаллических материалов» и «Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью»

частично использованы при написании данной работы. Естественно, что собственные научные интересы и педагогический опыт авторов, читающих курс лекций на обсуждаемую тему, накладывают личный отпечаток на общее содержание материала. Читатель почувствует это, например, по излишней детализации некоторых разделов, что не всегда идет на пользу изложению.

Несмотря на незначительные недочеты, монография профессоров М.Г. Томилина и Г.Е. Невской в большей своей части ясно и подробно излагает громадный по объему материал, сопровождаемый тщательно подобранными библиографическими ссылками, и хорошо отражает современное состояние и проблемы фотоники жидких кристаллов.

Монография будет полезна студентам, аспирантам и научным сотрудникам, работающим в интенсивно развивающейся области фотоники жидких кристаллов и ее издание позволит заполнить существенный пробел в информационном поле высоких технологий.

Доктор физико-математических наук,  
профессор

*В.В.Данилов*

## ВВЕДЕНИЕ

*Путешествие протяженностью  
в тысячи миль начинается с первого шага.  
Китайская пословица*

Целью настоящей монографии является описание применения жидкокристаллических материалов в различных устройствах фотоники. Основным назначением этих устройств является управление параметрами оптического излучения и формирование оптического изображения. Это осуществляется путем модуляции излучения по интенсивности, фазе, спектральным параметрам и угловому распределению.

В последние десятилетия достигнуты большие успехи в синтезе, всестороннем исследовании широкого ряда термотропных жидких кристаллов (ЖК), в разработке полимерных и композиционных материалов на основе ЖК. Это расширило их функциональные возможности и области применения. Жидкие кристаллы представляют собой анизотропные жидкости с большой величиной оптической анизотропии. В ряде случаев они обладают уникальными свойствами по сравнению с традиционными оптическими материалами — возможностью плавного и локального управления оптическими характеристиками среды: светопропусканием, светорассеянием, поляризацией, преломлением, отражением, поглощением света, цветовыми параметрами. Это управление можно осуществлять электрическими, световыми сигналами, механическими, тепловыми, магнитными, химическими и другими воздействиями.

Разнообразие структур ЖК, физических свойств и их анизотропия, различия в граничных условиях и способность откликаться на внешние воздействия привели к обнаружению большого числа оптических эффектов, часть из которых нашла применение в совре-

менных информационных технологиях. Для всех этих эффектов характерно существенное изменение оптических свойств ЖК при слабых воздействиях различной физической природы. Использование ЖК в оптических приборах позволило не только улучшить их эксплуатационные характеристики, но и в ряде случаев сделать их уникальными. В изготовлении этих устройств применяются передовые тонкопленочные технологии, в управлении — достижения микроэлектроники. ЖК используются как в оптических элементах, составивших новую элементную базу, так и в оптических системах с новыми функциональными возможностями. В основе большинства применений лежат жидкокристаллические модуляторы света, работающие в видимой и ИК областях спектра и имеющие низкие рабочие напряжения.

Следует выделить три главные области применения ЖК материалов: дисплеи, оптические устройства и регистрирующие среды.

Обычно ЖК ассоциируются с дисплеями. Основанные на различных эффектах, дисплеи на жидких кристаллах (ЖКД) обладают конструктивным многообразием, выпускаются миллионными тиражами, используются во многих устройствах и широко вошли в нашу повседневную жизнь. Они применяются в качестве плоских экранов мониторов персональных компьютеров, телевизоров, мобильных телефонов и других приборов. ЖК часто относят к электронным материалам, хотя в действительности их выходными параметрами являются оптические характеристики.

В последние годы интенсивно развиваются недисплейные применения, в частности модуляторы света (ЖКМС). Наиболее широкими функциональными возможностями обладают пространственно-временные модуляторы света (ПМС) с электрическим или оптическим управлением. Особенность последних состоит в том, что они дополнительно содержат светочувствительный слой фотопроводника, позволяющий осуществлять управление световым сигналом. К ЖКМС обычно предъявляют более высокие требования по быстродействию, пространственному разрешению и оптическому качеству для обеспечения фазовой однородности, чем к ЖКД. Они выпускаются небольшими партиями для разных оптических приборов. Известно их использование в интегральной и адаптивной оптике, инфракрасной и лазерной технике, телекоммуникации, динамической голографии, обработке информации, акустике и др. Разрабатываются переключатели, световые шторы, дифракционные решетки с перестраиваемым шагом, оптические дефлекторы, фазовые корректо-

ры, адаптивные линзы, когерентно-оптические преобразователи изображений и другие элементы. Это дало толчок дальнейшему развитию адаптивных оптических приборов с новыми возможностями по управлению их оптическими характеристиками.

Изучение взаимодействия света с ЖК привело к обнаружению гигантской оптической нелинейности, на основе которой создается новый класс оптических приборов.

ЖК как регистрирующие среды используются для записи голограмм и для визуализации световых, температурных, электрических, магнитных и др. полей на поверхностях материалов. Это позволяет выявлять дефекты структуры материалов и изделий.

Способность ЖК к самоорганизации и формированию надмолекулярных структур делает их перспективным материалом для нанотехнологий.

Весь спектр рассмотренных вопросов относится к фотонике, в частности к ее разделам оптоэлектроники и оптической обработки изображений. Автор этого термина академик А.В. Теренин определял фотонику как совокупность взаимно связанных фотофизических и фотохимических процессов в веществе. Словарь терминов «Фотоника», изд. СО РАН, 2004 так раскрывает это понятие: «Фотоника охватывает область науки и техники, связанную с использованием светового излучения (потока фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах, в которых генерируется, усиливается, модулируется, распространяются и детектируются оптические сигналы, а также происходит их запись и отображение...».

К настоящему времени изданы десятки монографий, посвященных изучению химических и физических свойств ЖК материалов, однако вопросы фотоники жидких кристаллов отражены недостаточно. В монографии последовательно изложены следующие разделы: структура ЖК, основные химические, физические свойства и электрооптические эффекты, применения ЖК в дисплеях, оптических элементах и устройствах, а также в качестве регистрирующих сред. В нее вошли результаты исследований многих ученых в этих областях, в том числе итоги многолетней работы авторов. В монографию включены материалы международных конференций по жидким кристаллам, информационным дисплеям, прикладной оптике, оптике лазеров и современному материаловедению. Неоценимую помощь в написании монографии оказало посещение авторами научных центров более чем в 30 странах мира и знакомство с ведущими специалистами по прикладной оптике ЖК. Авторы при-

знательны многим отечественным и зарубежным ученым за обсуждение и представление результатов их собственных исследований, без привлечения которых обсуждаемая проблема была бы освещена недостаточно. В монографии отражены результаты российских ученых, работающих в научных центрах Москвы, Санкт-Петербурга, Иваново, Новосибирска, Красноярска и др. Большую помощь оказало сотрудничество с коллегами из ближнего зарубежья: Украины, Белоруссии и Грузии. В ней также использованы курсы лекций, прочитанные в СПГУИТМО (Санкт-Петербург) и на физфаке МГУ (Москва).

Появлению этой монографии авторы обязаны творческой обстановке, которая царила в нашей стране накануне социальных потрясений, что привело к бурному развитию этого научного направления. Значительную роль в этом сыграли научные коллективы, объединенные деятельностью международного жидкокристаллического сообщества «Содружество», ряд лабораторий Государственного Оптического института им. С. И. Вавилова и деятельность постоянного научного семинара по прикладной оптике при Доме Ученых им. А. М. Горького в Санкт-Петербурге.

Авторы выражают благодарность за представление результатов своих исследований и полезные обсуждения д.ф.-м.н., Аэро Эрону Люттовичу, к.ф.-м.н. Беренбергу Владимиру Александровичу, д.ф.-м.н., Блинову Льву Михайловичу, д.х.н., Болотину Борису Марковичу, к.т.н. Венедиктову Владимиру Юрьевичу, д.ф.-м.н., Данилову Владимиру Васильевичу, д.т.н. Жарковой Галине Михайловне, д.ф.-м.н., Кундиковой Наталье Александровне, д.ф.-м.н., Лаврентовичу Олегу Дмитриевичу, д.ф.-м.н., Легуше Федору Федоровичу, к.т.н., Мордасову Владимиру Ивановичу, д.ф.-м.н., Палто Сергею Павловичу, к.ф.-м.н., Сомсу Леониду Николаевичу, д.ф.-м.н., д.х.н., Сонину Анатолию Степановичу, д.ф.-м.н., Стаселько Дмитрию Ивановичу, Томилиной Ольге Викторовне, Томилину Егору Алексеевичу, д.ф.-м.н., Чигринову Владимиру Григорьевичу, д.ф.-м.н., Чилая Гураму Сергеевичу, д.х.н., член-корр. РАН Шибаеву Валерию Петровичу, к.т.н., Шмулевичу Владимиру Львовичу, проф. Ф. Босу (Кент, США), д-ру П. Маршалу (SEOS, Великобритания), проф. С. Кобаяши (Япония).

Особую признательность авторы считают необходимым высказать д.х.н., Пестову Сергею Михайловичу за предоставление информационных материалов, использованных в монографии.

## Часть I

# СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Все описания реальности — это гипотезы.  
Будда



Фрагмент картины английского художника  
Э. Пойниера (1836–1919) *Предсказательница*, 1877 г.  
Из собрания Королевской Академии художеств, Лондон.

## Глава 1

### СТРУКТУРА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Со времени открытия жидких кристаллов несколькими поколениями физиков, химиков и биологов накоплен огромный материал по результатам их исследования. Изданы десятки книг, посвященных различным областям физики и химии ЖК [1–72]. Однако многие вопросы до сих пор остаются нерешенными, что объясняется широким фазовым разнообразием этого состояния вещества, не универсальностью свойств и сложностью молекулярной структуры.

#### 1.1. Жидкокристаллическое состояние вещества

Жидкокристаллическим (ЖК) (или *мезоморфным*) называют состояние вещества, промежуточное между твердым кристаллом и изотропной жидкостью. В твердом кристалле существует дальний порядок в расположении молекул и они, участвуя в тепловом движении, как правило, не покидают положения своего равновесия. В изотропных жидкостях отсутствует дальний порядок, и молекулы обладают высокой подвижностью. В жидкокристаллическом состоянии вещество по своим реологическим свойствам подобно жидкости — оно текуче, образует капли, принимает форму сосуда, в котором находится. Вместе с тем, как и твердый кристалл, ЖК имеет анизотропию оптических, электрических, магнитных, механических и других свойств, что является следствием наличия дальнего порядка в расположении молекул.

Жидкокристаллическое состояние (мезофаза) свойственно многим органическим (и ряду неорганических) соединениям, молеку-

лы которых анизометричны, что определяет наличие порядка в их расположении.

Различают низкомолекулярные ЖК и полимерные ЖК. Низкомолекулярные ЖК (длина молекул 10–15 Å), характеризуются более высокой подвижностью молекул. Они используются для модуляции излучений и находят широкое применение в дисплейных технологиях и оптических (оптоэлектронных) приборах. Полимерные ЖК представляют практический интерес как реверсивные регистрирующие среды для записи оптической информации.

Низкомолекулярные ЖК разделяют на *термотропные* и *лиотропные*. Термотропные ЖК существуют в некотором температурном интервале. Фазовые переходы в этих веществах происходят при изменении температуры. Твердый кристалл (К) переходит в жидкокристаллическую фазу при температуре плавления  $T_{пл}$ . Дальнейшее нагревание приводит к переходу в изотропную жидкость (ИЖ) при температуре просветления  $T_{пр}$ .

Типичная схема фазовых переходов имеет вид:



Аналогичные фазовые переходы могут происходить при изменении давления.

Термотропные ЖК подразделяют на *энантиотропные* и *монотропные*. Энантиотропные мезофазы формируются как при нагревании, так и при охлаждении вещества. В монотропных ЖК мезофаза является метастабильной и наблюдается при заданном давлении при охлаждении изотропной жидкости ниже температуры плавления кристалла.

Лиотропные ЖК образуют мезофазу только в растворе при определенных значениях концентрации, температуры и давления. Обычно они состоят из поверхностно-активных веществ (амфифильных молекул). Лиотропные мезофазы образуются при растворении поверхностно-активных веществ (ПАВ) в воде или некоторых других растворителях. При этом амфифильные молекулы или ионы обычно самопроизвольно группируются в надмолекулярные агрегаты: мицеллы, бислои и т. д. В качестве примеров лиотропных мезогенных соединений могут служить олеат аммония, стеараты натрия, калия (мыла).

В прикладной оптике используются преимущественно термотропные ЖК, причем практический интерес представляют два типа. ЖК называют *каламитаками*, если их молекулы имеют удлиненную

форму (рис. 1.1,*a*) и *дискотиками* в случае дисктических молекул (рис. 1.1,*б*). В каламитиках при вращении молекул вокруг длинной оси образуется цилиндр с достаточно большим отношением высоты к диаметру.

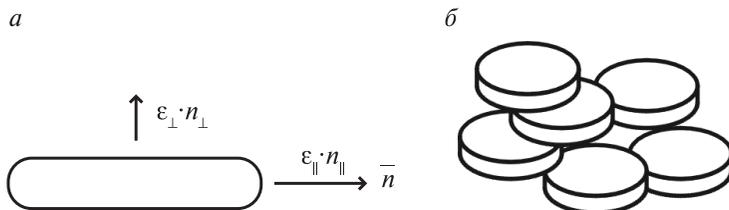


Рис. 1.1. Схематическое изображение палочкообразных молекул ЖК в каламитиках (*a*) и дискотиках (*б*):  $n$  — преимущественное направление длинных осей молекул,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $n$  — показатель преломления ЖК

В последние годы появились сведения о применении лиотропных ЖК в фотонике для увеличения углов обзора в дисплеях и для диагностики биологических объектов [73].

## 1.2. Классификация жидких кристаллов

Открытие термотропных ЖК относят к 1888 г., когда австрийский ботаник Ф. Рейнитцер из Немецкого университета в Праге обнаружил, что синтезированный им холестерилбензоат плавится в две стадии. Вначале образовывалась мутная жидкость, а при дальнейшем нагревании — прозрачный расплав [36]. В интервале температур от 151 до 178,5 °С образовавшаяся фаза имела яркие цвета и вращала плоскость поляризации света. Ф. Рейнитцер предположил, что мутная жидкость является двухфазной системой, и отправил свой препарат известному немецкому физику О. Леману. Леман не только установил, что при плавлении кристаллического холестерилбензоата образуется новая фаза, промежуточная между истинно твердой и истинно жидкой, но и обнаружил это свойство у других веществ. В 1890 г. он ввел термин *жидкие кристаллы*, основанный на привлекательном сочетании противоположных понятий — жидкий и кристаллический — и ставший с тех пор общеупотребительным.



Австрийский ботаник  
Ф. Рейнитцер  
(1857–1927)



Немецкий физик-  
кристаллограф  
О. Леман (1855–1922)

Однако до открытия Ф. Рейнитцера, ученые занимались изучением молекул, создающих при определенных концентрациях в воде цветные тонкие пленки. Взбитые на воздухе они формируют пузыри, и хорошо известны как очищающие вещества или просто мыла. Этот класс веществ в наше время получил название лиотропных ЖК. Капиллярные свойства таких веществ еще в 1519 г. изучал Леонардо да Винчи [71]. Позже они явились объектами исследования Р. Гука, Н. Ньютона и Б. Франка, причем последний изучал влияние липидных слоев на поверхностные свойства воды. В 1840 г. Д. Платэ исследовал закономерности мыльных пленок на многоугольных рамках, выявив ряд структурных регулярностей при определенной концентрации вещества. 30 лет спустя Д. Гиббс на основании результатов наблюдения за поведением мыльных пленок развил основы межфазной термодинамики. В 1949 г. Брэгг и В. Ломер применили мыльные пузыри для изучения дислокаций в твердых кристаллах. В 1984 г. очень тонкие слои мыла использовались как расщепитель луча в нейронной оптической интерферометрии. Водными растворами мыла не ограничивается класс лиотропных ЖК. Можно привести много примеров упорядоченных ЖК биологической природы, например, мозаичный вирус табака, водный раствор полипептидов. Существование и использование лиотропных ЖК оказалось хорошо известным в прошедшем тысячелетии, хотя потребовалось целое столетие на то, чтобы это осознать.

К началу XX века было известно несколько десятков термотропных ЖК. В 1922 г. французский физик Ж. Фридель на основании результатов оптических наблюдений разработал классификацию

термотропных ЖК [74], претерпевшую к настоящему времени некоторые уточнения и дополнения (табл. 1.1). В таблице последовательно по строкам приведена классификация ЖК, по способу образования мезофазы, по форме молекул и по типу мезофазы.

Таблица 1.1



Не все из приведенных структур нашли применение в устройствах фотоники. В дальнейшем основное внимание будет уделено тем ЖК, на основе которых разработаны элементная база и оптические устройства.

Различные структуры ЖК имеют разную упорядоченность в расположении молекул. Для характеристики упорядоченности в мезофазе вводится единичный вектор  $\mathbf{n}$ , указывающий направление преимущественной ориентации длинных осей молекул. Его принято называть директором. Выбор направлений  $+\mathbf{n}$  и  $-\mathbf{n}$  является произвольным. Директор характеризует дальний порядок в расположении молекул, и классификация ЖК осуществляется в зависимости от ориентации директора и расположения центров масс молекул.

Термотропные ЖК разделяют на нематические (нематики), холестерические (холестерики) и смектические (смектики) (рис. 1.2) [75, 76].

Нематики (от греческого слова *нема* — нить) имеют дальний ориентационный порядок: молекулы нематического жидкого кристалла (НЖК) длинными осями ориентированы приблизительно параллельно друг другу, но их центры масс расположены хаотично. При сохра-

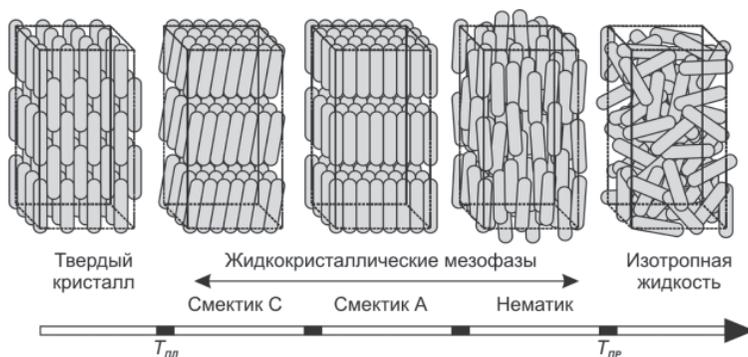


Рис. 1.2. Фазовые переходы в термотропных ЖК, происходящие при нагревании образца

нении направления директора в них возможно вращение молекул вокруг длинных и коротких осей. Примерами нематиков, имеющих мезофазу при комнатной температуре, являются хорошо изученные соединения: *n*-метоксибензилиден-*n*-бутиланилин (МББА) и 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ). Большинство нематиков являются оптически одноосными, однако существуют и двуосные.

Холестерические ЖК (ХЖК) — холестерики — названы так потому, что к ним относятся главным образом производные холестерина. Холестерическая фаза образована оптически активными молекулами. В каждом слое длинные оси молекул ориентированы параллельно, как в одноосном нематике, поэтому холестерики являются частным случаем нематика. При переходе от данного слоя к следующему, директор поворачивается на небольшой угол, поскольку молекулы холестерика зеркально асимметричны. Как следствие, структура имеет винтовую ось симметрии, расположенную нормально к директору (рис. 1.3).

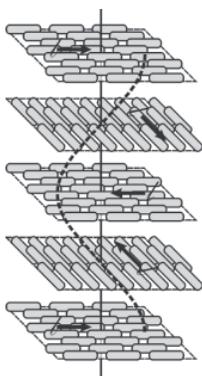


Рис. 1.3. Спираль ХЖК

Расстояние между двумя ближайшими слоями с одинаковой ориентацией молекул называется шагом спирали. Таким образом, в ХЖК наблюдается одномерный ориентационный порядок с одномерным трансляционным упорядо-

чением. Холестерическую фазу можно получить при добавлении небольшого количества производных холестерина или немезоморфного оптически активного вещества в нематик: такую смесь называют хиральным нематиком. Различают хиральные нематики с левой и правой закруткой спирали. Смесь таких веществ в определенной пропорции (рацемическая смесь) образует нематическую мезофазу. Спиральная упаковка молекул ХЖК является причиной ее уникальных оптических свойств — селективного отражения циркулярно поляризованного света и высокой оптической активности. Для некоторых веществ удельное вращение плоскости поляризации достигает 60000–70000 град/мм, в то время как для обычных органических жидкостей и оптически активных кристаллов этот параметр редко превышает 300 град/мм [2]. Шаг холестерической спирали зависит от температуры. Если шаг спирали ХЖК не превышает длины волн видимой части спектра, то могут быть получены характерные цвета. Поэтому ХЖК нашли применение как регистрирующие среды в термографии для визуализации распределения температурных полей на поверхностях различных материалов и объектов.

Смектические ЖК (СЖК) — смектики — от греческого слова *смегма* — мыло — образуют наиболее упорядоченные мезофазы: длинные оси молекул ориентированы приблизительно параллельно друг другу, и их центры масс располагаются в пределах одного слоя. СЖК обладают частичным как ориентационным, так и дальним трансляционным порядком. Толщина слоев в СЖК фазах порядка длины молекулы (20–40 Å). Возможны различные типы упаковок молекул в слое. Классификация смектических фаз была предложена в [56, 76–78,]. Смектические фазы обозначают заглавными буквами латинского алфавита. Различают смектики А, В, С, Н, I, В и др.

В смектике А молекулы в каждом слое расположены перпендикулярно плоскости слоя, в то же время их центры распределены нерегулярно, как в жидкости (рис. 1.2). Притяжение между слоями слабое по сравнению с силами взаимодействия молекул в слое. Поэтому слои довольно легко скользят относительно друг друга.

При нагревании ЖК из твердой кристаллической фазы могут последовательно наблюдаться фазовые переходы. Если вещество обладает нематической и смектической фазой, то температура смектической фазы ниже, чем нематической. При нагревании и охлаждении такого вещества фазовые переходы происходят по схеме:

$K \leftrightarrow \text{СЖК} \leftrightarrow \text{НЖК} \leftrightarrow \text{ИЖ}$

В веществах, молекулы которых оптически активны, фазовые переходы осуществляются по схеме:

$K \leftrightarrow \text{СЖК} \leftrightarrow \text{ХЖК} \leftrightarrow \text{ИЖ}$

Исключение составляют *реентрантные* (возвратные) ЖК, у которых наблюдается еще одна менее упорядоченная фаза при температуре более низкой, чем высокоупорядоченная [76].

На рис. 1.2 показано, что при нагревании выше температуры плавления  $T_{\text{пл}}$  возникает смектическая фаза С. Фаза С (рис. 1.4а) в отличие от фазы А оптически двухосна.

Директор в смектике С наклонен к плоскости слоев. Как и все смектические фазы смектик С имеет двумерный порядок. При дальнейшем нагревании сначала возникает смектическая фаза А, а затем — нематическая.

На основании рентгеноструктурных исследований и условий смешиваемости установлено более 10 различных типов смектических фаз [78]. Среди них отметим В фазу, имеющую трансляционную упорядоченность внутри слоя в виде гексагональной решетки (рис. 1.4б). Различают фазу  $B_A$  с директором, направленным перпендикулярно слоям, и  $B_C$  фазу, в которой директор наклонен к плоскости слоев.  $B_A$  фаза оптически одноосна,  $B_C$  — двухосна.

Существуют хиральные смектики (символ хиральности — значок \*): в смектиках  $A^*$  (СЖК  $A^*$ ) закручивание молекул происходит в плоскости слоев, а в  $C^*$  (С\*ЖК) — перпендикулярно плоскости

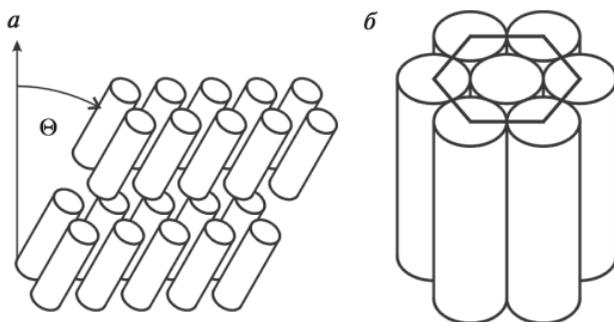


Рис. 1.4. Структура смектика С (а) и плотноупакованная гексагональная структура смектика В (б).

слоев (рис.1.5). Хиральность смектика  $C^*$  обусловлена отдельными хиральными компонентами или их смесью. Локально структура хирального смектика  $C^*$  такая же, как и ахирального смектика  $C$ , при этом слои закручены относительно оси, перпендикулярной плоскости слоев. Смектик  $C^*$  называют также сегнетоэлектрическим смектиком. В СЖК  $C^*$  обнаружен эффект переориентации молекул по образующей конуса под действием электрического поля за единицы микросекунд. Эффект используется в быстродействующих модуляторах.

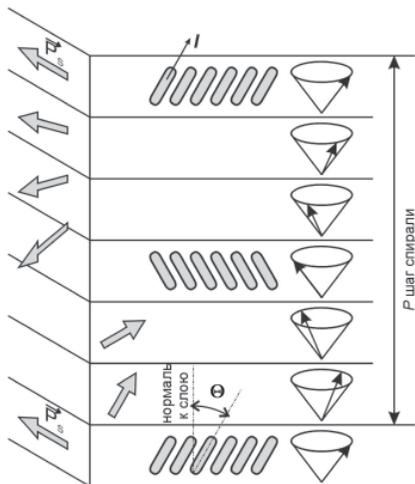


Рис. 1.5. Схематическое изображение фазы  $C^*$ ЖК

Влияние химической структуры на полиморфизм смектиков исследовано в работе [79]. Тип мезоморфизма определяется упаковкой молекул в кристаллическом «предшественнике» и зависит от дипольных моментов, поляризуемости и стерических факторов.

Термотропные ЖК могут существовать в широком температурном интервале; он является одной из важнейших эксплуатационных характеристик. Примером высокотемпературного ЖК является  $n, n'$  —диметилгексафенил, сохраняющий мезофазу до температуры  $469\text{ }^\circ\text{C}$ . Некоторые смеси нематиков кристаллизуются при температуре ниже  $-60\text{ }^\circ\text{C}$ .

Различна и ширина температурной области существования мезофазы. Так, холестерики могут иметь область мезофазы более 100 °С, но есть смеси с интервалом до 0,01 °С.

Некоторые ЖК при изменении температуры претерпевают ряд фазовых превращений, проходя последовательно несколько мезофаз. Вещества, обладающие несколькими анизотропными фазами, называют полимезоморфными. Примеры полимезоморфизма ЖК приведены на рис. 1.6 [24].

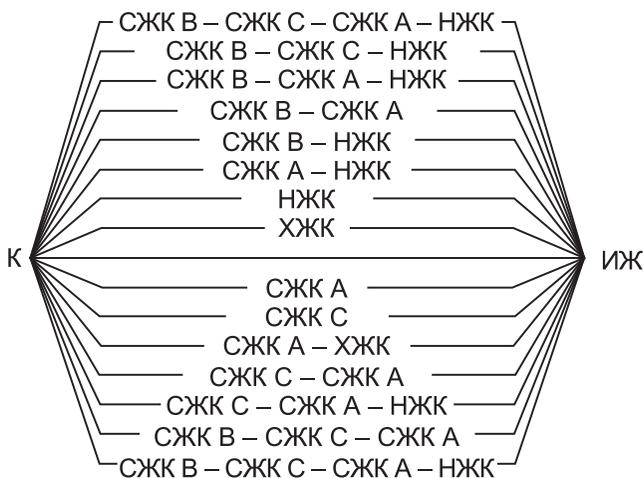


Рис. 1.6. Полимезоморфизм жидких кристаллов

При переходе от твердого кристалла через различные мезофазы к изотропной жидкости наблюдается последовательность мезофаз с понижением степени упорядочения: смектическая, холестерическая или нематическая. Та же закономерность прослеживается внутри смектической мезофазы, причем СЖК С всегда существует при более низких температурах, чем СЖК А. Полимезоморфизм необходимо принимать во внимание при использовании ЖК в интервале рабочих температур.

ЖК, содержащие атомы металлов, называются металломезогенами. Они могут образовывать фазы термотропных каламитиков, дискотиков, кубических и лиотропных ЖК. Известны металломезогены, содержащие металлы групп А или В, а также d-элементы Ag, Au, Ni, Cu, Co, V, Fe, Cr, Mo, Mn, металлы платиновой группы

Pt, Pd, Ir, Rh, Ru, а также лантаноидные элементы, например, Lu. Форма их молекул напоминает дискотики, поскольку образуют колончатые фазы [80].

В 1976 г. были синтезированы ЖК, состоящие из дискообразных молекул [51, 68, 81]. При классификации рассматривают ориентацию коротких осей — нормалей к плоскости диска. Они образуют твердокристаллическую, нематическую  $N_D$  или холестерическую  $N_D^*$  и изотропно-жидкую фазы. Вследствие дискообразной формы молекул дискотики не образуют смектической фазы, но имеют специфичные ориентационно-упорядоченные колончатые фазы с двумерным трансляционным порядком. Интересно применение дискотиков как материалов с отрицательной величиной оптической анизотропии для увеличения углов обзора в ЖК-дисплеях. Замена каламитиков дискотиками в дисплеях стала принципиально возможна после синтеза материалов, обладающих мезофазой при комнатной температуре [82–84].

В 1994 г. были синтезированы ЖКМ с изогнутой конфигурацией молекул, получившие название *бананоподобные*. В них были обнаружены смектические фазы с сегнето- и антисегнетоэлектрическими свойствами, позволяющими осуществлять реверсивную модуляцию излучения при переключении знака управляющего напряжения. До настоящего времени они являются предметом интенсивных исследований для создания быстродействующих модуляторов света.

Мезофазы соединений, состоящих из планкоподобных молекул и имеющих дальний порядок вдоль длинной и короткой осей, являются двuosными. Двuosные мезофазы отличаются различным расположением центров масс молекул относительно слоев и называются санидиками [77].

Особыми формами конденсированного состояния обладают полимеры — системы достаточно гибких макромолекул, состоящих из большого числа звеньев. Были синтезированы и изучены полимерные ЖК (ПЖК) [12, 19, 31, 42, 85, 86]. Ориентационно упорядоченными структурными элементами в них являются относительно жесткие анизометричные мезогенные группы в основной или боковых цепях (гребнеобразные полимеры). Они соединены с основной цепью гибкими развязками (рис. 1.7), или условно выделяемыми участками цепи с персистентным механизмом гибкости, сегментами Куна. Мезофазы ПЖК в целом аналогичны фазам низкомолекулярных ЖК. В них обнаружены нематические, холестерические и несколько типов смектических фаз. Особенностью ПЖК является ограниченность подвижности жестких фрагментов гибкими развяз-

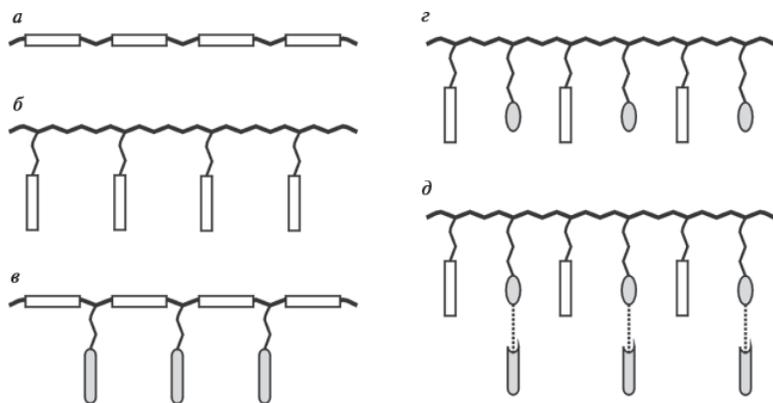


Рис. 1.7. Структуры высокомолекулярных ЖК: *a* — линейные полимеры; *б* — гребнеобразные полимеры с мезогенными группами в боковых цепях; *в* — гребнеобразные полимеры с мезогенными группами в основной и боковых цепях; *г* — гребнеобразные сополимеры с мезогенными и функциональными группами в боковых цепях; *д* — смеси таких сополимеров с низкомолекулярными и немезогенными соединениями

ками, что сказывается на физических и эксплуатационных свойствах. В частности, времена переориентации ПЖК существенно больше времен переориентации низкомолекулярных ЖК, что ограничивает их использование в качестве модуляторов. С другой стороны, возможность синтеза гребнеобразных сополимеров с различными функциональными группами в боковых цепях расширяет области их практического применения. Так, например, применение функциональных светочувствительных групп делает ПЖК пригодными для записи оптической информации [87]. Была показана возможность синтеза дискотических ПЖК, причем дискотики размещались как в основной, так и в боковых цепях.

Отдельный класс материалов составляют ЖК композиты. По структуре они чрезвычайно многообразны. Примерами служат смеси ЖК с красителями и люминофорами, суспензиями и аэрозолями, содержащие частицы различной природы в ЖК матрице, например, ферронематики, а также пористые материалы, заполненные ЖК [43, 88, 89]. Среди них следует выделить НЖК, ХЖК и СЖК, диспергированные в полимерной матрице. Физические свойства ЖК композитов существенно отличаются от свойств входящих в них

ЖК, поэтому они открывают новые возможности в применении. Особо отметим неорганические соединения, в которых имеется упорядоченное состояние, напоминающее мезофазы. Примерами могут служить растворы  $V_2O_5$ , кремнийорганических и ряда других соединений, обнаруживающих лиотропный мезоморфизм [90].

В последние годы были разработаны жидкокристаллические нанокomпозиты (ЖКН), обладающими новыми свойствами по сравнению с известными ЖК смесями [91–95]. ЖКН получают добавлением в ЖК смеси наночастиц, например, углеродных нанотрубок. Была показана возможность самоорганизации наночастиц Au в ЖК структурах, обладающих отрицательной величиной оптической анизотропии. Можно выделить две перспективные области применения ЖКН. Одна из них относится к задачам диагностики материалов с повышенным пространственным разрешением при детектировании невидимых физических полей (электрических, магнитных, полей сил межмолекулярных взаимодействий и др.) на поверхности изучаемых объектов. ЖКН представляет интерес для биофотоники, открывая возможность изучения таких важных вопросов как установление различий между живым и неживым объектом. Вторая область относится к применению ЖКН в элементах и устройствах фотоники: дисплеях, оптических модуляторах и устройствах с селективно управляемыми оптическими характеристиками излучения. Применение ЖКН в устройствах фотоники позволяет уменьшить времена переключения устройств, уменьшить пороги управляющего электрического поля, уменьшить вращательную вязкость материала и повысить стабильность работы дисплеев при возобновляемой адресации. Гибридные структуры с органическими и неорганическими добавками (фоточувствительными полимерами, сегнетоэлектрическими частицами SPS и  $BaTiO_3$ ) повышают фотопроводимость, оптическую и диэлектрическую анизотропию, а также оптическую нелинейность материалов.

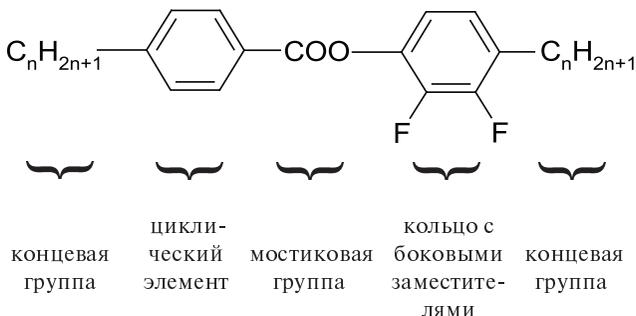
Классификация ЖК постоянно пересматривается и уточняется по мере совершенствования экспериментальной техники и теории.

### **1.3. Химическое строение жидких кристаллов**

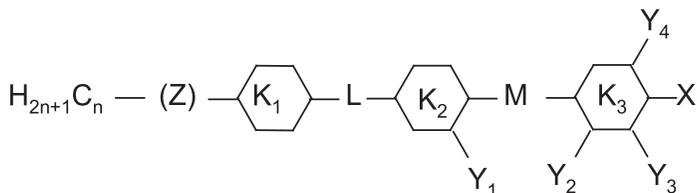
Жидкокристаллическими свойствами обладают десятки тысяч химических соединений. Их основные классы приведены в работах [38, 75, 96–99]. Подробные сведения о жидкокристаллических ма-

териалах (ЖКМ), применяемых в устройствах фотоники, изложены в монографии [71].

Мезогенный характер веществ обусловлен анизотропией дисперсионного взаимодействия, определяемой характером молекулярной поляризуемости, зависящей от пространственной структуры молекул и их симметрии. Например, базисная структура молекулы ЖК содержит жесткий каркас (кольца), центральные (соединительные, мостиковые) и концевые группы:



Такая структура хорошо описывает относительно простые ЖК соединения, а сложные структуры представляют в следующем виде:



Структурными фрагментами молекулы являются алкильные (C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>) и мостиковые группы (L, M, Z), циклические фрагменты (K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>), боковые и концевые заместители (Y<sub>1</sub> — Y<sub>4</sub>, X) [10].

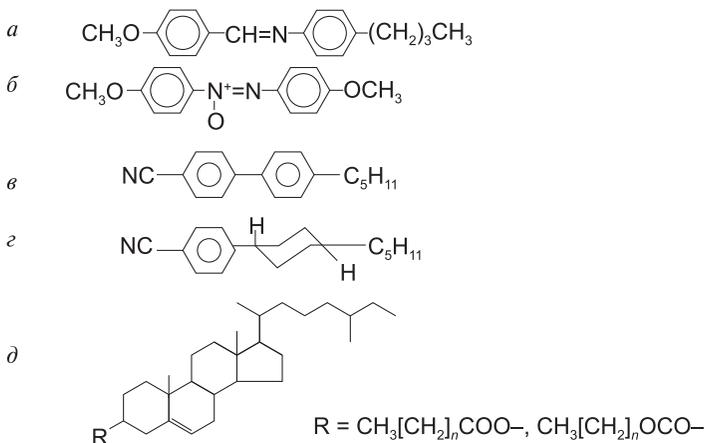
Стержнеобразное строение молекул обуславливает параллельное упорядочение в расположении молекул. Молекулы ЖК имеют вытянутую палочкообразную форму без боковых разветвленных заместителей, препятствующих их взаимной пространственной ориентации. Циклическими фрагментами являются циклогексановые, бициклооктановые, пиридиновые, пиримидиновые, бензольные и другие шестичленные карбо- и гетероциклические элементы. В боль-

шинстве ЖК соединений фенильные кольца расположены в различных плоскостях.

Молекулы ЖК обладают жесткостью вдоль длинной оси, значительной величиной дипольного момента и обычно содержат полярные группы. Полярными боковыми заместителями ( $Y_1 - Y_4$ ) являются атомы галогенов, циано- или нитрогруппа, гидроксильный радикал. Эти же фрагменты, а также сложноэфирные, алкоксильные и алканоильные группы, содержащие или не содержащие хиральный центр, характерны для концевых фрагментов. Центральные и концевые группы (особенно полярные), оказывают сильное влияние на температуры фазовых превращений и другие свойства. Наибольший интерес представляют термотропные мезогены, содержащие циклические фрагменты. Это производные бензола, нафталина, холестерина и другие. Из них по численности, многообразию и широте температурного интервала впереди стоят ароматические соединения.

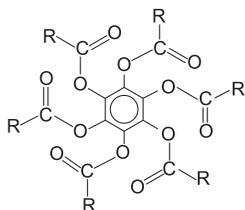
В ЖК соединениях помимо палочкообразных могут быть молекулы другой формы: дискообразные, пластинообразные, бананоподобные и др. [77].

Примеры палочкообразных и пластинообразных молекул приведены ниже:

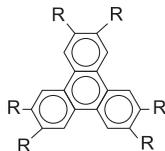


- a* — *p*-метоксибензильден *p*-бутиланилин (МББА);  
*б* — параазоанизол (ПАА); *в* — 4-циано-4'-*p*-пентилбифенил;  
*г* — *p*(транс-*p*-пентилциклогексил) бензонитрил;  
*д* — эфиры холестерина.

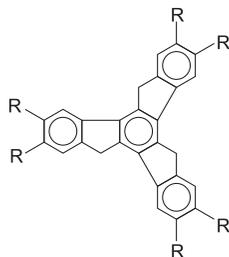
Примерами дискотических молекул являются производные гексазамещенных бензола (а), трифенилена (б), производные флуорена (в).



а

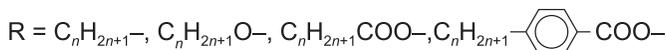


б

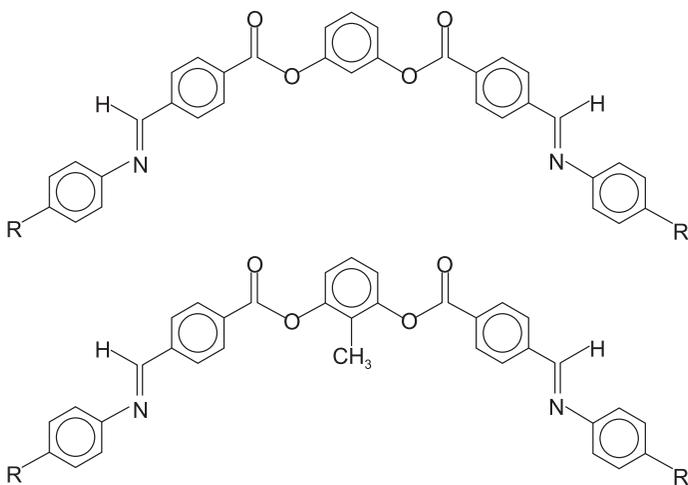


в

Примерами замещаемых групп R являются:

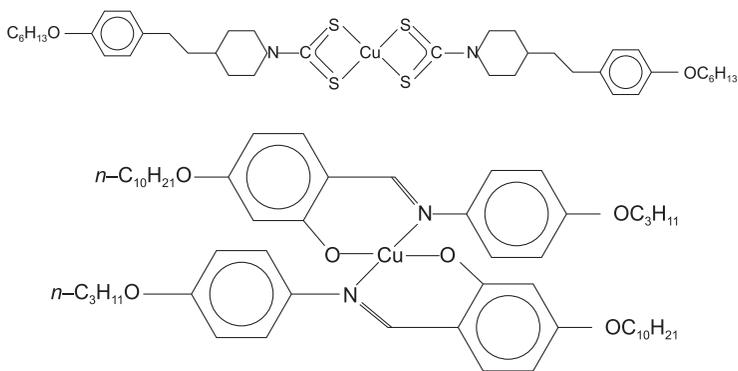


Бананоподобные молекулы формируются из мезогенных групп, связанных полужестким звеном:



R — алкильные или алкокси группы.

Молекулы металломезогенов содержат один или несколько атомов металлов. Металломезогены могут быть как каламитиками, так и дискотиками. Примерами таких соединений являются:



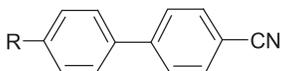
История развития жидкокристаллических материалов (ЖКМ) началась с синтеза высокотемпературных образцов: холестерилбензоата (К 150,5 °С ХЖК 182,6 °С ИЖ) и *n*-азоксианизола (К 118,2 °С НЖК 135,3 °С ИЖ) [36, 69]. Первый нематик МББА, имеющий мезофазу при комнатной температуре (+22...47 °С), был синтезирован в 1969 г. [75, 97]. Дальнейшие усилия были направлены на создание низкотемпературных ЖКМ, обладающих стабильностью в электрическом поле. С 1973 г. промышленно выпускаются смеси с интервалом мезофазы –10 + 80 °С [38].

Для ЖКМ важнейшей характеристикой является ширина и диапазон существования мезофазы. В устройствах отображения один и тот же тип мезофазы должен сохраняться в интервале температур от –50 до +80 °С. Наиболее сложным оказалось достижение нижней границы. Поскольку ни одно из индивидуальных ЖК соединений не удовлетворяло этому требованию, в 70-е годы начались работы по созданию низкоплавких ЖК смесей. Самую низкую температуру  $T_{пл}$  имеет эвтектический состав, а поскольку зависимость температуры  $T_{пр}$  смесей от состава линейная, то он обладает и самым широким интервалом мезофазы. Поэтому усилия ученых сосредоточились на разработке методов определения координат эвтектики в бинарных и многокомпонентных системах [64, 100]. При увеличении числа компонентов  $T_{пл}$  смеси уменьшается, поэтому для понижения нижнего интервала нематической мезофазы нецелесообразно смешивать более 10 компонентов. В настоящее время используют смеси из близких классов соединений, которые при охлаждении не кристаллизуются, а находятся в переохлажденном состоянии.

Основания Шиффа обладают отрицательной диэлектрической анизотропией (например, эвтектическая смесь МББА и ЭББА) и

использовались в первых ЖК индикаторах, работающих на эффекте динамического рассеяния света. Основными их недостатками были низкая химическая стабильность и высокие величины управляющих напряжений [101, 102]. Следующим классом ЖК, разработанным для индикаторов, были смеси на основе сложных ароматических эфиров [103]. Из-за низких значений диэлектрической анизотропии их легировали добавками с большей величиной  $\Delta\epsilon$ , имеющими и более высокую температуру плавления, что приводило к увеличению температуры плавления ЖКМ.

Важным этапом в разработке низкотемпературных ЖКМ стало применение цианобифенилов:



Они синтезированы в 1972 г. в университете Халла (Великобритания) известным химиком-синтетиком Дж. Греем с сотрудниками [104]:

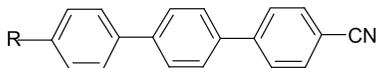


Дж. Грей — известный  
английский химик-синтетик

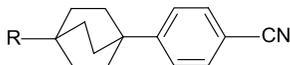
Кроме низких температур плавления алкилцианобифенилы (АЦБФ) обладают невысокой вязкостью. Смесь на основе АЦБФ (E-7, фирма ВДН) стала первым ЖКМ, получившим широкое распространение в индикаторах наручных электронных часов и автомобильных калькуляторов.

Кроме цианобифенилов к соединениям без центральной группы относятся:

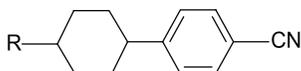
цианотерфенилы



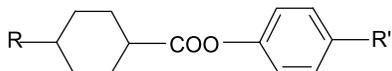
цианофенил-бициклооктаны,



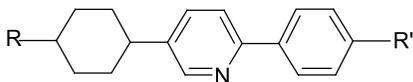
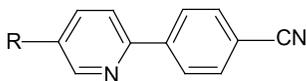
и цианофенил-циклогексаны



Фенилциклогексаны, синтезированные на фирме «Мерк» в 1976–1978 гг., явились основными компонентами для ЖКМ с малой вязкостью и расширенным интервалом существования мезофазы [105] и вскоре вытеснили цианобифенилы из многих областей применений. Дальнейшее улучшение эксплуатационных характеристик ЖК смесей было связано с разработкой фениловых эфиров циклогексанкарбоновых кислот [106], которые легли в основу нового поколения коммерческих материалов:



Для уменьшения рабочих напряжений и улучшения мультиплексирования при управлении элементами в 80-ые годы был разработан широкий класс фенилпиридинов [107], которые характеризуются малым отношением констант упругости  $K_{33}/K_{11}$ . Они нашли применение при создании сенетоэлектрических ЖК материалов. Примеры химических структур двух и трехкольчатых производных пиридинов приведены ниже:



Определенные ограничения на применение ЖКМ могут оказать их устойчивость к гидролизу и окислению. Наиболее устойчивыми к окислению являются сложные эфиры, толаны и бифенилы.

УФ излучение влияет на фотохимическую устойчивость ЖКМ, вызывая фотохимические превращения, ухудшающие характеристики материала [38]. Так, жидкокристаллические *транс*-стильбены превращаются в немезоморфные *цис*-стильбены. Аналогичные превращения наблюдаются в азо- и азоксисоединениях. Азоксисоединения под действием тепла или света могут перегруппировываться в окси-азосоединения. Высокой фотохимической устойчивостью обладают бифенилы и сложные эфиры.

Направления синтеза ЖКМ определяются их применением. Важнейшими областями применения ЖКМ являются дисплеи, оптические устройства с управляемыми параметрами и регистрирующие среды для детектирования тепловых, световых, магнитных полей и структуры поверхности материалов.

### 1.3.1. Материалы для дисплеев

ЖКМ для дисплеев являются смесью от 5 до 20 органических соединений, получаемых многоступенчатым синтезом. Материал с толщиной слоя в несколько микрон должен иметь высокий контраст, широкий диапазон шкалы серого, малые времена переключения, высокую разрешающую способность, большие углы обзора, низкие управляющие напряжения, малую потребляемую энергию, широкий температурный интервал эксплуатации и хранения. Дополнительно предъявляются требования по долговечности, радиационной устойчивости, токсичности, стоимости и др. Особыми являются требования к знаку и величине диэлектрической анизотропии, определяющие поведение молекул ЖКМ в электрическом поле.

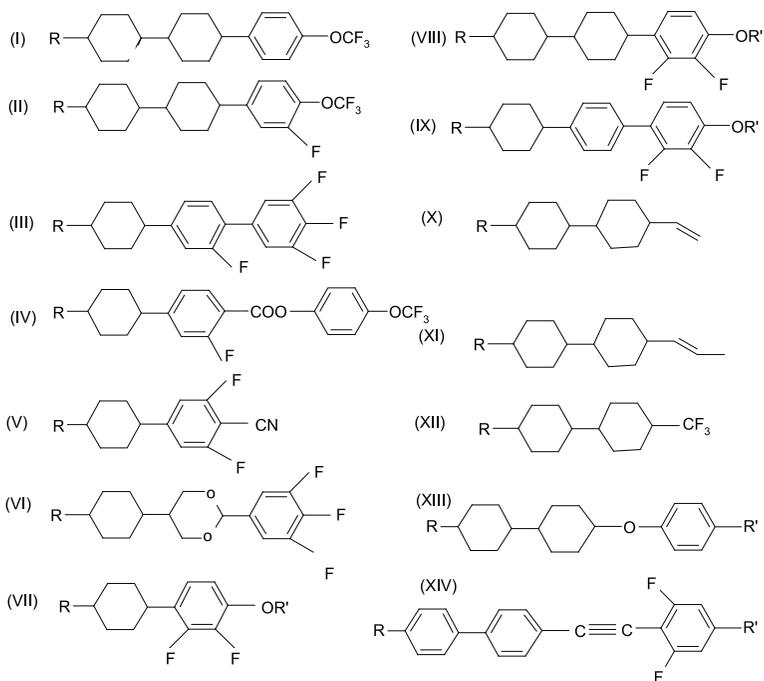
В основном ЖКМ материалы применяются в дисплеях с управлением от тонкопленочных транзисторов, где размещаются в плоском капилляре. Важно оптимизировать сопротивление  $R$  и диэлектрические характеристики. Высокое сопротивление необходимо для обеспечения качества изображения за счет больших времен зарядки конденсатора, определяемых произведением  $RC$ , где  $C$  — емкость конденсатора. Высокие значения  $R$  достигаются уменьшением величин диэлектрических постоянных. С этой целью создан широкий класс ЖКМ, в котором CN группа заменена атомами фтора [108]. Помимо малых величин диэлектрических постоянных, фтор-

содержащие НЖК имеют средние значения диэлектрической анизотропии, низкую вязкость и малую оптическую анизотропию, обеспечивающую большие углы обзора. В сочетании с ацетиленовыми группами такие материалы позволяют повысить отношение констант упругости  $K_{33}/K_{11}$  и тем повысить крутизну вольт-контрастной характеристики, уменьшить вязкость и сократить времена отклика. Увеличенное значение оптической анизотропии позволяет уменьшить толщину ЖК слоя. Это предопределило использование данного класса материалов в супертвистовых дисплеях большого размера с параметрами, позволяющими отображать движущиеся объекты [109].

Разнообразие дисплеев потребовало разработки специальных материалов для каждого из них. Можно выделить три группы дисплеев: компактные (ноутбуки), мониторы персональных компьютеров и автономные переносные (мобильные). Для них созданы фторсодержащие материалы с низкой вращательной вязкостью и высокой диэлектрической анизотропией, позволяющие создавать активно-матричные ЖК дисплеи (АМЖКД) с высоким качеством изображений. Структуры наиболее употребительных соединений приведены в табл. 1.2. Примером фторсодержащего материала первого поколения является соединение (I) с концевой группой  $\text{OCF}_3$  (1981 г.). Величина  $\Delta\epsilon$  составляет около 7, что требует для управления АМЖКД напряжения около 5В. С целью уменьшения напряжения были предприняты поиски новых ЖКМ, сохраняющих высокую полярность молекул. Фирмами Chisso и Merck были созданы материалы на основе соединения (II) — с величиной  $\Delta\epsilon = 9$ , с напряжением 4В; на основе соединения (III) — с  $\Delta\epsilon = 15$  и напряжением 3,3В. Присоединение боковой F-группы к центральной в соединении (IV) снизило напряжение до 2,5В. Недостатком этого материала оказалась невысокая температура  $T_{\text{пр}} = 70^\circ\text{C}$ . Последним достижением явилось создание ЖКМ, работающего при напряжении 1В, что осуществлено за счет снижения вращательной вязкости и повышения  $T_{\text{пр}}$ . Подробный обзор фторсодержащих материалов приведен в работе [112].

Дисплеи, использующие твист-эффект с поперечным приложением электрического поля, требует ЖКМ с большой величиной  $\Delta\epsilon$ . Для этого разработаны соединения (V), в которых к бензольному кольцу одновременно присоединены два атома фтора и цианогруппа. В этих соединениях  $\Delta\epsilon > 30$ , вращательная вязкость около 100 мПа·с., а цианосоединения имеют величину  $\Delta\epsilon \approx 20$ . Затем был предложен но-

Таблица 1.2 [110, 111]



вый класс соединений (VI), обладающий преимуществом по времени переключения по сравнению с соединением (V).

Для ЖКД с вертикальной ориентацией требуется ЖКМ с  $\Delta\epsilon < 0$ . С этой целью синтезированы соединения (VII) и (VIII), содержащие бензолные и циклогексановые кольца с  $\Delta\epsilon \approx -7$ . Заменой циклогексанового кольца в соединении (VIII) бензолным (IX) удалось при сохранении величины  $\Delta\epsilon$  увеличить  $\Delta n$  до 0,12 и уменьшить температурную зависимость напряжения.

В автономных переносных ЖКД лидирующее место занимают дисплеи отражательного типа на твист эффекте, в которых используются материалы с малой величиной  $\Delta n$ . Примером являются соединения (X) и (XI), имеющие также малую величину вращательной вязкости ( $< 50$  мПа·с). Это свойство актуально для дисплеев всех типов. Так как эти соединения не имели полярных групп, то для управления ими требовалось относительно высокие напряжения.

Для работы при меньших напряжениях были созданы соединения (XII) с  $\Delta\epsilon > 0$  и  $\Delta n = 0,06$ . Поскольку мобильные дисплеи должны надежно эксплуатироваться в широком интервале температур, были разработаны специальные соединения (XIII).

ЖКД должны отображать информацию в цвете с высокой яркостью. С этой целью предложены ЖКМ с малыми временами переключения и синтезировано соединение (XIV) с большой величиной  $\Delta n = 0,33$ , низкой вращательной вязкостью  $\approx 60\text{мПа}\cdot\text{с}$  и высоким сопротивлением.

Обобщенные результаты анализа по применению ЖКМ в дисплеях различных типов приведены в табл. 1.3 [111].

Таблица 1.3

Параметры ЖКМ	Основные структуры	Применения
Малая величина оптической анизотропии в сочетании с большой величиной диэлектрической анизотропии	Смесь компонентов, содержащая трехкольчатые фторсодержащие соединения двух циклогексановых и бензольного колец	АМЖКД с широким углом поля зрения и низким управляющим напряжением
Большая диэлектрическая анизотропия	Смесь фторсодержащих соединений с увеличенным числом атомов фтора	АМЖКД с низким управляющим напряжением
Низкая вязкость	Смесь на основе двухкольчатых цианофениловых и циклогексановых соединений	АМ и супертвистовые ЖКД с малыми временами переключения
Высокое отношение констант упругости $K_{33}/K_{11}$	Трехкольчатые соединения с алкенильными группами	Супертвистовые ЖКД высокого разрешения для персональных компьютеров (ПК)
Высокая оптическая анизотропия	Двухкольчатые соединения с тройными связями или трехкольчатые соединения типа терфенилов	Супертвистовые ЖКД с малыми временами переключения для ПК
Отрицательная диэлектрическая анизотропия	Смеси из фторсодержащих соединений	Проекционные дисплеи и АМЖКД с широким углом поля зрения

Сочетанием указанных соединений можно получить большое разнообразие ЖКМ, отвечающих конкретным требованиям.

Описанные достижения позволили в начале 1990-х годов разработать ЖКД с управлением от тонкопленочных транзисторов (ТПТ), которые применяются в «ноутбуках». Они обеспечили высокие параметры изображений: контраст, яркость, пространственное разрешение, времена переключений. Основным их недостатком явилась зависимость параметров изображений от угла наблюдения. Для его устранения были разработаны новые дисплеи с переключением в плоскости и с вертикальной ориентацией ЖК. Использовались и оптические методы на основе компенсирующих слоев. Для этого были разработаны материалы, позволившие применить ТПТ ЖКД не только для «ноутбук» большего размера, но и для мониторов настольных компьютеров [113].

Разработка новых технологических методов заполнения ЖКМ в дисплеях, основанных на принципе падающей капли, требует использования новых материалов. В связи с уменьшением толщины ЖКМ необходимы смеси с большей величиной  $\Delta n$  и повышенной стойкостью к УФ излучению.

К перспективным материалам для дисплеев с улучшенными углами обзора и симметричным угловым распределением контраста относятся дискотики. Эти материалы на основе трициклоквинозона можно использовать при комнатной температуре [83].

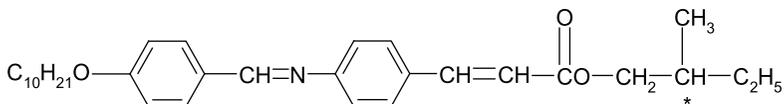
Требования, предъявляемые к ТВ экранам, отличаются от требований, предъявляемых к мониторам. К этим экранам (за исключением ТВ высокой четкости), не предъявляют требований по высокому разрешению. Зато они должны обладать большей яркостью. Серьезной проблемой остается уменьшение времен переключения. Если в настоящее время ЖКД имеют времена переключения около 25 мс, то для ТВ экранов были разработаны материалы с временами 16,7 мс и полной шкалой градаций серого. Дальнейшее совершенствование ТВ экранов связывают с использованием  $S^*ЖК$ .

### ***1.3.2. Материалы для оптических устройств на основе ЖК с управляемыми параметрами***

Основными функциональными элементами этих оптических устройств являются ЖК модуляторы, используемые для управления характеристиками излучения: интенсивностью, фазой, спектром, углом отклонения. Важнейшим требованием, предъявляемым ко

всем модуляторам, является их быстродействие. Относительно большая вязкость НЖК не позволяет получать малые времена их переключения [63]. Для повышения быстродействия перспективно использование С\*ЖК. Такое вещество было впервые получено Майером в 1975 году на примере соединения ДОБАМЦ [38]:

К 76 (СЖК Н\* 63) СЖК С\* 88 СЖК А 115 ИЖ



С этого времени началось интенсивное изучение сегнетоэлектрических (С\*ЖК) а затем и антисегнетоэлектрических ЖК. На основе С\*ЖК разработаны оптические модуляторы с самыми короткими временами переориентации в электрическом поле. С\*ЖК позволяют создать новый класс быстродействующих устройств с эффектами памяти, обеспечиваемыми бистабильными структурами, и большими углами обзора, достигаемыми специальной планарной конфигурацией. Недостатком С\*ЖК является повышенная вязкость и сложность обеспечения ориентации простыми технологическими методами.

Для получения сегнетоэлектрических ЖКМ используются не только активные хиральные добавки, но и оптически активные вещества, способные образовывать С\*ЖК [59, 114]. С\*ЖК смеси получают растворением хиральных соединений в основном ЖК материале. Для составления рабочих смесей вводятся компоненты, уменьшающие вязкость ЖКМ и, соответственно, времена переключения оптических эффектов. Введение этих компонентов может уменьшать рабочий интервал существования мезофазы.

Малыми временами отклика и возможностью обеспечивать широкий диапазон шкалы серого обладают антисегнетоэлектрические ЖК (AFLC) [115]. В 1988 г. были созданы AFLC материалы с беспороговым управлением, имеющие плавную вольт-контрастную характеристику без гистерезиса. Это дало толчок развитию материалов с бананоподобными молекулами V-образной формы и короткими временами переключения. В 2002 г. хиральные смектики впервые нашли коммерческое применение в дисплее цифровой фотокамеры [116].

### *1.3.3. ЖКМ для регистрирующих сред*

#### *Материалы для термоиндикации*

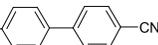
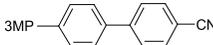
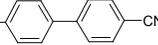
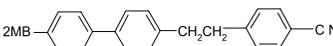
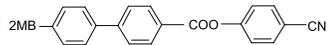
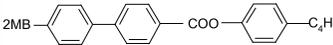
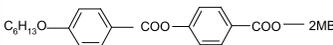
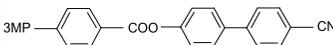
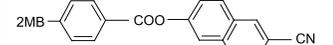
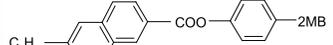
Термоиндикация является основной областью применения ХЖК. Большинство используемых ХЖК являются производными стероидов и, в первую очередь, холестерина. Наиболее полно мезоморфные свойства холестерических мезогенов представлены в таблицах [117]. Такие свойства ХЖК как селективное рассеяние, круговой дихроизм, реверсивная оптическая активность позволяют регистрировать изменение температуры, УФ и СВЧ излучения, механический сдвиг, воздействия давления, электрического и магнитного полей. Благодаря высокой чувствительности к температуре ХЖК широко применяются в термографии [118, 119]. Они должны быть стабильны во времени, расцветаться как при нагревании, так и при охлаждении, не кристаллизоваться при рабочих температурах и не обладать термическим гистерезисом. Чаще всего применяются эфиры холестерина: нонаноат, пропионат, олеат, бензоат, циннамоат и др., а также их смеси. Для некоторых из них, таких как нонаноат, олеат, бензоат длина волны селективно рассеянного света не зависит от скорости и числа циклов нагрева, и они не обладают термическим гистерезисом. При смешивании холестерилнонаноата с холестерилолеилкарбонатом или холестерил-эруцилкарбонатом можно получать термоиндикаторные смеси с высокой температурной чувствительностью. Эти смеси в узком интервале температур изменяют цвет от красного до фиолетового. Введение в бинарную систему третьего компонента позволяет варьировать температурный диапазон смеси в значительных пределах: холестерилхлорид расширяет температурный интервал смеси, а добавка холестерилундецилата, наоборот, сужает.

На основе эфиров холестерина можно составить ЖКМ с различной температурной чувствительностью в интервале от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ . При температуре выше  $100^{\circ}\text{C}$  применяются смеси на основе замещенных бензоатов холестерина, холестерилпальмитата, смесей с добавками алкоксибензойных кислот, холестерилциннамоата. Цвет смеси, состоящей из холестерилиодида и холестерилнонаноата (1:1) сдвигается в синюю область. При механических воздействиях на слой ХЖК наблюдались смещения цветов в синюю и в красную область спектра. Применение производных холестерина ограничивает невысокая химическая и термическая стабильность. Поэтому усилия разработчиков были направлены на синтез и изучение хиральных мезоморфных веществ, молеку-

лярная структура которых не содержит стероидных колец. Хиральность достигается благодаря концевой алкильной цепи, содержащей асимметричный центр [120]. Свойства ряда хиральных мезогенов, разработанных в начале 80-х годов, приведены в табл. 1.4 [121].

Таблица 1.4

**Свойства ХЖК**

Структура ХЖК	Температура перехода °С			Шаг спирали (мкм)
	К- СЖК	СЖК-ХЖК	ХЖК-ИЖ	
2MB-  -CN	4	-54	-30	0,2
3MP-  -CN	9	-22	-14	0,3
2MB-O-  -CN	53,5	—	9	1,5*
2MB-  -C N	91,7	—	103,4	1,5**
2MB-  -CN	99,5	—	195	1,6**
2MB-  -C <sub>6</sub> H <sub>5</sub>	65,6	—	127	0,2
C <sub>6</sub> H <sub>13</sub> O-  -2MB	43	—	53	5†
3MP-  -CN	77,6	138	190,4	4,7**
2MB-  -CN	75	—	106,6	0,2
C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> -  -2MB	52	—	68,8	0,23

Обозначения: 2MB — S-2-метилбутил, 3MP — S-3-метилпентил; \* — для виртуальной холестерической фазы, полученной экстраполяцией значений шага спирали для растворов в нематике; \*\* — шаг спирали для 10 % раствора в 4-п-пентил-4'-цианобифениле; † — шаг спирали для 10 % раствора в «Merck Phase V».

Производные холестерина используют в ряде хиральных нематиков с различными свойствами, пригодными для применения в дефектоскопии. Смесь НЖК и ХЖК также образует холестерическую структуру. Интерес к ХЖК объясняется не только возможностями их использования в термографии, но и обнаруженными электрооптическими эффектами: динамическим светорассеянием с памятью и холестерико-нематическим фазовым переходом. Попытки применения эфиров холестерина выявили их недостаточную химическую и электрохимическую стабильность по сравнению с НЖК. Поэтому основным направлением изготовления материалов стало создание хиральных нематиков, в которых хиральность обеспечивалась мезогенными или немезогенными добавками [122]. Индуцированная хиральность в НЖК описана в [123]. При изучении хиральных материалов важно установление связи между структурой и величиной шага холестерической спирали, а также с ее температурной зависимостью. Известно, что в хиральных нематических смесях с малой концентрацией оптически активной добавки зависимость обратной величины шага от концентрации  $S$  линейная:  $1/p = A \cdot C$ , где  $A$  — спиральная закручивающая способность. Зависимости  $A$  от структуры оптически активной добавки приведены в [122].

С увеличением длины цепи величина  $A$  возрастает. В хиральных нематиках обычно наблюдается линейная зависимость  $A = 1/p \cdot 100$ .

ХЖК также используются в качестве добавки к нематическим материалам для дисплеев и модуляторов, работающих на твист- и супертвист-эффектах.

Для увеличения долговечности и повышения стабильности термодинамических индикаторов, а также для удобства их эксплуатации используют композиции — ХЖК, заключенные в полимерную матрицу.

#### *Светуправляемые жидкокристаллические материалы*

Светуправляемые материалы в основном представляют собой ЖК полимеры и их смеси с низкомолекулярными хиральными и фотохромными добавками (рис. 1.8) [124]. Они относятся к акриловому или метакриловому ряду. Боковые группы с основной цепью соединены гибким спейсером алифатического или оксиалифатического типа длиной от 5 до 11 углеродных атомов.

Первая группа представляет собой бинарные сополимеры с нематогенными или смектогенными фрагментами, а также с азобензолсодержащими фотохромными группами (рис. 1.8, *a*). Строение фотохромных групп может варьироваться включением полярных (CN, атомы галогенов) или неполярных групп ( $\text{CH}_3$  и т. д.) в различных

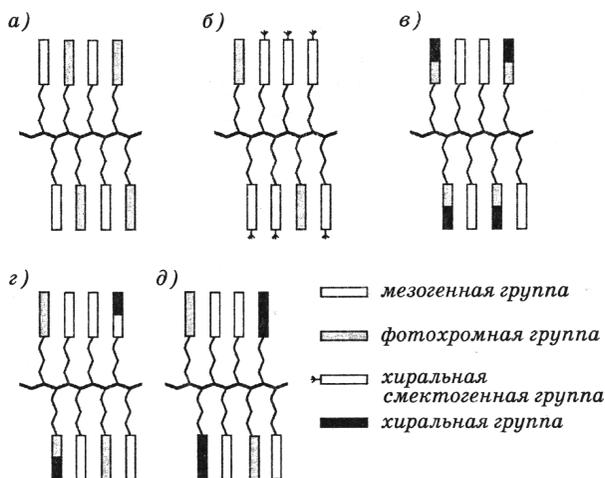
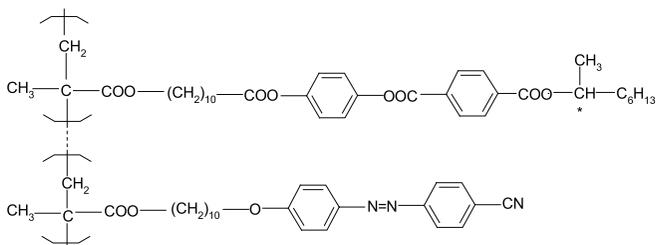


Рис. 1.8. Молекулярные структуры различных типов светуправляемых гребнеобразных полимеров

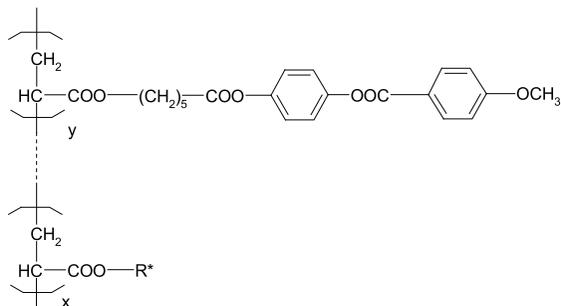
положениях бензольных ядер. Некоторые азосодержащие сополимеры могут быть или аморфными материалами или находиться в переохлажденном состоянии, образуя аморфизированные пленки. Оптическое поведение таких пленок отличается от свойств ЖК пленок.

Вторая группа содержит фотохромные ЖК-полимеры с макромолекулами, состоящими из хиральных смектогенных и фотохромных мономерных азобензолсодержащих звеньев. Эти фоточувствительные бинарные сополимеры образуют хиральную слабоупорядоченную фазу в сочетании со смектическим порядком в расположении мезогенных групп (рис. 1.8,б). Примером могут служить сополимеры типа



При содержании фотохромных звеньев от 8 до 28 мол.% они образуют хиральный смектик А с фазовыми переходами; при этом вещество переходит из прозрачного состояния в рассеивающее.

Третья группа представлена хиральными ЖК-сополимерами с нематогенными и хирально-фотохромными звеньями (рис.1.8в):



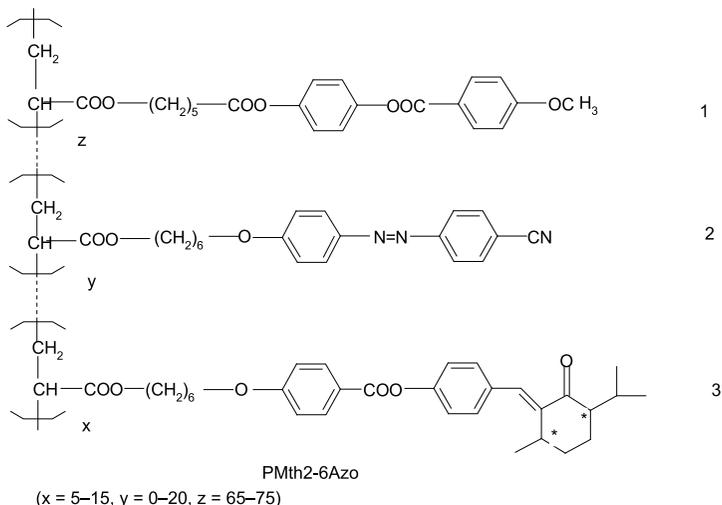
Примеры радикалов R\* приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

R*	m	n	Обозначение сополимеров
	0	6	PMth1-6X
	0	10	PMth1-10X
	1	6	PMth2-6X
	2	10	PMth3-10X
	0	—	CM2X
	1	—	CM3X
	—	—	PAzo

Здесь нематогенные группы для всех серий сополимеров одинаковы, а строение хирально-фотохромных групп варьируются в широких пределах. Четвертая и пятая группы содержат тройные хирально-фотохромные сополимеры, состоящие из нематогенных фотохромных и хирально-фотохромных звеньев (рис. 1.8, з) или нематогенных, хиральных и фотохромных звеньев (рис. 1.8, д). Примеры сополимеров приводятся ниже. Метоксифенилбензоатные (1) и цианоазобензолные

(2) фрагменты ответственны за формирование нематической мезофазы. Важно, что полосы поглощения азобензольных групп лежат в видимой и УФ области спектра, тогда как полоса поглощения бензилиденментаноловых фрагментов (3) целиком расположена в УФ области. Подбирая состав сополимера и длину волны облучения, можно вызывать либо наведенное двулучепреломление, либо раскрутку холестерической спирали.



Тройные сополимеры, содержащие холестерические и спиропирановые боковые группы, представляют собой фоточувствительные материалы, сочетающие фотохромизм с оптическими свойствами холестерической мезофазы. Возможно их использование для обратимой записи информации на цветном (селективно отражающем свет) фоне [125].

Основная роль в светууправляемом поведении сополимеров принадлежит фотохромным группам, представляющим собой либо мономерные звенья, либо химически связанные группы с хиральным фрагментом в одном мономерном звене. Под воздействием света фотохромные группы изменяют свою конфигурацию и конформацию (например, *транс-цис*-изомеризация азобензольных фрагментов) (рис. 1.9). Так, например, стержнеобразные азобензольные группы, имеющие *транс*-конфигурацию, трансформируются в *цис*-изомеры по схеме:

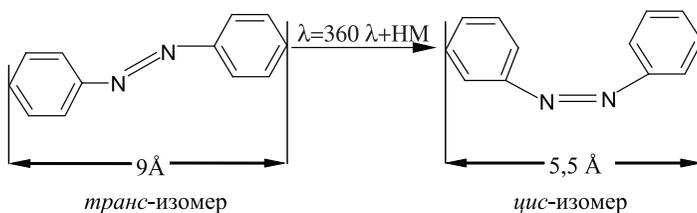


Рис. 1.9. Переход *транс*-изомера в *цис*-изомер под действием УФ излучения

Изменение формы фотохромных молекул нарушает локальную упаковку соседних мезогенных групп, вызывая локальное изменение оптических параметров среды и, следовательно, регистрацию оптического излучения. Возможность локальной фиксации видоизмененной молекулярной структуры полимерной пленки, вызванной воздействием света, открывает перспективы создания материалов со светоуправляемыми характеристиками в реальном времени и с памятью. Так, светоиндуцированная переориентация молекул полимерного ЖК на основе азобензола позволила получить длительно сохраняемые изображения с разрешением около 35 лин/мм [126].

Представляют интерес полимерные ЖК, в которых к основной центральной группе с метиловыми полисилоксановыми звеньями присоединены боковые мезогенные группы  $C^*ЖК$  [127]. Изменяя число и характер боковых групп, присоединенных к основной цепи, можно получать ценные свойства: широкий ряд  $C^*ЖК$  фаз, существующих при температуре ниже комнатной, с величиной спонтанной поляризации до 300 нКл/см<sup>2</sup> и временами переключения порядка 100 мкс вблизи перехода  $C^*ЖК - СЖК$  А. Такие материалы перспективны при создании плоских волноводов и оптических дисков, светопереключаемых триггеров и оптических запоминающих устройств [128, 129].

#### *Материалы для регистрации электрических и магнитных полей*

Общим требованием, предъявляемым к ЖК материалам для увеличения чувствительности при регистрации электрических и магнитных полей, является большая величина оптической анизотропии. Существуют разнообразные задачи по детектированию электрических полей, для которых используются ЖК с широким диапазоном электрических параметров. Так, например, в дефектоско-

пии поверхностей материалов и изделий используют смеси с диэлектрической анизотропией, близкой к нулю. При регистрации слабых электрических полей, напротив, используют смеси с максимальной величиной диэлектрической анизотропии.

Для визуализации магнитных полей на поверхности материалов особый интерес представляют ЖК комплексные соединения. Первое сообщение о них появилось в работе [130]. Было обнаружено сильное двулучепреломление в металломезогенах, термохромизм и дихроизм [131]. Магнитное двулучепреломление ряда комплексов мезогенных лантаноидов описано в работе [132, 133]. Этот класс соединений по чувствительности представляется наиболее перспективным для детектирования магнитных полей контактным способом.

### *1.3.4. Жидкокристаллические композиты*

Основные классы композитов составляют ЖК, диспергированные в полимерной матрице (PDLC) и стабилизированные полимером (PSLC) и суспензиями. ЖК, стабилизированные полимером, называют также жидким кристаллом, стабилизированным полимерной сетью (PNLC) или полимером, диспергированным в ЖК (LCPD). Эти композиты относят к гелям [134].

ЖК, диспергированные в полимере, явились предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований [135–140]. Переключение PDLC из рассеивающего состояния в прозрачное делает их пригодными для использования в дисплеях и проекционных устройствах. Разработаны технологии капсулирования нематических, холестерических ЖК и смектических фаз А и С\*. В PDLC могут вводиться дихроичные красители [141, 142]. Они имеют вытянутую форму и растворяются в ЖК, ориентируясь длинными осями в анизотропной ЖК матрице. Когда плоскость поляризации падающего света параллельна длинной оси молекул красителя, свет поглощается. Поглощение отсутствует, если плоскость поляризации света перпендикулярна длинной оси. В отсутствие внешнего поля ориентация молекул красителя носит случайный характер, определяемый хаотической ориентацией капель. Такая структура поглощает неполяризованный свет. При наложении поля молекулы красителя ориентируются перпендикулярно плоскости поляризации падающего света, и в идеальном случае поглощения не происходит. Структура PDLC с красителями не нуждается в поляризаторах вследствие случайного характера ориентации капель в отсутствие поля,

что является преимуществом по сравнению с дисплеями на нематиках с красителями. PDLC с красителями позволяют получать шкалу серого, поскольку капли плавно переориентируются при увеличении электрического поля, что выгодно отличает их от дисплеев на холестериках с красителями.

К особому классу PDLC относятся хиральные нематики, диспергированные в полимерной матрице. Изготовленные пленки обладают высоким цветовым контрастом в широком интервале температур ( $-20 \div +80$  °C) и повышенным разрешением по сравнению с термоиндикаторами на ХЖК. Они применяются для визуализации распределения температурных полей на поверхностях изучаемых объектов [127].

В последние годы объектом интенсивных исследований стали капсулированные полимером СЖКА\* и С\*ЖК. Поляризующая способность одноосно ориентированных пленок сохраняется в широком температурном диапазоне. Пленки осуществляют эффективную модуляцию излучения, однако в А\* фазе глубина модуляции резко уменьшается с ростом температуры. Материал на основе капсулированных в полимере С\*ЖК оказался пригодным для оптических элементов с временами переключения порядка десятка микросекунд: быстродействующих модуляторов света, дисплеев и устройств управления поляризацией [143].

Модификацией PDLC являются материалы, получаемые фазовым разделением под действием полимеризации, когда создаются ее неоднородные условия [144]. Примером этому может быть полимеризация, инициируемая методами голографии [145]. Смесь ЖК и фото поляризуемого мономера заключают между двумя стеклянными подложками. Для инициирования полимеризации ячейка освещается лазерным лучом с двух сторон. Интерференция лучей создает в толще ячейки распределение интенсивности излучения. В зонах большой интенсивности формируется больше свободных радикалов, что приводит к образованию полимера, а ЖК располагается между возникшими слоями полимера. Так получают чередующиеся слои полимера и ЖК. Оптические характеристики ЖК и полимера выбираются так, что показатель преломления ЖК для обыкновенного луча  $n_o$  был равен показателю преломления полимера  $n_p$ . В отсутствие поля ЖК представляет собой хаотически ориентированную структуру, а структура ячейки имеет периодически изменяющийся показатель преломления. Если лазерный луч падает под углом  $\theta$ , удовлетворяющим условию Брэгга:  $\lambda = 2d \cdot \cos\theta$ , то

он будет испытывать отражение. При наложении поля, направленного перпендикулярно чередующимся слоям, ЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  ориентируется перпендикулярно слоям, показатель преломления ЖК становится равным показателю преломления полимера, и лазерный луч проходит через ячейку, не испытывая отражения. Голографические PDLC можно использовать в отражательных дисплеях.

Стабилизированные полимером ЖКМ (PNLC) получают формированием в слое полимерной сетки [134]. Для этого готовят смесь ЖК с добавкой нескольких процентов мономера (до 10 %) и подвергают ее воздействию УФ излучения. Возникающая в процессе полимеризации сетка фиксирует молекулярную ориентацию, которая существовала в период экспонирования. Нужную ориентацию молекул получают непосредственно в объеме материала воздействием электрического поля или температуры. Объемная ориентация ЖКМ оказывается эффективнее ориентации поверхностью. Можно использовать в качестве мономера мезогенный материал с жесткой центральной группой, подобной структуре ЖК молекул. Формируемые полимерные сети предназначены для улучшения таких характеристик как управляющее напряжение и быстродействие по сравнению с параметрами материалов для твистовых дисплеев. Стабилизированные полимером нематики были использованы в световых затворах.

Особенно широкое применение находят стабилизированные полимером ХЖК, используемые для создания электронных книг, газет и легких дисплеев, дающих яркие изображения при низких напряжениях [147]. Они не обеспечивают градаций серого, но привлекательны из-за малого потребления энергии при работе в бистабильном режиме. Свойства этих ЖКМ зависят от шага холестерической спирали, концентрации полимера и интенсивности УФ облучения. Поскольку шаг спирали находится в ИК диапазоне длин волн, материал оказывается прозрачным для видимого диапазона. При наложении электрического поля ХЖК стремится перейти в конфокальную структуру, в то время как полимер стремится удерживать его в планарной ориентации. В результате образуется полидоменная конфокальная структура, интенсивно рассеивающая свет. В исходном состоянии такой материал имеет высокое светопропускание (более 90 %). Контраст может быть увеличен за счет добавления в материал дихроичных красителей (~5 %). Одним из достижений является синтез  $S^*$ ЖК, стабилизированных полимером и заключенных в эластичные подложки. Такой материал перспекти-

вен для создания гибких и легких дисплеев большого размера с высоким быстродействием.

НЖК стабилизируют суспензиями, содержащими, например, наночастицы кремния или пирогенного кварца [147]. Поскольку объемная плотность таких частиц мала, то удастся получить стабильную дисперсию с содержанием НЖК 97–99 %. Наночастицы кремния образуют агрегаты  $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ , формирующие сеть связью  $\equiv\text{Si}-\text{OH}$  на границе агрегатов. Эта сеть создает полидоменную структуру, интенсивно рассеивающую свет. При наложении поля НЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  ориентируется гомеотропно, и материал становится прозрачным. Водородная связь может преодолеваться механическим воздействием, что вызывает разрушение всей сети. После этого  $\equiv\text{Si}-\text{OH}$  группы перегруппируются, снова возникают водородные связи, образующие новую сеть, но уже задающую гомеотропную ориентацию молекулам НЖК. При выключении поля материал сохраняет гомеотропную ориентацию. Эффект памяти делает этот материал перспективным при разработке проекционных дисплеев и световых затворов.

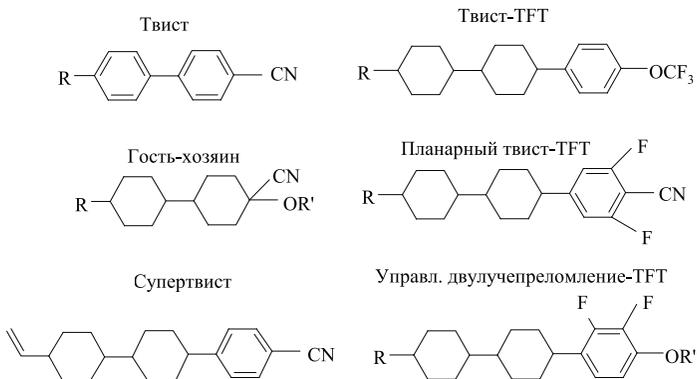
Для создания безынерционных оптических ограничителей излучения, предназначенных для защиты зрения и чувствительных фотоприемников, в последнее время нашли применение примесные немато-хиральные системы, где в качестве поглощающей примеси использовались фуллерен  $\text{C}_{70}$  и фталоцианины [148–150]. С их помощью удалось получить рекордно низкие на сегодняшний день значения порога ограничения, составляющие  $\sim 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>. С этой же целью синтезирован ряд производных дистирилбензолов с высоким нелинейным двухфотонным поглощением, предназначенных для устройств защиты глаз сварщика. Настоящий прорыв в новые применения можно ожидать от использования PDLC с капсулами наноразмера.

К новым ЖК композитам следует отнести жидкие кристаллы, помещенные в стесненные объемы, в планарные фотонные кристаллы и в гели с красителями [151].

Различные типы ЖК (каламитики, дискотики, полимеры, сурфактанты и липиды) включены в уникальную базу данных LiqCryst 4.7. Она содержит информацию о 85000 структурах, извлеченную из более, чем 80000 источников: книг, журналов, патентов, диссертаций и материалов конференций [152]. Для всех соединений приводятся последовательность фазовых переходов и их температуры и более 270 000 физических параметров. Химические структуры даны как в

виде химических формул с указанием колец, мостиковых и терминальных групп, так и в виде атомных связей. В частности приводятся сведения о 30000 нематических соединениях, 12000 хиральных соединениях и 4000 соединений С\*ЖК. Указанная информация позволяет выбрать ЖКМ для решения конкретных задач. Сочетая различные соединения, можно приготовить ЖКМ для различных устройств: от индикаторов наручных часов до экранов персональных компьютеров и телевизоров.

Несмотря на успехи, достигнутые в области синтеза ЖК соединений и создания на их основе разнообразных композиций, практически пригодных смесей не так уж много. Ключевыми соединениями для рабочих смесей, реализующих основные электрооптические эффекты, являются следующие:



По-прежнему актуальной задачей остается разработка ЖКМ, имеющих малую вязкость нематической фазы, высокое значение положительной диэлектрической анизотропии, невысокую температуру образования нематической фазы, широкий температурный интервал существования и хорошую смешиваемость с ЖК соединениями различных классов. Методы синтеза этих соединений должны характеризоваться доступностью исходных реагентов, отсутствием сложных технологических стадий, высоким выходом конечных продуктов.

В заключение следует отметить, что жидкокристаллические материалы стали самостоятельной областью современного материаловедения [152].

## ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 1

1. *Gray G.W.* Molecular structure and the properties of LCs. London: Acad. Press. 1962. 314 p.
2. *Чистяков И.Г.* Жидкие кристаллы. М.: Наука. 1966. 127 с.
3. Liquid crystals and their applications / Ed.: T. Kallard. N.Y.: Optosonic Press. 1970. 219 p.
4. *Brown G.H., Doane J.W., Neff V.D.* A review of the structure and physical properties of LCs. London: Butterworth. 1971. 94 p.
5. *Капустин А.П.* Электрооптические и акустические свойства жидких кристаллов. М.: Наука. 1973. 232 с.
6. Liquid crystals and plastic crystals / Eds.: G.W. Gray, P.A. Winsor. Chichester: Horwood. 1974. Vol. 1. 383 p.; Vol. 2. 314 p.
7. *Meier G., Sackmann H, Grubmaier J.G.* Applications of liquid crystals. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 164 p.
8. *Williams E. L.* Liquid crystals for electronic devices. London: Park Ridge, Noyes Data Corp. 1975. 264 p.
9. International handbook of LC displays / Ed.: M. Tobias. London: Ovum Ltd. 1975. 345 p.
10. *Demus D., Demus H., Zashcke H.* Flüssige Kristalle in Tabellen. Leipzig: Deutscher Verlag Grundstoffind. 1976. 356 S.
11. *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов. М.: Мир. 1977. 400 с.
12. *Панков С.П., Кульчихин В.Г.* Жидкокристаллическое состояние полимеров. М.: Наука. 1977. 240 с.
13. *Demus D., Richter L.* Textures of liquid crystals. Weinheim: Verlag-Chemie, 1978. 228 p.
14. *Капустин А.П.* Экспериментальные исследования жидких кристаллов. М.: Наука. 1978. 368 с.
15. *Блинов Л.М.* Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.; *Blinov L.M.* Structure and properties of liquid crystals. Springer. 2011. P. 439.
16. Advances in Liquid Crystals / Ed.: G.W. Brown. N.Y.: Acad. Press, 1975. Vol. 1. 320 p.; 1976. Vol. 2. 308 p.; 1978. Vol. 3. 278 p.
17. *Капустина О.А.* Акустооптические свойства жидких кристаллов и их применение. Л.: ЦНИИ «Румб». 1979. 196 с.
18. *Чандрасекар С.* Жидкие кристаллы. М.: Мир. 1980. 344 с.
19. *Платэ Н.А., Шибяев В.П.* Гребнеобразные полимеры и жидкие кристаллы. М.: Химия, 1980. 303 с.
20. *Пикин С.А.* Структурные превращения в жидких кристаллах. М.: Наука. 1981. 336 с.
21. *Беляков В.А., Сонин А.С.* Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука. 1982. 360 с.
22. Polymer liquid crystals / Eds.: A. Ciferri, W.R. Krigbaum, R.B. Meyer. N.Y.: Acad. Press. 1982. 383 p.

23. *Базаров И.П., Геворкян Э.В.* Статистическая теория твердых и жидких кристаллов. М.: Изд-во МГУ. 1983. 261 с.
24. *Сонин А.С.* Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука. 1983. 320 с.
25. *Аракелян С.М., Чилингарян Ю.С.* Нелинейная оптика жидких кристаллов. М.: Наука. 1984. 360 с.
26. *Goodby J.W., Gray G.W.* Smectic liquid crystals: Textures and structures. Glasgow: Leonard Hill. 1984. 162 p.
27. Liquid crystals and ordered fluids / Eds.: J.F. Johnson, R.S. Porter. N.Y.: Plenum press. 1970. Vol. 1; 1978. Vol. 3. 549 p.; 1984. Vol. 4. 1157 p.
28. *Капустин А.П., Капустина О.А.* Акустика жидких кристаллов. М.: Наука. 1986. 247 с.
29. *Анисимов М.А.* Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. М.: Наука. 1987. 271 с.
30. *Абдуллин А.З., Безбородов В.С., Минько А.А.* и др. Текстурирование и структурная упорядоченность в ЖК. Минск: Изд-во «Университетское». 1987. 177 с.
31. Жидкокристаллические полимеры / Под ред. Н.А. Платэ. М.: Химия. 1988. 415 с.
32. *Кац Е.И., Лебедев В.В.* Динамика жидких кристаллов. М.: Наука. 1988. 140 с.
33. *Pershan P.S.* Structure of LC phases. Singapore: World Scientific. 1988. 425 p.
34. *Vertogen G., de Jeu W.H.* Thermotropic liquid crystals. Fundamentals. Berlin: Springer-Verlag. 1988. 324 p.
35. Жидкокристаллические полимеры / Под ред. Н.А. Платэ. М.: Химия. 1988. 415 с.
36. *Сонин А.С.* Дорога длиною в век. М.: Наука. 1988. 223 с.
37. *Готра З.Ю., Курик М.В., Микитюк З.М.* Структура жидких кристаллов. Киев: Наукова думка. 1989. 109 с.
38. *Гребенкин М.Ф., Иващенко А.В.* Жидкокристаллические материалы. М.: Химия. 1989. 288 с.
39. Liquid crystals. Application and uses / Ed. B. Bahadur. World Scientific. An International Publisher. Vol. 1-3. 1990-1992.
40. *Chandrasekhar S.* Liquid Crystals, 2 ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press. 1992. 460 p.
41. Modern Topics in Liquid Crystals. From neutron scattering to ferroelectricity / Ed. by Agnes Buka. World Scientific. 1993. 352 p.
42. *Shibaev V.P., Lam L.* Liquid crystalline and mesomorphic polymers. Berlin: Springer-Verlag. 1994. 360 p.
43. *Жаркова Г.М., Сонин А.С.* Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: ВО Наука. 1994. 214 с.
44. *Sonin A.A.* The surface physics of liquid crystals. Amsterdam: Gordon and Breach. 1995. 180 p.
45. *Dzraic P.S.* Liquid crystal dispersions. Toronto: World Scientific. 1995. 448 p.

46. *Crawford G.P., Zumer S.* Liquid crystal in complex geometry. 1996. 584 p.
47. *Kumar S.* Liquid Crystals in the Nineties and Beyond. 1996. 468 p.
48. *De Gennes P.G., Prost J.* The physics of liquid crystals, 2 ed. Oxford: Clarendon Press. 1998. 597 p.
49. The optics of thermotropic liquid crystals / Eds.: S.J. Elston, J.R. Sambles. London: Taylor & Francis, 1998. 375 p.
50. *Collings P.J., Hird M.* Introduction to liquid crystals. Chemistry and physics. London: Taylor & Francis. 1998. 298 p.
51. Handbook of Liquid Crystals / Ed. by D. Demus, J. Goodby, G.W. Gray, H.-W. Spiess and V. Vill. Wiley-VCH Weinheim. 1998. Vol. 1–3.
52. *Аверьянов Е.М.* Эффекты локального поля в оптике жидких кристаллов. Новосибирск: Наука. 1999. 552 с.
53. *Petrov A.G.* The lyotropic state of matter. 1999. 572 p.
54. *Ou-Yang Zhong-can, Liu J-Xing.* Geometric Methods in the Elastic Theory of Membranes in Liquid Crystal Phases. 1999. 244 p.
55. *Cladis P., Palfy-Muhoray P.* Dynamics and defects in liquid crystals. 1999. 480 p.
56. *Lagerwall S.T.* Ferroelectric and antiferroelectric LCs. Wiley-VCH. 1999. 427 p.
57. *Chigrinov V.G.* Liquid crystal devices: physics and applications. Boston: Artech House. 1999. 357 p.
58. *Barbero G., Evangelista L.R.* An elementary Course on the Continuum Theory for NLCs. 2000. 384 p.
59. *Musevic I., Blinc R., Zeks B.* The Physics of Ferroelectric and Antiferroelectric LCs. 2000. 680 p.
60. Physical properties of liquid crystals: Nematics // Ed. by D.A. Dunmur, A. Fukuda, G.R. Luckhurst with foreword by P. Raynes. EMIS Data reviews Series № 25. INSPEC. 2001.
61. Singh Shri. Liquid Crystals. Fundamentals. 2002. 548 p.
62. Dierking I. Textures of liquid crystals. Wiley-VCH. 2003. 220 p.
63. *Haase W., Wrobel S.* Relaxation phenomena. Springer. 2003. 716 p.
64. *Молочко В.А., Пестов С.М.* Фазовые равновесия и термодинамика систем с жидкими кристаллами. М.: ИПЦ МИТХТ. 2003. 242 с.
65. *Rasing T., Musevich I.* Surfaces and interfaces of liquid crystals. Springer. 2004. 410 p.
66. *Stewart I.* The static and dynamic continuum theory of LCs. A mathematical introduction. Taylor & Francis. 2004. 272 p.
67. *Fisch M.R.* Liquid Crystals, Laptops and Life. World Scientific Series in Contemporary Chemical Physics. 2004. Vol. 23. 376 p.
68. Жидкие кристаллы: дискотические мезогены / Н.В. Усольцева, О.Б. Аكوпова, В.В. Быкова, А.И. Смирнова, С.А. Пикин; под ред. Н.В. Усольцевой. Иваново: Иван. гос. ун-т. 2004. 546 с.

69. *Slukin T., Stegmayer H., Dunmur D.* Crystals that flow. Collected papers from the history of liquid crystals. Liquid crystal series. 2004. 512 p.
70. *Xin-Jiu Wang, Qi-Feng Zhou.* Liquid crystalline Polymers. 2004. 388 p.
71. *Томлин М.Г., Пестов С.М.* Свойства жидкокристаллических материалов. Изд. Политехника. СПб. 2005. 296 с.
72. *Oswald P., Pieranski P.* Nematic and cholesteric liquid crystals. Concept and physical properties illustrated by experiments. 2005. 600 p.
73. *Nastishin Yu.A., Liu H., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D.* and Kostko A., Anisimov M. Pretransitional Fluctuations in the Isotropic Phase of a Lyotropic Chromonic Liquid Crystal. *Phys. Rev.* 2004. E 70. P.051706.
74. *Friedel G.* Les etats mesomorphes de la matiere // *Ann. Physique.* 1922. Vol.18. P.273-474.
75. *Demus D.* One century liquid crystal chemistry: from Vorlander's rods to disks, stars and dendrites // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2001. Vol. 364. P. 25–91.
76. *Demus D.* Eigenschaften, Theorien und Molekuelbau fluessiger Kristalle // *Z. Chem.* 1975. Bd. 15. № 1. S. 1–13.
77. *Baron M.* Definition of basic terms relating to low-molecular-mass and polymer LCs // *Pure Appl. Chem.* 2001. Vol.73. №5. P. 845–895.
78. *Richter L., Demus D., Sackmann H.* On the relation between the smectic phase types B, E and G // *J. Phys. (Paris).* 1976. Vol. 37. C-3. P. 41–49.
79. *Sackmann H., Demus D.* Polymorphism in liquid crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1973. Vol. 21. P. 239.
80. *Binnemans K., Gorller-Walrand Ch.* Lanthanide-containing LCs and surfactants // *Chem. Rev.* 2002. Vol. 102. P.2303-2345.
81. *Chandrasekhar S., Sadashiva B.K., Suresh K.A.* // *Pramana.* 1977. № 9. P. 471–480.
82. *Kumar S., Varshney S.K.* A room-temperature discotic nematic liquid crystal // *Agnew. Chem. Int. Ed.* 2000. Vol. 39. № 17. P. 3140–3142.
83. *Kumar S., Rao D.S.S., Prasad S.K.* New branched chain tricycloquinazoline derivatives: a room temperature electron deficient discotic system // *J. Mater. Chem.* 1999. № 9. P. 2751–2754.
84. *Kumar S.* Discotic liquid crystals for solar cells // *Current science.* 2002. Vol. 82. № 3. P. 256–257.
85. *Семенов А.Н., Хохлов А.П.* Статистическая физика ЖК полимеров // *Успехи физ. наук.* 1988. Т. 156. С. 417–476.
86. *Polymers as electrooptical and photooptical active media / Ed.: V.P. Shibaev.* Berlin: Springer-Verlag. 1996.
87. *Kreuzer M., Eidenschink R.* Filled nematics / In: *Liquid crystals in complex geometries formed by polymer and porous network / Eds.: G. P. Crawford, S. Zumer.* London: Taylor & Francis. 1996. 584 p.
88. *Aliev F.M., Sinha G.P., Kreuzer M.* Dynamics of molecular and collective modes in filled nematics // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2001. Vol. 359. P. 217–230.

89. *Bellini T., Buscaglia M., Chicolli C.* e.a. Nematics with quenched disorder: What is left when long range order is disrupted? // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85. P. 1008–1011.
90. *Kaznacheev A.V., Sonin A.S.* Elastic constants of the inorganic lyotropic nematics in  $V_2O_5$ -water system // Abstr. of the XIV Conference on LC (Chemistry, Physics and Applications). Zakopane. Poland. 2001. B11.
91. *Palfy-Muhoray P., Fontana J., Neal J. Taheri B.* Nanoparticle LCs as negative index materials. Book of Abstracts 12-th ITM on Optics of LCs. 2007. Puebla City. Mexico. P. 20.
92. *Haase W., Podgornov F., Suvorova A.* Physical properties of FLC/SWCNT and FLC/TiO<sub>2</sub> nanocomposites: comparative analysis. Book of Abstracts 12-th ITM on Optics of LCs. 2007. Puebla City. Mexico. P. 42.
93. *Reznikov Yu., Buchnev O., Kaczmarek M., Nadhakumar I.* Ferroelectric nanoparticles in low refractive index LCs as high performance optical materials. Book of Abstracts 12-th ITM on Optics of LCs. 2007. Puebla City. Mexico. P.43.
94. *Glushchenko A., Evans D., Reznikov Yu., West J.* Stressed LCs / Ferroelectric nanoparticles composites. Book of Abstracts 12-th ITM on Optics of LCs. 2007. Puebla City. Mexico. P. 44.
95. Liquid crystalline functional assemblies and their supermolecular structures / Ed. Takashi Kato. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2008. 243 p.
96. *Vill V.* Liquid crystals / Landolt-Boernstein. N.S. Vol. IV/7 a-f. Springer: Berlin. 1992–1995.
97. *Goodby J.W., Gray G.W.* Guide to the nomenclature and classification of liquid crystals / In: Handbook of liquid crystals. / Eds.: D. Demus et al. Weinheim: Wiley-VCH. 1998. Vol. 1. P. 17–23.
98. *Адоменас П.* Современные тенденции в химии нематических ЖК // Успехи химии. 1997. Т. 46. № 4. С. 753–781.
99. *Tschierske C.* Liquid crystal engineering — new complex mesophases structures and their relations to polymer morphologies, nanoscale patterning and crystal engineering // *Chem. Soc. Rev.* 2007. Vol. 36. P. 1930–1970.
100. *Молочко В.А., Болотин Б.М., Курдюмов Г.М.* Метод низкотемпературного ДТА в приложении к исследованию жидкокристаллических систем. / В кн.: Жидкие кристаллы и их практическое применение. Иваново: Ив.ГУ. 1976. С. 111–118.
101. *Denat A., Gosse B., Gosse J.P.* Chemical and electrochemical stability of p-methoxybenzylidene-p-n-butylaniline // *Chem. Phys. Lett.* 1973. Vol. 18. № 2. P. 235–239.
102. *Горина И.И.* Очистка и стабилизация ЖК для практического использования // *ЖВХО.* 1983. Т. 28. № 2. С. 223–228.
103. *Margerum J.D., Jensen J.E., Lackner A.M.* Effect of molecular length on nematic mixtures. I. // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1981. Vol. 68. P. 137–156
104. *Gray G.W., Harrison K.J., Nash J.A.* New family of NLCs for displays // *Electron. Lett.* 1973. Vol. 9. P. 130–131.

105. *Eidenschink R., Krause J., Pohl L., Eichler J.* Nematics derived from cyclohexane systems // Liquid crystals. Proc. ILCC. / ed.: S. Chandrasekhar. Bangalore. 1980. P. 515.
106. *Deuther H.-J., Kuschel F., König S.* et al. Kristallin-fluessige trans-4-n-alkylcyclohexanecarbonsauer-4-cyanophenyl-ester // Z. Chem. 1977. Bd. 17. № 1. S. 64–73.
107. *Павлюченко А.И., Смирнова Н.И., Ковшев Е.И., Титов В.В.* Синтез 5-алкил-2-(дианофенил)пиридинов // Журн. орг. химии. 1986. Т. 22. Вып. 5. С. 1065-1069.
108. *Koden M.* Liquid crystal materials for flat panel displays // Information Display. 1998. Vol. 1. P. 12–15.
109. *Wu S.-T.* Liquid crystal materials for display applications // Proc. ASID'00. Xi'an. P.R. China. 2000. P. 78–98.
110. *Naemura S.* Advanced liquid crystalline materials for modern displays // Proc. ASID'00. Xi'an. P.R. China. 2000. P. 101–104.
111. *Nagashima Y., Aoki Y., Nohira H.* Synthesis and properties of ferroelectric liquid crystals with fluorinated asymmetric frame // 6-th Int. Conf. Ferroelectric Liq. Cryst.: Conf. Summaries. Brest. 1997. P. 180–181.
112. *Hird M.* Fluorinated liquid crystals — properties and applications // Chem. Soc. Rev. 2007. Vol.36. P. 2070–2095.
113. *Kirsch P., Bremer M.* Nematische flussigkristalle für AMD: design und synthese // Angew. Chem. 2000. Vol. 112. P. 4384–4405.
114. *Huang X., Li J.* Thresholdless electrooptic effect in antiferroelectric and twisted ferroelectric liquid crystals // Proc. ASID'2000. Workshop. Xi'an. P.R.China. 2000. P. 99-138.
115. *Miyaci K., Fukuda F.* Antiferroelectric liquid crystals / In: Handbook of liquid crystals. — Weinheim: Wiley-VCH, 1998. Vol. 2B.
116. *O'Donnell P., Doi A.* Microdisplays in digital cameras // Information Displays. 2001. Vol. 17. № 12. P. 16-19.
117. *Serrano J.L.* Molecular materials: Synthesis and design. An overview // VI Int. Conf. Ferroelectric Liq. Cryst.: Conf. Summaries. Brest. 1997. P. 90–91.
118. Холестерические жидкие кристаллы: Сб. научн. тр. / Под ред. Г.М. Жарковой. Новосибирск: СО АН СССР. ИТПМ. 1976. 100 с.
119. Свойства и применение жидкокристаллических термоиндикаторов / Сб. науч. тр. под ред. Г.М. Жарковой. Новосибирск: СО АН СССР. ИТПМ. 1980. 99 с.
120. *Тищенко В.Г., Черкашина Р.М., Лисецкий Л.Н.* и др. Холестерические ЖК: получение, исследование, применение // Обзорн. инф. Сер. Монокристаллы и особо чистые вещества. М.: НИИТЭХИМ. 1980. 67 с.
121. Chirality in liquid crystals / Eds.: C. Bahr, H.-S. Kitzerow. N.Y.: Springer. 2001.
122. *Chilaya G.* Induction of chirality in nematic phases. // Rev. Phys. Appl. 1981. Vol. 16. P. 193–208.

123. *Finkelmann H., Stegemeyer H.* // *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 1975. Vol. 78. P. 869.
124. *Шибачев В.П., Бобровский А.Ю., Бойко Н.И.* Светоуправляемые многофункциональные ЖК полимеры // *Высокомолекулярные соединения. Сер. С.* 2000. Т. 42. № 12. С. 2205–2234.
125. *Polymers as electrooptical and photooptical active media* / Ed.: V.P. Shibaev. Berlin: Springer-Verlag. 1996.
126. *Wang C., Fei H., Xia J* et al. Optically controlled image storage in azobenzene liquid-crystalline polymer films // *Appl. Phys. B.* 1999. Vol. 68. P. 1117–1120.
127. *Klosowich S.J., Aleksander M., Czuprynski K.L.* New PDLC systems for sensing applications / *Abstracts of XI Intern. Symp. Adv. Display Techn.* 2002. Crimea. Ukraine. P. 47.
128. *Side chain liquid crystal polymers* / Ed.: C.B. McArdle. London: Blackie. 1989.
129. *Applied photochromic polymer systems* / Ed.: C.B. McArdle. Glasgow: Blackie. 1992.
130. *Giroud A.M., Mueller-Westerhoff U.T.* Mesomorphic transition metal complexes // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1977. Vol. 41. P. 11–13.
131. *Bruce D.W., Dunmur D.A., Maitlis M.P.* et al. High birefringence materials using metal-containing LCs // *J. Mater. Chem.* 1991. Vol. 1. P. 255–258.
132. *Galyametdinov Yu., Ivanova G., Ovchinnikov I.* et al. X-ray and magnetic birefringence studies of some lanthanide metallomesogenes with Schiff base ligands // *Liq. Cryst.* 1996. Vol. 20. № 6. P. 831–833.
133. *Selivanova N., Lobkov V., Osipova V.* et al. Lyotropic mesomorphism and luminescence of the lanthanide containing systems on the base of nonionic surfactants // *Book of abstracts. 8-th ECLC. Sesto. Italy.* 2005. P. 97.
134. *Сонин А.С., Чурочкина Н.А.* Жидкие кристаллы, стабилизированные полимерной сетью // *Высокомол. соединения.* 2010. Т. 52. № 5. С. 739–760.
135. *Ferguson J.L.* Polymer encapsulated NLCs for display and light control applications // *SID Digest.* 1985. Vol. 16. P. 68–70.
136. *Doane J.W., Vaz N., Wu B.-G., Zummer S.* // *Appl. Phys. Lett.* 1986. Vol. 48. P. 269.
137. *Doane J.W.* Polymer dispersed liquid crystals: boojums at work // *NMR Bull.* 1991. Vol. 16. P. 22–28.
138. *Lin H., Ding H., Kelly J.R.* The mechanism of switching a PDLC film // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1995. Vol. 262. P. 99.
139. *Margerum J.D., Lackner A.M., Erdman J.H.* et al. Addressing factors for polymer dispersed liquid crystal displays // *SPIE Proc.* 1988. Vol. 1455. P. 27.
140. *Doane J.W., Golemme A., West J.L.* et al. Polymer dispersed liquid crystals for display application // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1988. Vol. 165. P. 511–532.
141. *Nolan P., Tillin M., Coates D.* High on-state clarity polymer dispersed liquid crystals films // *Liq. Cryst.* 1993. Vol. 14. № 2. P. 339–344.
142. *Drzaic P.S.* Nematic droplet/polymer films for high-contrast colored reflective displays // *Display.* 1991. P. 2–13.

143. Zyryanov V.Ya., Pozhidaev E.P., Smorgon S.L. et al. Light modulation characteristics of single-polarizer PDFLC cell // *Ferroelectrics*. 2000. Vol. 243. P. 179–188.

144. Zyryanov V.Ya., Pozhidaev E.P., Smorgon S.L. et al. Light modulation characteristics of single-polarizer electrooptical cell based on polymer dispersed FLCs // *Liq. Cryst.* 2001. Vol. 28. № 5. P. 741–748.

145. Bunning T.J., Natarajan L.V., Tondiglia V.P. et al. Holographic polymer-dispersed liquid crystal (H-PDLC) // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 2000. Vol. 30. P. 83.

146. Hikmet R.A.M. Anisotropic gels and plastized networks formed by liquid crystal molecules // *Liq. Cryst.* 1991. Vol. 9. P. 405.

147. Bunning T.J., Natarajan L.V., Tondiglia V.P. et al. Ordered nanoscale polymer LC composites // *Book of Abstracts of 19 ILCC'2002*. Edinburgh. 2002. P. 43.

148. Данилов В.В., Калинин А.Г., Каманина Н.В., Тульский С.А. Эффект оптического ограничения в системе ХЖК-фуллерен // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24. № 9. С. 66–68.

149. Gryaznova M.V., Danilov V.V., Kamanina N.V., Smirnova V.A., Fedorov S.V. Borrmann cells as optical switches // *Opt. and Spectr.* 1998. Vol.86. № 6. P. 938–941.

150. Deschenaux R. Liquid-crystalline fullerenes: design, synthesis, and properties // *Book of Abstr. 19-th ILCC 2002*. Edinburgh. 2002. I–16.

151. New developments in LCs / Ed.: Georgey V. Tkachenko. Olajnica 19/2, 32000 Vankovar. Croatia. 2009. P. 234.

152. Vill V. Conception and realization of a liquid crystal database *LiqCryst // LC Today*. 1995. Vol. 5, № 3. P. 6–7.

153. Kelly S. *Materials science of liquid crystals*. Taylor & Francis. 2003. 387 p.

## Глава 2

### ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Главной особенностью жидких кристаллов является анизотропия их физических свойств, объясняемая анизометрией формы молекул. Важнейшими характеристиками ЖК является упорядоченность, температурный интервал существования мезофазы, величина оптической, электрической, магнитной анизотропии, вязкость, упругость, теплопроводность и параметры поверхностного натяжения [1–6]. Помимо совершенствования экспериментальных методов их измерения, достижением последних десятилетий является развитие расчетных квантово-механических методов определения этих параметров, основанных на сведениях только о структуре ЖКМ. Для описания НЖК и ХЖК эти методы развиты в достаточной степени; для СЖК работа над ними еще не завершена. Поскольку от упорядоченности зависят физические свойства ЖК и их анизотропия, начнем изложение с анализа этого параметра.

#### 2.1. Степень ориентационного порядка

Ориентационный порядок определяется силами межмолекулярного взаимодействия, которые противодействуют температурным флуктуациям. Вследствие теплового движения длинная ось молекулы отклонена от направления директора на угол  $\xi$ , ориентационные флуктуации схематически показаны на рис. 2.1. Молекулу ЖК можно характеризовать тремя главными осями  $(i, j, k)$ , направления которых относительно прямоугольной системы координат определяются углами  $(\xi, \eta, \zeta)$ . Для аксиально-асимметричных моле-

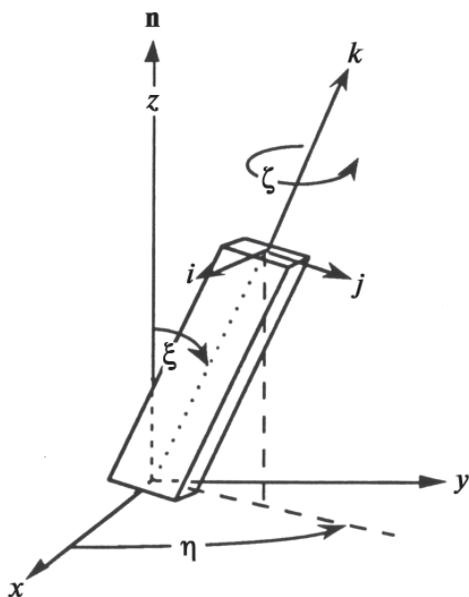


Рис. 2.1. Тепловые флуктуации молекулы ЖК

кул ориентационный порядок характеризуется двумя параметрами  $S$  и  $D$  [7]. Они определяют степень ориентационного порядка соответственно длинных и коротких осей относительно направления директора:

$$S = 1/2 \langle 3 \cos^2 \xi - 1 \rangle \quad (2.1)$$

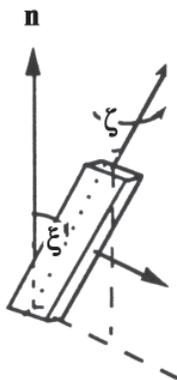
$$D = 3/2 \langle \sin^2 \xi \cos(2\zeta) \rangle, \quad (2.2)$$

где косые скобки означают усреднение по всему ансамблю. Параметр  $S$  описывает среднее отклонение длинной молекулярной оси относительно директора  $\mathbf{n}$ , а  $D$  – среднее отклонение проекции короткой оси на направление директора (рис. 2.2а и 2.2б). Для одноосных молекул НЖК и СЖК А направления  $\eta$  равновероятны, поскольку эти фазы имеют цилиндрическую симметрию. Затруднения во вращении молекул относительно длинных осей не ведет к возникновению двуосности, даже если  $D$  не равно нулю.

В изотропной фазе ориентационный порядок не существует, и параметры  $S$  и  $D$  равны нулю. При идеальной упорядоченности

а) Флуктуация длинной оси

б) Флуктуация короткой оси



$$S = 1/2 \langle 3 \cos^2 \xi - 1 \rangle$$

$$D = 3/2 \langle \sin^2 \xi \cos(2\xi) \rangle$$

Рис. 2.2. Параметры, описывающие ориентационный порядок длинной оси (а) и короткой оси (б) относительно директора.

длинная ось молекулы совпадает с направлением директора, и  $S = 1$ , а  $D = 0$ . Описание температурной зависимости параметра порядка  $S = f(T)$  для нематиков дает теория Майера-Заупе [8]. Она предсказывает фазовый переход первого рода из изотропной фазы в нематическую со значением  $S = 0,43$  сразу ниже температуры  $T_{пр}$ . В действительности наблюдается слабый переход первого рода, сопровождаемый растянутыми предпереходными явлениями. Тем не менее, наиболее характерной величиной при этом является  $S = 0,3-0,4$ . Теория Майера-Заупе не учитывает роли параметра  $D$ , хотя он оказывает некоторое влияние на главные показатели преломления и магнитную восприимчивость.

Параметр порядка для слоев СЖК А описан в [9] в форме амплитуды плотности волнового вектора, параллельного директору:

$$y = \langle \cos(n \cdot q) \cdot (3/2 \cos^2 \xi - 1/2) \rangle, \quad (2.3)$$

где  $q$  — плотность волнового вектора с амплитудой  $2\pi/d_A$ .

Часто расстояние между слоями  $d_A$  меньше средней длины молекулы  $l_0$  из-за температурной флуктуации молекул:

$$d_A = l_0 \cos \langle \xi \rangle \quad (2.4)$$

Характерная величина параметра порядка СЖК А ( $S = 0,8$ ) дает  $\langle \xi \rangle = 20^\circ$ , что совпадает с данными рентгеновских исследований. Модель Макмиллана учитывает связь между длиной алкильной цепи и существованием фазы А, наблюдаемую экспериментально, и предсказывает, что переход от нематической к смектической фазе может быть как первого, так и второго рода. Однако, поскольку она не учитывает вклад дипольного момента, то не предсказывает возможности образования двухслойных смектических фаз ( $d_A > l_0$ ), характерных для материалов с концевыми CN-группами.

Молекулы СЖК С наклонены к слоям и обладают двуосностью (рис. 2.3).

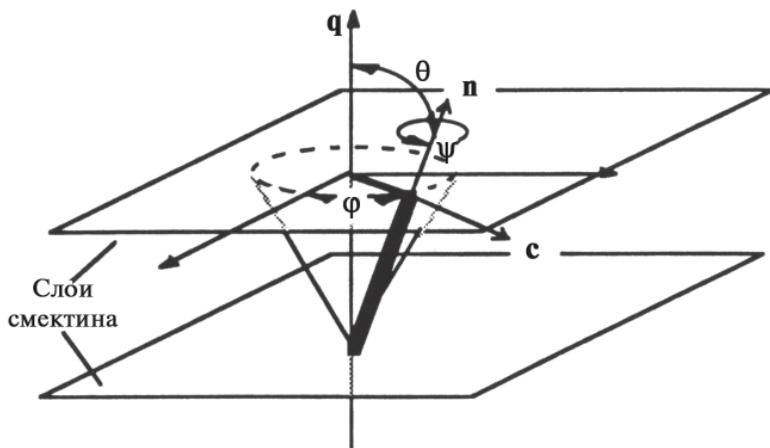


Рис. 2.3. Ориентация директора в СЖК С

Директор  $\mathbf{n}$  наклонен по отношению к нормали к слоям  $q$  на угол  $\theta$ . Директор  $\mathbf{c}$  определяется как единичный вектор, параллельный проекции  $\mathbf{n}$  на слой смектика и ориентированный короткой осью в плоскости слоя относительно выбранных координат азимутальным углом  $\phi$ . Из двуосности молекулы следуют два строго определенных направления, характеризующих фазу С: нормаль к слою  $q$  и ось симметрии  $\mathbf{c}_2$ , перпендикулярная к плоскости наклона. Тогда для характеристики параметра порядка молекул СЖК С требуется использовать два параметра  $P$  и  $C$ , описывающих ориентацию длинной и коротких осей относительно  $\mathbf{c}_2$ :

$$P = 3/2 \langle \sin^2 \xi \cos(2 \eta) \rangle, \quad (2.5)$$

$$C = \langle 1/2(1 + \cos^2\xi) \cos 2\zeta \cdot \cos 2\eta - \cos\xi \cdot \sin 2\zeta \cdot \sin\eta \rangle \quad (2.6)$$

Эти ориентационные параметры описывают анизотропные флуктуации длинной молекулярной оси и положения короткой оси (рис. 2.4).

а) анизотропные флуктуации

б) положения короткой молекулярной оси относительно  $\mathbf{c}_2$

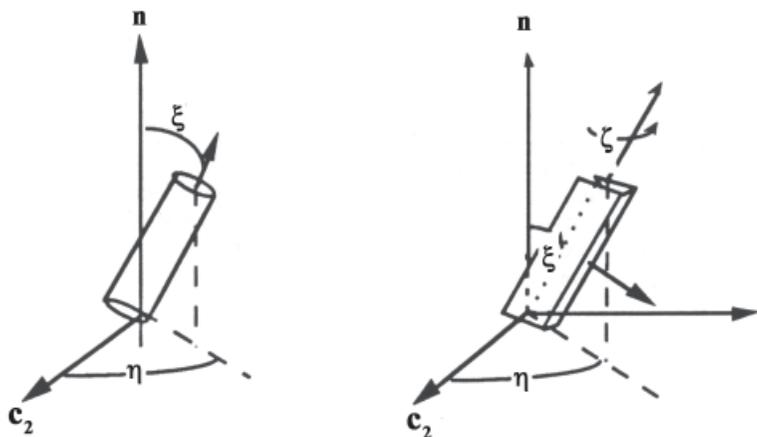


Рис. 2.4. Двусные ориентационные параметры, характеризующие положения длинной оси (а) и короткой оси (б) относительно директора  $\mathbf{c}_2$

Неравенство  $P$  и  $C$  нулю приводит к возникновению двуосности. Для параметра  $P$  макроскопическая двуосность может наблюдаться при цилиндрической симметрии молекул, когда длинные оси скорее параллельны, чем перпендикулярны оси  $\mathbf{c}_2$ . Двусный параметр порядка  $C$  характеризует степень заторможенности при вращении относительно длинной молекулярной оси. Более простой параметр, характеризующий заторможенность вращения относительно директора, имеет вид:

$$\Omega = \langle \cos 2\psi \rangle, \quad (2.7)$$

где  $\psi$  — ориентация относительно директора.

Это равносильно идеальному нематическому порядку длинной молекулярной оси ( $S = 1$ ,  $D = 0$ ), что равнозначно случаю  $P = 0$ ,  $C = \langle \cos 2\psi \rangle$ ,  $\zeta = \psi$ , поскольку длинная молекулярная ось и директор совпадают. Этот параметр порядка называют биполярным для обо-

значения  $\psi = 0$  и одинаковой вероятности  $\psi = \pm\pi$ . До настоящего времени не разработано модели, объясняющей механизм наклонной ориентации директора. Стерические взаимодействия молекул с зигзагообразной формой были учтены при формировании СЖК С [10]. Оптимальная упаковка молекул возникает при ориентации длинных и коротких осей, что автоматически приводит к наклонной ориентации директора, причем  $\Omega$  составила величину порядка 0,1. Температурная зависимость расстояния между слоями  $d_C$  для фазы С имеет вид:

$$d_C(T) = d_A \cos\theta^x(T), \quad (2.8)$$

где  $\theta^x$  – средний угол наклона молекул к нормали слоя.

Толщины слоев в СЖК А и С легко определяются рентгеновскими методами при изучении неориентированных слоев. Значения  $\theta^x$  находят по угловому расхождению рентгеновских лучей, исходя из их дифракции на ориентированных образцах. При этом существуют различия в определении  $\theta^x$  рентгеновскими и  $\theta^o$  оптическими методами: всегда  $\theta^x < \theta^o$ . Это позволило заменить жесткую модель строения молекул, представленную на рис. 2.5а, зигзагообразной моделью (рис. 2.5б), в которой алифатические концевые группы

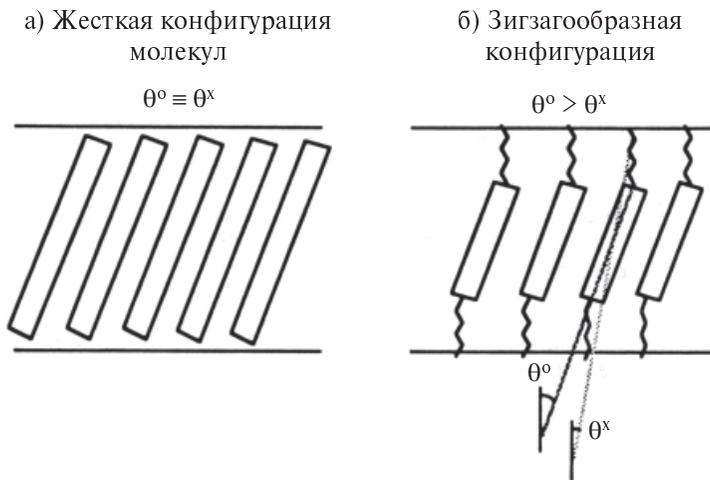


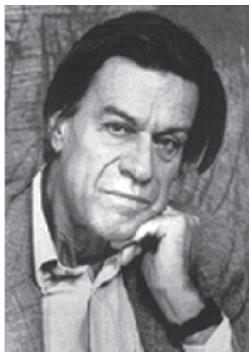
Рис. 2.5. Упрощенные модели упаковки молекул в СЖК С: а) жесткая конфигурация, б) зигзагообразная конфигурация (флуктуации не показаны)

ориентированы ближе к нормали слоев, чем в жесткой модели [11]. Хотя механизм возникновения наклона молекул в обоих случаях разный, всегда это связано с заторможенностью в их вращении.

Большинство моделей предполагает, что переход от СЖК А к СЖК С представляет собой переход второго рода с температурной зависимостью

$$\theta = \theta_0 (T_C - T)^\gamma, \quad (2.9)$$

где  $T_C$  температура перехода,  $\theta_0$  – константа материала,  $\gamma$  по экспериментальным данным находится в интервале  $0,35 \leq \gamma \leq 0,5$ .



Пьер-Жиль де Жен  
(1932–1997)

Фазовый переход из нематика в смектику С представляет собой переход первого рода;  $\theta$  изменяется скачкообразно от 0 при  $T_C$  до величины, не зависящей от температуры в фазе С (примерно  $45^\circ$ ).

Температурные изменения параметров порядка необходимо учитывать при определении физических характеристик ЖК.

В 1991 г. французский физик-теоретик Пьер Жиль де Жен был удостоен Нобелевской премии за обнаружение того, что методы, развитые для изучения явлений упорядоченности в простых системах, могут быть обобщены на более сложные виды материи, в частности на жидкие кристаллы и полимеры.

## 2.2. Температурный интервал мезофазы

Температурный интервал существования мезофазы является одной из важнейших эксплуатационных характеристик ЖКМ, определяющей области их применения. Для его измерения разработаны экспериментальные методы термического анализа, дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и микроскопии. Температурный интервал существования мезофазы для отдельных ЖК соединений является узким и не удовлетворяет условиям практического использования. Поэтому используются смеси нескольких ЖК соединений. Для определения температурного интервала мезофазы можно использовать фазовые диаграммы ЖК смесей. На рис. 2.6. приведен пример фазовой диаграммы смеси двух нематических ЖК.

$$T_{NI} = \sum x_i T_{NI}^i$$

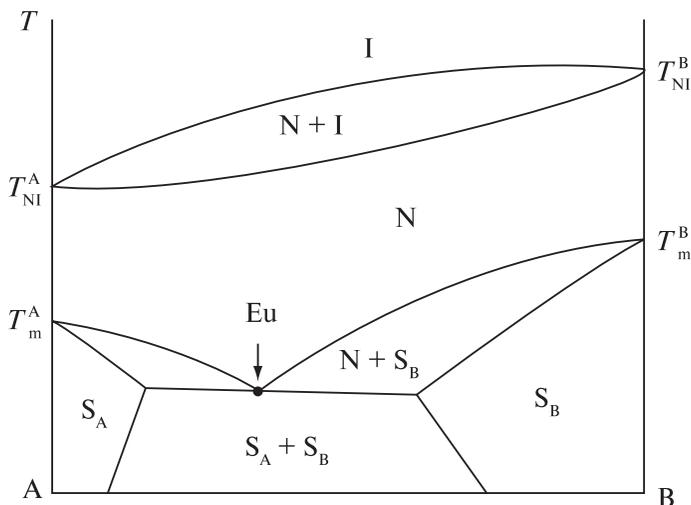


Рис. 2.6. Фазовая диаграмма смеси двух соединений НЖК:  
 I – изотропная фаза, N – нематическая фаза,  $S_A$  и  $S_B$  –  
 кристаллические фазы,  $E_u$  – точка эвтектики.

Каждая фаза отделена от другой двухфазной областью, которая может быть очень узкой. Если компоненты представляют собой идеальный раствор без проявления межмолекулярных взаимодействий, температура просветления  $T_{NI}$  изменяется монотонно. В противном случае зависимость может иметь максимумы и минимумы. Температура плавления имеет минимальное значение в точке эвтектики  $T_{Eu}$ . В реальных условиях ввиду возникновения нескольких метастабильных кристаллических модификаций может появиться несколько точек эвтектики.

В простейшем случае идеального раствора положение эвтектических точек может быть вычислено не только для бинарных, но и многокомпонентных смесей [6].

Установление аналитической зависимости температурного интервала существования мезофазы для гомологических рядов химических структур ЖК представляет большой интерес, позволяя предсказывать температуры фазовых переходов гомологов до их синтеза.

Практически начиная с первых работ по синтезу, выполненных Д. Форлендером в 20–30-х годах прошлого века, предпринимались попытки оценить влияние концевых и мостиковых групп, длины алкильной цепи на температуру просветления [12, 13]. Метод групповых инкрементов был предложен в работах [14–16]. Авторами [17, 18] была показана возможность определения температур фазовых переходов в ЖК с помощью нейронных сетей, хотя результаты прогнозов малоутешительны для плавления и описания переходов мезофаза – мезофаза. Следует отметить подход, предложенный Е.М. Аверьяновым в установлении зависимости температуры просветления  $T_{\text{пр}}(n)$ , где  $n$  – номер гомолога в ряду [19, 20].

В последние годы получены первые положительные результаты по компьютерному моделированию полярных ЖК, включая сегнетоэлектрические соединения. Взаимодействие частиц описывается моделью потенциала Гей-Берне и позволяет для простых случаев предсказать температуры фазовых переходов [21, 22].

### 2.3. Электрические свойства

Электрические свойства ЖК определяют их поведение в электрическом поле. Чистые органические жидкокристаллические соединения являются диэлектриками. Они обладают диэлектрической анизотропией  $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ , где  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$  – диэлектрические проницаемости в направлениях параллельном и перпендикулярном директору соответственно. Эти ЖКМ используются в устройствах, основанных на полевых электрооптических эффектах.

ЖКМ со специальными примесями используются в устройствах, основанных на электрооптических эффектах проводимости.

#### 2.3.1 Диэлектрические свойства

Величина и знак  $\Delta\epsilon$  зависят от электронной структуры молекул, частоты электрического поля и температуры [23–26]. Отрицательная величина  $\Delta\epsilon$  обусловлена наличием в молекулах ЖК дипольных моментов, направленных под большим углом к длинным осям молекул ( $> 55^\circ$ ), а положительная величина  $\Delta\epsilon$  связана с наличием дипольных моментов, направленных почти по оси наибольшей поляризуемости молекул ( $< 55^\circ$ ) (рис. 2.7) [27, 28].

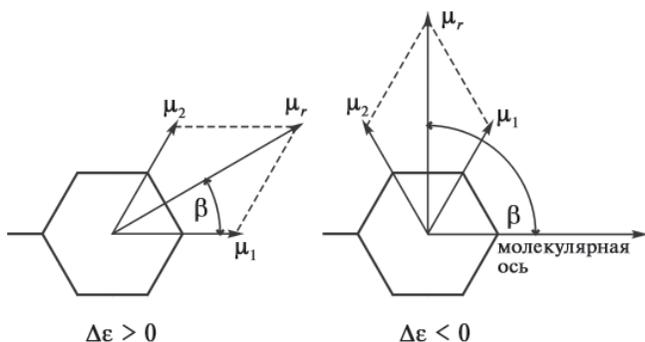


Рис. 2.7. Зависимость знака  $\Delta\epsilon$  от направления дипольных моментов  $\mu$  относительно молекулярной оси

Связь величины  $\Delta\epsilon$  с молекулярными характеристиками описывается приближенной формулой [8]:

$$\Delta\epsilon = \frac{4\pi \cdot \rho}{M} \cdot P \cdot \Theta \cdot N_A \cdot \left[ \Delta\alpha - \frac{\Theta \cdot \mu^2}{2K \cdot T} \cdot (1 - 3\cos^2\beta) \right] \cdot S, \quad (2.10)$$

где  $P$ ,  $\Theta$  — параметры внутреннего поля по Онзагеру;  $N_A$  — число Авогадро;  $\rho$  — плотность,  $M$  — молекулярная масса;  $\Delta\alpha$  — анизотропия поляризуемости;  $\mu$  — дипольный момент,  $\beta$  — угол между направлением дипольного момента и осью поляризуемости;  $S$  — параметр ориентационного порядка;  $K$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Знак и величина  $\Delta\epsilon$  определяются соотношением слагаемых в квадратной скобке. Для неполярных соединений с  $\mu \sim 0$  диэлектрическая анизотропия будет мала. В этом случае  $\Delta\epsilon$  будет определяться анизотропией молекулярной поляризуемости, т. е. первым членом уравнения (2.10). Молекулы с большей величиной  $\Delta\alpha$  в низкочастотном диапазоне (кГц) обычно обладают большей величиной оптической анизотропией  $\Delta n$  в диапазоне оптических частот. Так, диэлектрическая анизотропия неполярных бифенилов несколько выше, чем у их фенилциклогексанового аналога с такой же длиной цепи. В гомологических рядах соединение с меньшей длиной цепи обычно имеет несколько большую величину  $\Delta\epsilon$  из-за большей плотности упаковки. С увеличением температуры  $\Delta\epsilon$  уменьшается пропорционально  $S$ .

Диэлектрические проницаемости  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$  испытывают температурно-частотную дисперсию, причем дисперсия  $\epsilon_{\parallel}$  происходит при более высоких частотах. Детальное рассмотрение молекулярных механизмов, ответственных за дисперсию  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$ , проведено в работах [29–31]. На рис. 2.8 приведены примеры отрицательных (а), положительных (б) значений  $\Delta\epsilon$  и характерные картины дисперсии  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$ . Рассмотрим наблюдаемую дисперсию для смесей, представленных на рис. 2.8а, б. Для них  $\epsilon_{\perp}$  почти во всем температурном интер-

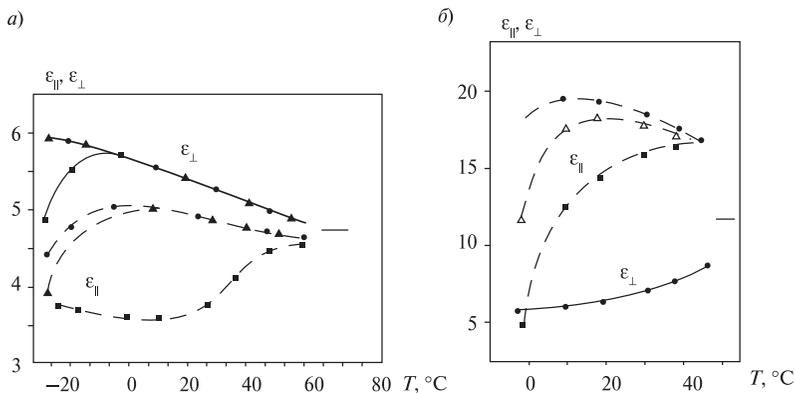


Рис. 2.8. Температурно-частотная зависимость  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$  для смесей оснований Шиффа с  $\Delta\epsilon < 0$  (а) и  $\Delta\epsilon > 0$  (б):  $\bullet$  —  $f = 1 \text{ кГц}$ ;  $\blacktriangle$  —  $f = 10 \text{ кГц}$ ;  $\triangle$  —  $f = 150 \text{ кГц}$ ;  $\blacksquare$  —  $f = 700 \text{ кГц}$  [7]

вале не зависит от частоты. Только для смеси (а) при самых низких температурах проявляется частотная зависимость  $\epsilon_{\perp}$ . В то же время у них во всем температурно-частотном диапазоне обнаруживается сильная дисперсия  $\epsilon_{\parallel}$ , приводящая в случае (б) к уменьшению  $\Delta\epsilon$  и изменению ее знака с положительного на отрицательный.

Другой пример смены знака  $\Delta\epsilon$  в смеси фенилбензоатов приведен на рис. 2.9 [5].

Эффект смены знака  $\Delta\epsilon$  имеет важное практическое значение. Он позволяет уменьшить времена релаксации ориентационных электрооптических эффектов, поскольку при этом молекулы ЖК возвращаются к исходному положению не только под действием сил упругости, но и электрического поля. Изменяя частоту, можно полностью исключить влияние электрического поля для установления

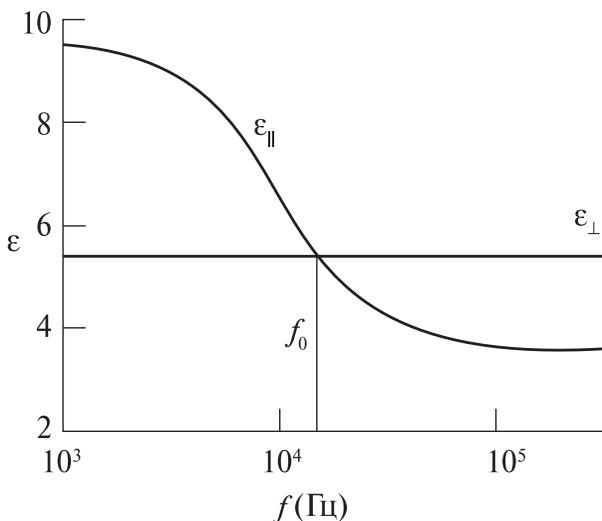


Рис. 2.9. Смена знака  $\epsilon$  в смеси фенилбензоатов,  $f_0$  — частота инверсии знака  $\Delta\epsilon$  [5]

других возможных причин переориентации молекул ЖК. Различия в частотных зависимостях  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$  объясняются тем, что дисперсия  $\epsilon_{\parallel}$  обусловлена релаксацией вращения молекул вокруг коротких осей (этому вращению препятствуют силы межмолекулярного взаимодействия), а дисперсия  $\epsilon_{\perp}$  связана с релаксацией вращения молекул вокруг длинных осей, происходящего без преодоления сил, ответственных за нематический порядок. В НЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  дисперсия хорошо описывается уравнением Дебая с одним временем релаксации [32]. Температурные зависимости  $\Delta\epsilon$  для ряда НЖК с широким температурным интервалом существования мезофазы приведены на рис. 2.10 [33].

При изучении свойств поверхности особый интерес могут представлять НЖК с повышенным значением  $\Delta\epsilon$ . Для цианофениловых эфиров  $\Delta\epsilon$  достигает величины +30. В молекулах ЖК с полярными заместителями, дающими вклад в ориентационную поляризацию вдоль длинной оси молекулы, можно добиться и больших значений  $\Delta\epsilon$ . Так, введением полярных групп в молекулы сложных эфиров синтезированы соединения с широким интервалом мезофазы и значениями  $\Delta\epsilon = +70 \dots +100$  [34]. Однако большинство из этих веществ мо-

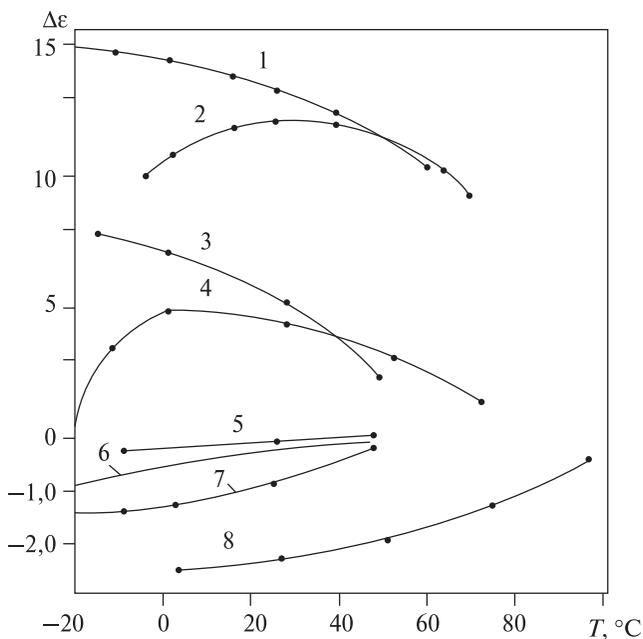


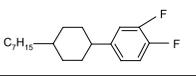
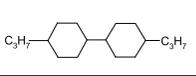
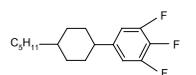
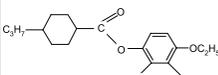
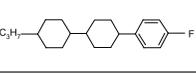
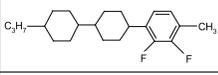
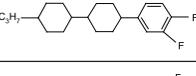
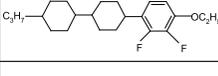
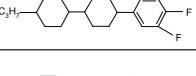
Рис. 2.10. Зависимость диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon$  от температуры  $T$  для НЖК различных структур: 1 — бифенилы; 2 — циклогексаны; 3, 4 — азоксисоединения; 5–7 — основания Шиффа; 8 — салицилиденанилины

нотропны или имеют узкий температурный диапазон существования мезофазы. Сравнительные исследования макроскопических диэлектрических свойств и молекулярных характеристик ЖК со сходной химической структурой установили, что включение алкильных цепочек между центральным мезогенным ядром молекулы и концевой полярной нитрильной группой приводит к изменению величины и направления молекулярного дипольного момента, величины и знака  $\Delta\epsilon$  [35]. Анализ диэлектрических свойств ЖК с алкильными цепочками внутри мезогенного ядра выявил, что дипольная структура молекул слабо изменяется при увеличении длины алифатической цепи. При этом область дисперсии  $\epsilon_{\parallel}$  смещается в область более высоких частот [36]. Оптические характеристики дисплеев с мультиплексным управлением улучшаются при малых значениях  $\Delta\epsilon/\epsilon_{\perp}$  [37].

Данные о фторсодержащих ЖК соединениях с положительной и отрицательной величиной  $\Delta\epsilon$ , представляющих практический интерес, приведены в табл. 2.1 [38].

Таблица 2.1

**Значения  $\Delta\epsilon$  для фторсодержащих ЖК соединений**

Соединение	Т <sub>пр</sub> , °С	$\Delta\epsilon$	$\Delta n$	Соединение	Т <sub>пр</sub> , °С	$\Delta\epsilon$	$\Delta n$
	7,9	4,5	0,07		18,2	-8,2	0,03
	25,6	5,2	0,07		52,7	-7,0	0,09
	155,2	4,6	0,09		138,3	-2,7	0,09
	118	4,4	0,08		172,4	-5,9	0,09
	93,7	5,5	0,08		170,6	-8,4	0,08
	149	6,9	0,09		110,8	-2,2	0,14
	105	10,5	0,08		165,1	-5,3	0,15

Использование метода молекулярных орбиталей и полученных данных в рамках теории Майера-Мейера без учета анизотропии поляризуемости позволили рассчитать величины дипольных моментов с последующим определением  $\Delta\epsilon$  для НЖК различных структур, содержащих полярные группы. В работе [39] были рассчитаны дипольные моменты для 80 соединений из классов фенилциклогексанов, фенилбициклогексанов и циклогексилбифенилов. Точность вычислений  $\Delta\epsilon$  была порядка  $\pm 1-2$ . В [40] были разработаны методы расчета  $\Delta\epsilon$  для производных фтор-пиримидинов и – пиридинов до осуществления их синтеза. 18 соединений НЖК различных гомологических рядов, используемых в твистовых и супертвистовых

дисплеях, было изучено в [41]. Влияние величины дипольных моментов и их направления для сравнения свойств НЖК 8 гомологических рядов проанализированы в [42]. Полученные результаты показывают применимость расчетных методов для определения  $\Delta\epsilon$  НЖК до осуществления их синтеза.

Диэлектрические свойства ХЖК аналогичны: различают материалы с  $\Delta\epsilon > 0$  и  $\Delta\epsilon < 0$ ; при некоторой частоте внешнего электрического поля изменяется знак  $\Delta\epsilon$ . Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры такая же, как и у нематиков [43]. Установлено, что дипольную поляризацию в СЖК определяют те же молекулярные механизмы, что и в НЖК [44]. В смектической фазе энергия активации ориентационных процессов, связанных с вращением молекул вокруг коротких осей, как правило, меньше энергии активации в НЖК. Температурные и частотные зависимости диэлектрической проницаемости в окрестности фазового перехода из С в А-фазу в С\*ЖК ДОБАМБЦ измерены и проанализированы в [45]. Результаты сопоставлены с температурной зависимостью угла наклона молекул в смектических слоях, спонтанной поляризации и шага геликоида. Установлено, что в С\*ЖК диэлектрическая проницаемость существенно зависит от спонтанной поляризации и проявляет свойства, связанные с двуосностью молекул [46].

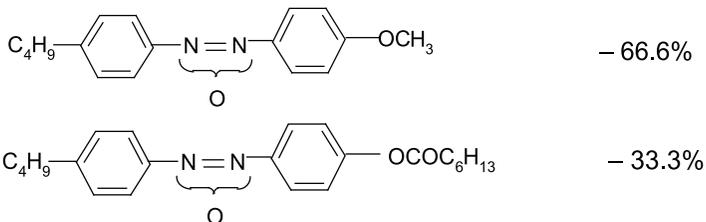
### 2.3.2. Электропроводность

Собственная удельная электропроводность  $\sigma$  чистых НЖК имеет величину порядка  $1 \cdot 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Механизм электропроводности в ЖК — ионный, причем по своей природе носители заряда могут быть как собственными, так и примесными. Ионы могут образовываться в результате диссоциации в объеме образца и в процессе электрохимических явлений на электродах. Величину электропроводности ЖК можно изменять, добавляя в него токопроводящие добавки. Если примесь диссоциирует на ионы (анионы  $A^-$  и катионы  $B^+$ ) с последующей рекомбинацией ( $AB = A^- + B^+$ ), то выражение для  $\sigma$  в случае слабого поля и малой степени ионизации можно представить в виде:

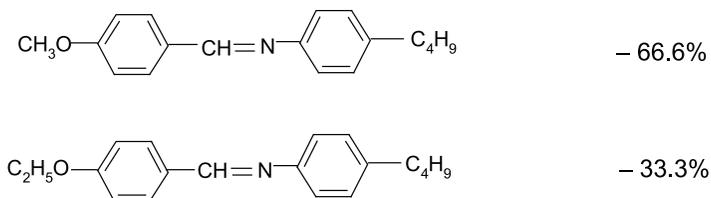
$$\sigma = e \cdot (\mu_+ + \mu_-) \cdot \left( k_D \cdot \frac{C}{k_R} \right)^{1/2} \quad (2.11)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\mu_+ + \mu_-$  — подвижности катиона и аниона;  $C$  — концентрация примеси,  $\text{см}^{-3}$ ,  $k_D$  — коэффициент диссоциации,  $k_R$  — коэффициент рекомбинации.

Детальное экспериментальное исследование электропроводности [47] было проведено со смесью азоксибензолов А, имеющей состав:



и смесью азометинов Б, имеющей состав:



На рис. 2.11 показаны концентрационные зависимости перпендикулярной составляющей электропроводности  $\sigma_{\perp}$  для смесей А и Б, легированных ионными (тетрабутиламмоний пикрат – ТБАП и тетрабутиламмоний бромид – ТБАБ), акцепторными (тетрацианоэтилен – ТЦЭ; 2,3-дихлор – 5,6-дицианбензохинон – ДХДЦБХ; тетрацианхинодиметан – ТЦХДМ) и донорными (п-фенилендиамин – ФДА) примесями. Характерная зависимость от концентрации  $\sigma \sim C^{1/2}$  наблюдалась только для ионных примесей. Для донорных и акцепторных примесей в смеси А обнаружена более слабая зависимость  $\sigma$  от  $C$ , что не укладывается в рамки простых представлений о диссоциации с постоянными константами  $k_D$  и  $k_R$ . По-видимому, процесс ионизации в данной системе идет через промежуточную стадию образования комплексов с переносом заряда. Зависимость электропроводности НЖК от температуры носит экспоненциальный характер:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp \left[ \frac{A}{K \cdot T} \right] \quad (2.12)$$

Поведение  $\sigma$  в переменном электрическом поле описывается соотношением:

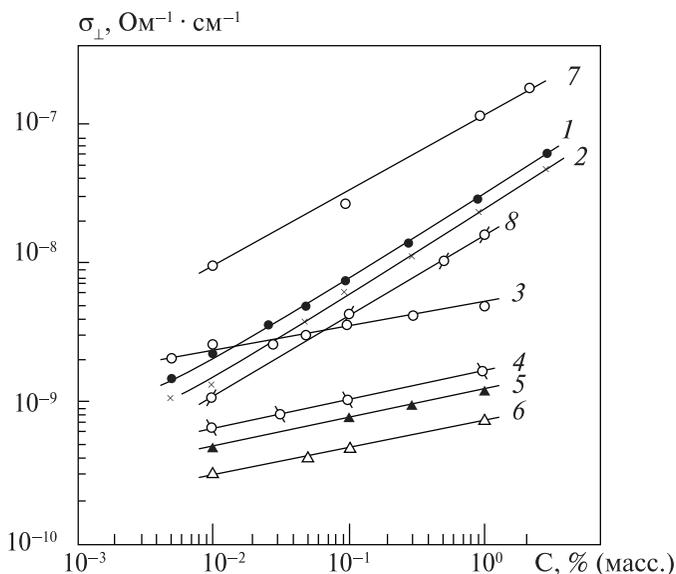


Рис. 2.11. Зависимость электропроводности  $\sigma_{\perp}$  на переменном токе для смеси А (1–6) и смеси Б (7–8) от концентрации примесей ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $f = 1\text{кГц}$ ) 1 – ТБАП; 2, 8 – ТБАБ; 3, 7 – ТЦЭ; 4 – ФДА; 5 – ДХДЦБХ; 6 – ТЦХДМ

$$\sigma(\omega) = \sigma(dc) + \sigma_p(\omega) = \sigma(dc) + \frac{\varepsilon_0 \cdot (\varepsilon - 1)}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \cdot \tau \cdot \omega^2 \quad (2.13)$$

здесь  $\sigma(dc)$  — составляющая по постоянному току,  $\sigma_p(\omega)$  — составляющая по переменному току, связанная с дипольной поляризацией,  $\tau$  — время дипольной релаксации.

При малых частотах [ $\sigma(dc) > \sigma_p(\omega)$ ] этот параметр определяется характерной для данного вещества электропроводностью. В области средних частот [ $\omega\tau \ll 1$ ,  $\sigma(dc) \ll \sigma_p(\omega)$ ]  $\sigma$  растет пропорционально  $\omega^2$ :

$$\sigma(\omega) = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon - 1) \cdot \tau \cdot \omega^2 \quad (2.14)$$

В области высоких частот [ $\omega\tau \gg 1$ ] при условии, что  $\sigma(dc) \ll \varepsilon_0(\varepsilon - 1)/\tau$  электропроводность достигает насыщения:

$$\sigma_{\max} = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon - 1) / \tau \quad (2.15)$$

Уравнения (2.13–2.15) хорошо описывают экспериментальные результаты, приведенные в работе [75].

Электропроводность в ЖК носит анизотропный характер. Анизотропия электропроводности определяется не столько химической структурой ЖКМ, сколько анизотропией подвижности носителей заряда:

$$\Delta\sigma = e \cdot N \cdot (\mu_{\parallel} + \mu_{\perp}) \quad (2.16)$$

где  $\Delta\sigma = \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}$  ( $\sigma_{\parallel}$  — электропроводность, измеренная вдоль направления длинных осей молекул, а  $\sigma_{\perp}$  — перпендикулярно ему).

Отсюда следует, что  $\Delta\sigma$  зависит от типа и концентрации примесей. На рис. 2.12 приведены зависимости  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$  для смеси А от концентрации примесей. Для акцепторных и донорных примесей  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp} = 1,05 - 1,3$  и характерна слабая зависимость от концентрации. Для ионных примесей  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp} \approx 1,8$ , причем с ростом концентрации это отношение вначале растет, а потом падает.

На рис. 2.13 показана температурная зависимость  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$  для смеси А ( $\sigma_{\perp} \approx 1 \cdot 10^{11} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ ). Увеличение  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$  со снижением температуры соответствует увеличению  $S$ . Для большинства нематиков  $\Delta\sigma > 0$  и не зависит от анизотропии диэлектрической проницаемости.

В смектических ЖК  $\Delta\sigma < 0$ , причем величина анизотропии существенно больше, чем в нематической фазе, а характер температурной зависимости сложен. Объяснить поведение электропровод-

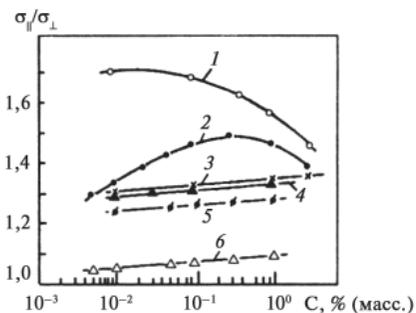


Рис. 2.12. Зависимость  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ , для смеси А от концентрации примесей для неориентированных образцов ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $f=1\text{кГц}$ ) [75]: 1 — ТБАБ; 2, 8 — ТБАП; 3 — ФДА; 4 — ДХДЦБХ; 5 — ТЦХДМ; 6 — ТЦЭ

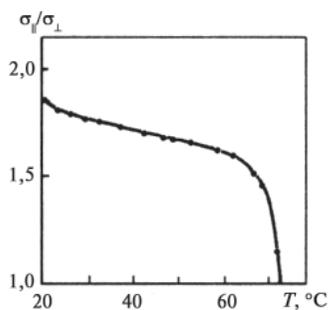


Рис. 2.13. Зависимость анизотропии электропроводности  $\sigma_{\parallel}/\sigma_{\perp}$ , для смеси А от температуры [47]

ности можно лишь в конкретном случае, зная структуру вещества, тип носителей заряда и их микроскопические параметры.

В ЖКМ проводимость оказывает существенное влияние на долговечность и стабильность [48]. Особую роль проводимость играет в ЖКМ, используемых в активно матричных ЖК-дисплеях (АМЖКД) с управлением от тонкопленочных транзисторов. Если в них управляющее напряжение, поданное на выбранный элемент изображения (пиксель), не будет поддерживаться постоянным в течение 16 мс, то возникнет мелькание, ухудшающее качество изображения [49]. Поэтому проводимость ЖКМ не должна быть выше  $1 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$  даже после термических циклов воздействия и УФ радиации.

Подводя итог рассмотрению электрических свойств ЖКМ, следует отметить, что для различных применений к ним предъявляются различные требования. Так, для твистовых ЖКД на тонкопленочных транзисторах требование обеспечения высокого сопротивления важнее, чем обеспечение большой диэлектрической анизотропии. В то же время для супертвистовых дисплеев на НЖК и для дисплеев на ХЖК высокая диэлектрическая анизотропия эффективнее уменьшает управляющее напряжение, чем высокое сопротивление. Влияние проводимости на параметры ЖК ячейки и характеристики твистовых и супертвистовых дисплеев рассмотрено в работе [50].

## 2.4. Оптические свойства

Оптические свойства ЖКМ являются определяющими при создании элементов и устройств фотоники. От оптической анизотропии ЖК зависят контраст и углы наблюдения в дисплеях. С нею связан выбор толщины слоя ЖКМ для обеспечения фазовых корреляций в адаптивной оптике, а также режимы управления и времена переключения оптических элементов. Сведения о спектральном светопропускании и лазерной прочности необходимы для обеспечения условий эксплуатации ЖК-устройств. Оптические свойства ХЖК определяют цветотемпературные параметры термоиндикаторных пленок и характеристики электрооптических эффектов.

Оптические свойства материала характеризуются комплексными тензорами диэлектрической и магнитной проницаемости. Вещественные части этих тензоров определяют фазовую скорость световой волны, мнимые — поглощение в среде. В соответствии с этим

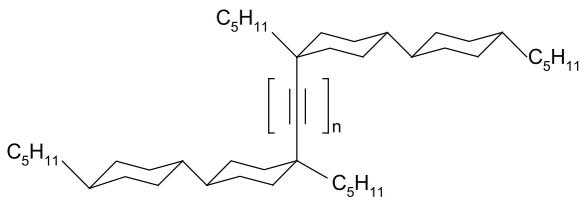
показатель преломления  $N$  может быть представлен в виде комплексного числа [51]:

$$N = n + i \cdot k \quad (2.17)$$

где  $n$  — коэффициент преломления,  $k$  — коэффициент поглощения.

Особенностью ЖКМ является наличие большого двулучепреломления, дихроизма и оптической активности.

ЖК могут быть как оптически одноосными, так и двуосными [52]. В одноосных ЖК свет, поляризованный в двух взаимно перпендикулярных направлениях, распространяется с разной скоростью. Нематики являются, как правило, оптически положительными, т. е. для них показатель преломления необыкновенного луча ( $n_e$ ) больше или равен показателю преломления обыкновенного луча ( $n_o$ ). В них оптическая анизотропия  $\Delta n = (n_e - n_o) \geq 0$ . Специалистами фирмы «Мерк» были предложены оптически отрицательные ЖК. Примером могут служить соединения с тройными связями [53]:



ХЖК ведут себя как оптически отрицательный одноосный кристалл ( $\Delta n \leq 0$ ). Дискотики с отрицательной величиной  $\Delta n$  используются для создания на их основе компенсирующих пленок в дисплеях для увеличения угла обзора [54].

### 2.4.1. Оптическая анизотропия НЖК

Характерные значения показателей преломления нематиков и смектиков для видимой области спектра лежат в пределах от 1,4 до 1,9. Величина двулучепреломления  $\Delta n = n_e - n_o$  в зависимости от типа НЖК может изменяться в широких пределах от 0,02 до 0,5. С уменьшением длины волны  $\lambda$  величины показателей преломления и  $\Delta n$  возрастают. Это объясняется приближением к электронным полосам поглощения, которые для большинства ЖКМ лежат в области 380–400 нм. Дисперсия  $\Delta n$  в видимом диапазоне длин волн описывается следующим выражением [55]:

$$\Delta n = G_0 \cdot \lambda_0^2 + G_1 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \lambda_1^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + G_2 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot \lambda_2^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} \quad (2.18)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения в видимом диапазоне;  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — резонансные длины волн,  $G_0$ ,  $G_1$  и  $G_2$  — коэффициенты, зависящие от величины и анизотропии силы осциллятора.

С увеличением  $\lambda$  значения  $\Delta n$  постепенно уменьшаются и становятся практически постоянными в области ИК диапазона за исключением отдельных локальных пиков поглощения.

Главные показатели преломления  $n_e$  и  $n_o$  связаны с поляризуемостью молекулы, если тензор поляризуемости аксиально симметричен, соотношениями, полученными В.Н. Цветковым [55]:

$$\frac{n_e^2 - 1}{n_e^2 + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \pi N_A \left[ b_1 - (b_1 - b_2) \frac{2(1-S)}{3} \right] = \frac{4}{3} \pi N_A \left( \bar{b} + \frac{2}{3} \Delta b S \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{n_o^2 - 1}{n_o^2 + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \pi N_A \left[ b_2 + (b_1 - b_2) \frac{2(1-S)}{3} \right] = \frac{4}{3} \pi N_A \left( \bar{b} - \frac{1}{3} \Delta b S \right) \quad (2.20)$$

где  $M$  — молярная масса;  $\rho$  — плотность вещества;  $N_A$  — число Авогадро;  $b_1$ ,  $b_2$  — поляризуемости молекул вдоль длинной и короткой оси соответственно:

$$\Delta b = b_1 - b_2; \quad \bar{b} = \frac{1}{3}(b_1 + 2b_2) \quad (2.21)$$

Из уравнений (2.19) и (2.20) можно определить, каким ориентировочно должен быть тензор поляризуемости молекул НЖК для получения заданных оптических свойств. Необходимые значения  $\Delta n$  можно получить, смешивая НЖК различных молекулярных структур. Экспериментальные данные [56] показывают, что коэффициенты преломления смеси  $n_{ec}$  и  $n_{oc}$  связаны с коэффициентами преломления отдельных компонентов  $n_{ea}$ ,  $n_{oa}$ ,  $n_{eb}$ ,  $n_{ob}$  уравнением аддитивности:

$$n_{ec} = n_{ea} \cdot c_a + n_{eb} \cdot c_b \quad (2.22)$$

$$n_{oc} = n_{oa} \cdot c_a + n_{ob} \cdot c_b \quad (2.23)$$

$c_a$ ,  $c_b$  — массовые доли компонентов  $a$  и  $b$ .

Для всех ЖК композиций с повышением температуры  $\Delta n$  уменьшается, что объясняется уменьшением ориентационной упорядоченности молекул. Наиболее резкое изменение  $\Delta n$  наблюдается око-

ло точки температурного перехода НЖК в изотропную фазу; с исчезновением ориентационной упорядоченности молекул НЖК  $\Delta n$  падает до нуля.

Как следует из уравнений (2.17) и (2.18),  $\Delta n$  может быть связано со степенью порядка  $S$  выражением:

$$\Delta n = \frac{4}{3} q \cdot \pi \cdot N_A \cdot \Delta b \cdot S \quad (2.24)$$

Если предположить, что параметры внутреннего поля описываются следующим выражением:

$$\bar{n}^2 + 2 = \frac{n_e^2 + 2n_o^2}{3} + 2 \quad (2.25)$$

то коэффициент  $q = \frac{n_e^2 + 2n_o^2 + 6}{n_e + n_o} \approx 4,2$  и практически не зависит от

температуры и типа ЖКМ. Это означает, что разные значения  $\Delta n$  для НЖК различного химического строения объясняются тем, что изменяется произведение  $\Delta b \cdot S$ , причем основной вклад вносит величина  $\Delta b$ . Поскольку основной вклад в величину  $\Delta b$  определяется бензольными кольцами, то  $\Delta n$  НЖК, в молекулах которых два бензольных кольца, больше, чем  $\Delta n$  НЖК, содержащих одно бензольное кольцо. Размер алифатических цепей в молекулах НЖК практически не влияет на величину  $\Delta n$  [57], а расположение в середине или на конце молекулы двойных или тройных связей, направленных вдоль длинной оси молекул, может способствовать увеличению  $\Delta n$ . Яркой иллюстрацией этому может служить резкое возрастание  $\Delta n$  в молекулах салицилиденанилинов и о-оксиазобензолов, образующих водородные связи (рис. 2.14а, б) [58]. Если в ЖК последовательно существуют нематическая и смектическая А фазы, то при температуре фазового перехода кривые зависимости показателей преломления от температуры испытывают излом (рис. 2.14).

Температурная зависимость  $\Delta n$  для ряда НЖК с широким температурным интервалом существования мезофазы приведена на рис. 2.15 [59].

Средний коэффициент преломления  $n$ , характеризующий свойства неориентированного образца, связан с главными показателями преломления соотношением:

$$n^2 = \frac{1}{3} (n_e^2 + 2n_o^2) \quad (2.26)$$

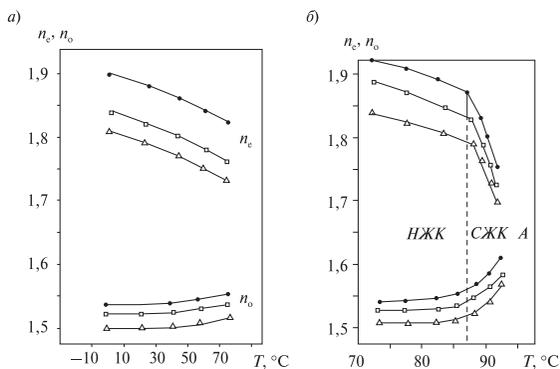


Рис. 2.14. Зависимость показателей преломления  $n_e$  и  $n_o$  от температуры  $T$  для эквимольной смеси:

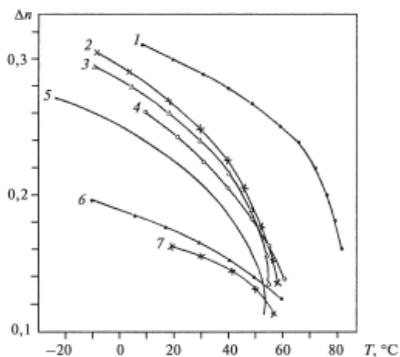
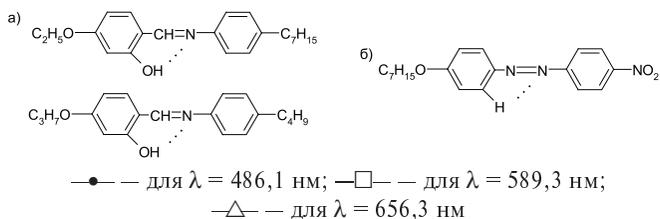


Рис. 2.15. Зависимость оптической анизотропии  $\Delta n$  от температуры  $T$  для НЖК различных структур: 1 — салицилиденанилины; 2 — азоксисоединения; 3 — основания Шиффа; 4 — толаны; 5 — бифенилы; 6 — циклогексаны; 7 — сложные эфиры

При этом величина  $n$  отличается от показателя преломления изотропной фазы только на величину, определяемую температурным изменением плотности ЖК.

Все ЖК обладают дихроизмом: свет, поляризованный в направлении директора ( $\parallel$ ), поглощается больше, чем свет, поляризованный в перпендикулярном направлении ( $\perp$ ) (рис. 2.16). С ростом упо-

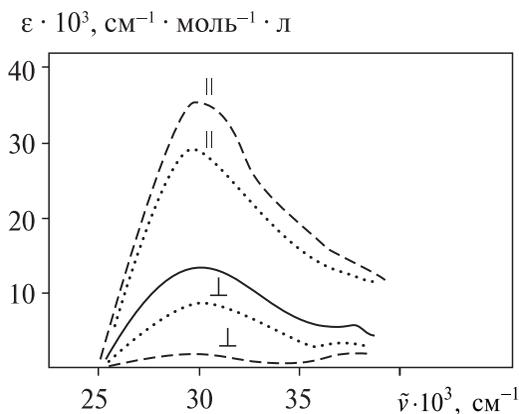


Рис. 2.16. Поляризованные спектры поглощения 4,4'-ди-п-гептилоксиазоксибензола для: 1 — изотропной (—); 2 — нематической (---); 3 — смектической С (.....) фаз;  $\tilde{\nu} = 1/\lambda$  — волновое число

рядочения анизотропия поглощения возрастает: она больше у смектической фазы. Явление дихроизма позволяет определять скалярный параметр порядка, а в технике используется для изготовления поляроидов [60].

Данные об оптической анизотропии рабочих смесей различных НЖК структур с большой и малой величинами положительной диэлектрической анизотропии ( $\Delta\epsilon$ ), а также фторсодержащих смесей, нашедших применение в оптических устройствах, приведены соответственно в табл. 2.2–2.4. [61]. Измерения производились для 10–20 масс. % растворов этих соединений в ЖК матрице ZLI-1132 при температуре 20°C на длине волны 589,3 нм при температуре на 10К выше  $T_{\text{пр}}$ . Величина  $\Delta n$  определялась методом экстраполяции до концентрации чистого соединения (100 %). Такая методика может

Таблица 2.2

Значения оптической анизотропии НЖК  $\Delta n$  с относительно большой величиной диэлектрической анизотропии ( $\Delta\epsilon$ ) [61]

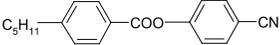
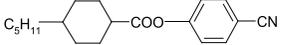
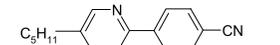
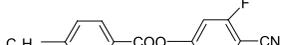
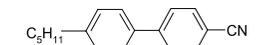
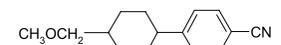
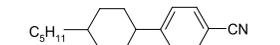
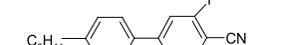
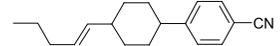
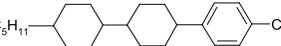
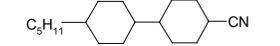
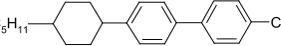
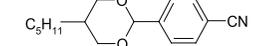
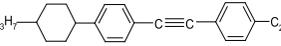
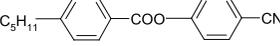
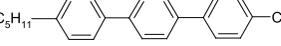
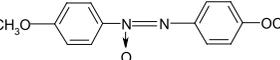
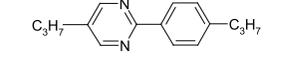
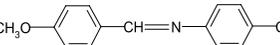
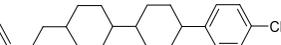
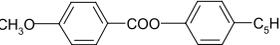
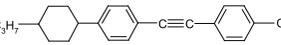
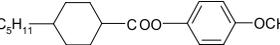
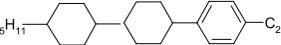
НЖК	$\Delta n$	НЖК	$\Delta n$
	0,18		0,13
	0,23		0,15
	0,21		0,14
	0,12		0,12
	0,16		0,21
	0,06		0,21
	0,12		0,16
	0,16		0,37

Таблица 2.3

Величины  $\Delta n$  для НЖК с малой величиной  $\Delta\epsilon$  [61]

НЖК	$\Delta n$	НЖК	$\Delta n$
	0,26		0,19
	0,27		0,36
	0,15		0,25
	0,08		0,08

НЖК	$\Delta n$	НЖК	$\Delta n$
	0,26		0,09
	0,17		0,17
	0,10		0,16
	0,04		

Таблица 2.4

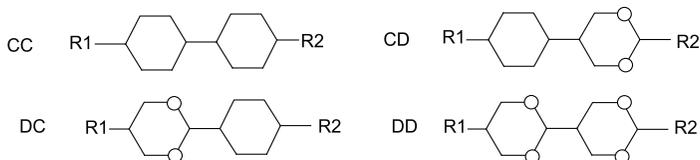
Величины  $\Delta n$  для фторсодержащих НЖК [61]

НЖК	$\Delta n$	НЖК	$\Delta n$
	0,02		0,09
	0,09		0,08
	0,10		0,08
	0,11		0,09
	0,10		0,22
	0,12		0,08
	0,08		0,12

привнести значительную погрешность, поскольку межмолекулярные взаимодействия ЖК с компонентами матричного растворителя создают отличия в поляризуемости молекул по сравнению с чистым соединением.

Известно, что материалы с большой величиной  $\Delta n$  позволяют сократить времена переключения за счет уменьшения толщины слоя. Для этой цели используются толаны и производные бифенилов [62]. В частности цианобифенилы обладают не только относительно большой величиной  $\Delta n$ , но и большой величиной  $\Delta\epsilon$ . Это делает их пригодными для использования в ЖК элементах на твист-эффекте.

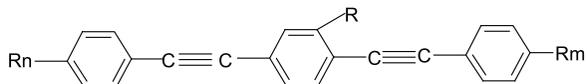
С целью увеличения углов обзора применяют соединения с малой величиной  $\Delta n$ , чтобы получить малые значения произведения  $d\Delta n$ , где  $d$  — толщина слоя ЖК. Для этого пригодны фенилциклогексаны [63]. ЖКМ с малой величиной  $\Delta n$  используются в дисплеях отражательного типа, которые удовлетворяют условию  $d\Delta n < 240$  нм. Если толщина слоя НЖК  $d = 4000$  нм, то  $\Delta n < 0,06$ . При этом они характеризуются высокой устойчивостью к УФ излучению, что позволяет их использовать в системах проекции на большой экран с мощными источниками освещения ( $> 1$  кВт). Примеры структур с малыми значениями  $\Delta n$  приведены ниже [52]:



Центральная группа	R1	R2	Температуры фазовых переходов, °С	$\Delta\epsilon$	$\Delta n$
CC	$C_3H_7$	$C_3H_7$	К 65 СЖК В 83 ИЖ	-0,3	0,043
CD	$C_3H_7$	$C_3H_7$	К 22 СЖК В 73 ИЖ	2,5	0,055
DC	$C_3H_7$	$C_3H_7$	К 36 СЖК В 36 НЖК 36,4 ИЖ	1,6	0,045
DD	$C_3H_7$	$C_3H_7$	К 82 СЖК В 125 ИЖ	8,3	0,048

ЖК с большей величиной  $\Delta n$  необходимы для устройств отклонения лазерного луча: чем больше  $\Delta n$ , тем тоньше слой ЖК и тем короче времена переключения. В дисплеях на основе ХЖК материалы с большей величиной  $\Delta n$  имеют большую величину брег-

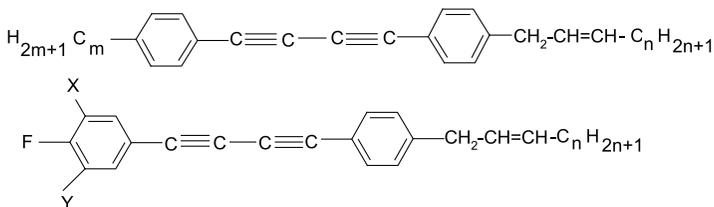
говского угла отражения, поскольку  $\Delta\lambda = \Delta n \cdot p$  ( $p$  — шаг спирали ХЖК), что приводит к повышению их яркости. На основе таких материалов ведется разработка «электронных книг». В голографических устройствах на основе ЖК, диспергированных в полимер (PDLC), увеличение  $\Delta n$  повышает дифракционную эффективность. Примером ЖКМ с большим значением  $\Delta n$  может служить соединение:



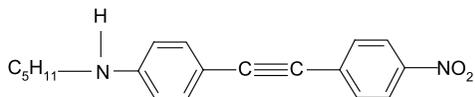
$n, m, R$	Фазовые переходы, °С	$\Delta H$	$\Delta\epsilon$	$\Delta n$
2, 6, H	К 134 НЖК 191 ИЖ	3,6		
2, 6, CH <sub>3</sub>	К 74 НЖК 167 ИЖ	5,2	0,9	0,38
2, 6, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	К 31 НЖК 107 ИЖ	3,2	6	0,38
5, F, CH <sub>3</sub>	К 69 НЖК 163 ИЖ	5,0	6	0,37
5, F, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	К 61 НЖК 103 ИЖ	5,2	15	0,53
5, CN, CH <sub>3</sub>	К 114 НЖК 203 ИЖ	5,5		
5, CN, C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	К 85 НЖК 159 ИЖ	3,5	13	0,51

$R_n = C_nH_{2n+1}$ ,  $R_m = C_mH_{2m+1}$  (F, CN);  $R = H$ ; CH<sub>3</sub>; C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>.  
 $\Delta H$  — энтальпия плавления (ккал/моль).

Характеристики соединений с большой величиной  $\Delta n$  и малой вязкостью приведены в работе [6]. В последние годы были разработаны новые соединения на основе бифенилбиацетиленов с большой величиной  $\Delta n$  и малой вязкостью. Недостатком этих соединений с F- группой явился узкий интервал нематической фазы (менее 10 °С). Заменой алкильной группы на алкенильную удалось повысить  $T_{np}$  и расширить нематический интервал мезофазы. Молекулярные структуры этих соединений приводятся ниже [64]:

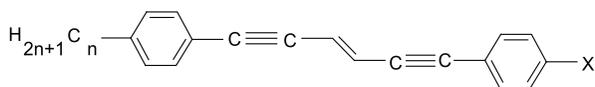


Недостатком этих соединений является невысокая фото- и термостабильность, приводящая к полимеризации соединений [65]. Для ее предотвращения эффективно используется 4-нитро-4'-пентиламинолан [66]:

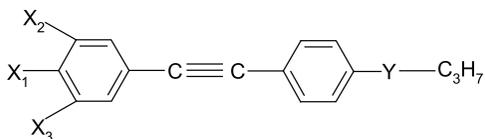


Эта добавка не только повышает долговечность материала, но и благодаря большой величине диэлектрической анизотропии ( $\Delta\epsilon \approx 60$ ) существенно снижает пороговое напряжение в дисплеях на эффекте «гость-хозяин».

Для дальнейшего увеличения молекулярной цепи сопряжения были синтезированы и изучены соединения нового класса [67]:



Здесь X может быть атомом фтора, алкильной или алкокси-группой. Эти соединения обладают большей величиной  $\Delta n > 0,4$ , однако их фотостабильность низка из-за наличия двойной цепи. Среди линейно сопряженных соединений хорошей фото- и термостабильностью обладают толаны (табл. 2.5):



Соединения, содержащие циано-группу, имеют монотропный характер фазовых переходов и высокую температуру просветления. Замена алкильной боковой цепи на алкенильную приводит к замене монотропной фазы на энантиотропную нематическую фазу, обладающую широким интервалом и низкими температурами плавления. Двухлучепреломление этих толанов при температуре 20 °С на длине волны 589 нм превышает 0,4.

Изотиоцианаты (NCS) толанов склонны к образованию смектической фазы, что нежелательно для получения нематической смеси. Заменой расположения фтор-группы удается избежать образования смектической фазы и понизить  $T_{пл}$ . Следует отметить, что

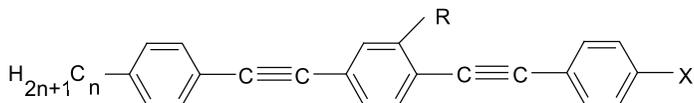
толаны с нафталиновой группой имели только нематическую фазу и  $\Delta n = 0,54$  при  $\lambda = 589$  нм. Они обладают  $\Delta\epsilon \approx 10$  и меньшей вязкостью, чем соединения с CN-группой. Их недостатком является более сложный процесс синтеза.

Таблица 2.5 [68]

**Физические характеристики некоторых производных толанов**

$X_1$	$X_2$	$X_3$	Y	Фазовые переходы, °С	$\Delta n$
CN	H	H	—	К 87 НЖК (78) ИЖ	
CN	H	H	O	К 98 НЖК 103 ИЖ	
CN	H	H	$C\equiv C$	К 119 НЖК (87) ИЖ	0,46
CN	H	H	$CH=CH$	К 100 НЖК 150 ИЖ	0,47
CN	F	H	$C\equiv C$	К 109 ИЖ	0,414
CN	F	H	$CH=CH$	К 74 НЖК 102 ИЖ	0,426
NCS	H	H	$C_2H_4$	К 92 СЖК (82) ИЖ	
NCS	F	F	$OCH_2$	К 71 НЖК (62) ИЖ	0,41
F	H	H	$C\equiv C$	К 84 ИЖ	
F	H	H	$CH=CH$	К 88 ИЖ	
$C_3H_7$	H	H	$C\equiv C$	К 99 ИЖ	0,35
$C_3H_7$	H	H	$CH=CH$	К 73 НЖК 113 ИЖ	0,359
$CF_3O$	H	H	$C\equiv C$	К 121 ИЖ	
$CF_3O$	H	H	$CH=CH$	К 122 НЖК 127 ИЖ	
F	F	H	$CH=CH$	К 61 ИЖ	0,305
F	F	F	$CH=CH$	К 34 ИЖ	0,27

Соединения битоланов благодаря длинной цепи сопряжения имеют большие значения  $\Delta n$  [68]:



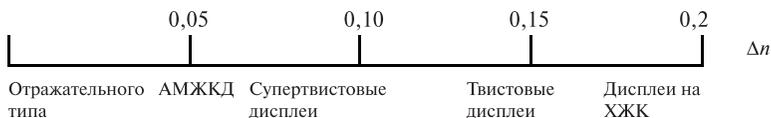
В табл. 2.6 приведены некоторые физические характеристики битоланов с F- и CN-группами.

Таблица 2.6 [69]

$n, X$	$R$	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$T_{пр}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H$ , ккал/моль	$\Delta\epsilon$	$\Delta n$
4, 2	H	104,7	211,9	2,97	0,8	0,4
4, F	H	172,5	207,1	5,73	8	
4, F	F	145,7	170,3	6,49	10	
2, F	CH <sub>3</sub>	103,7	183,2	5,73		
3, F	CH <sub>3</sub>	101,7	191,2	4,64		
5, F	CH <sub>3</sub>	69,4	162,8	7,37		
6, F	CH <sub>3</sub>	73,5	150,5	4,97		
5, CN	CH <sub>3</sub>	114,0	203,0	8,40		
6, CN	CH <sub>3</sub>	100,7	215,2	5,46		
3, F	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	65,0	112,9	7,10	15	0,53
4, F	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	69,1	98,3	5,10		
5, F	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	60,9	103,2	5,25		
6, F	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	46,5	89,1	5,20		
3, CN	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	102,9	161,9	4,77	7	0,37
4, CN	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	118,5	157,4	4,56		
5, CN	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	85,2	159,3	7,32		
6, CN	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	77,2	131,7	3,51	13	0,51

Величины  $\Delta\epsilon$  и  $\Delta n$  получены методом экстраполяции:  $\Delta\epsilon$  — на частоте 1 кГц,  $\Delta n$  при  $\lambda = 515$  нм и  $T = 22^\circ\text{C}$ .  $\Delta H$  — энтальпия плавления (ккал/моль).

Приведенные примеры свидетельствуют о наличии ЖКМ с различными значениями  $\Delta n$ . Связь  $\Delta n$  ЖКМ с областями применения иллюстрируется следующей диаграммой [52]:

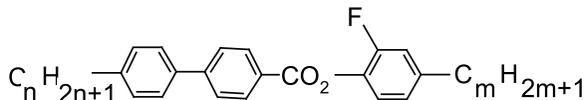


Для описания оптических характеристик ЖК при воздействии электрического поля, приводящего к переориентации молекул, используют параметр  $n_e^{\text{eff}}$  [70]:

$$n_e^{\text{eff}} = \frac{\sin^2\Theta}{n_o^2} + \frac{\cos^2\Theta}{n_e^2} \quad (2.27)$$

Этот параметр определяют из эллипсоида главных показателей преломления.

Особенности показателей преломления СЖК С рассмотрим на примере двухкомпонентной смеси с фазами К 59.2 СЖК В 32.0 СЖК С 73.3 СЖК А 82.7 НЖК 138:



Коэффициенты преломления смеси, измеренные для гомеотропных слоев, полученных натиранием параллельно и перпендикулярно некоторой плоскости, приведены на рис. 2.17.

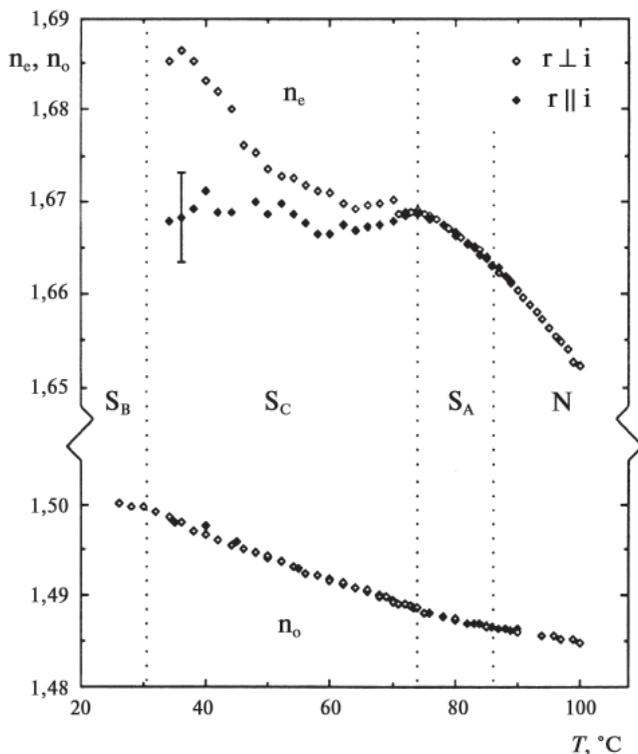


Рис. 2.17. Коэффициенты преломления для ориентированных СЖК [71]

В СЖК С коэффициенты преломления выше, чем в СЖК А и НЖК, и подтверждают наличие двуосности.

#### ***2.4.2. Спектральные характеристики НЖК***

Поглощение света ЖК в видимом диапазоне длин волн обычно мало [72]. Однако в ряде проекционных и неполяроидных дисплеев для автономных переносных устройств поглощение необходимо учитывать, если оно зависит от мощности источника излучения. Основное поглощение ЖК компонентами наблюдается в УФ и ИК диапазонах. Эти диапазоны спектра необходимо отфильтровывать в проекционных дисплеях с мощными осветительными лампами [73]. Под воздействием УФ излучения ЖКМ может разлагаться, уменьшая долговечность устройства. С другой стороны, поглощенный свет может нагревать ЖК элемент. Поскольку  $\Delta l$ , вязкость и упругие константы зависят от температуры, характеристики ЖК элемента также будут изменяться. С увеличением длины сопряжения граница поглощения смещается в сторону видимого диапазона. Влияние УФ излучения на фотостабильность и долговечность ЖКМ связано с разрушением химических связей длинной молекулярной цепи и нарушением условий ориентации, что ухудшает параметры ЖК элементов.

Зависимости оптического поглощения  $D$  от длины волны  $\lambda$  для ряда ЖКМ приведены на рис. 2.18.

Максимальной прозрачностью в видимом диапазоне обладают смеси на основе толанов и бифенилов [59]. Спектроскопические свойства ЖК являются предметом самостоятельного исследования [74]. Молекулярная спектроскопия получает все большее распространение при изучении свойств и строения ЖКМ. Отечественными и зарубежными авторами выполнен большой цикл работ по исследованию электронных спектров поглощения и флуоресценции ЖК, содержащих примеси [75, 76], влияния анизотропных растворов на спектры поглощения [77, 78], определению упорядоченности молекул ЖК по электронным спектрам [79, 80]. Спектры НЖК в электрическом поле были рассмотрены в работе [81], колебательные спектры ИК-поглощения и комбинационного рассеяния в ЖК разных классов в [82].

Наиболее полные сведения о колебательных спектрах поглощения ЖК в широкой области длин волн содержатся в монографии [83]. Анизотропия сил межмолекулярного взаимодействия в ЖКМ особенно ярко проявляется в поляризованных длинноволновых

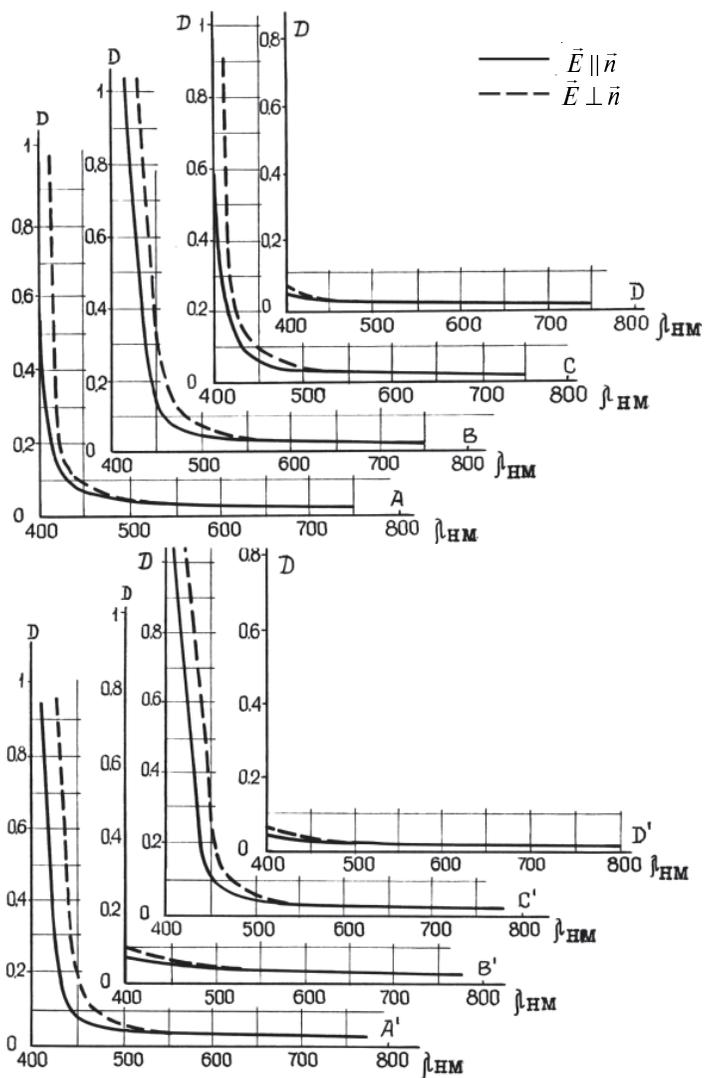


Рис. 2.18. Кривые спектрального поглощения НЖК, толщина слоя НЖК –  $d = 60$  мкм. А–ЖК6; В–ЖК1; С–ЖК7; D–ЖК5; А'–ЖК2; В'–ЖК9; С'–ЖК3; D'–ЖК10 (расшифровка химического состава дана в [59])

спектрах поглощения, обладающих характерными особенностями и, прежде всего, ярко выраженным дихроизмом [84, 85]. Анализ экспериментальных данных показал, что низкочастотные колебательные спектры ЖК не сильно отличаются для различных состояний.

Для применений важно, что в инфракрасной области спектра они имеют ряд окон прозрачности, расположение которых зависит от химической структуры. Первые полосы поглощения появляются в ближней ИК области. На рис. 2.19 и рис. 2.20 показаны

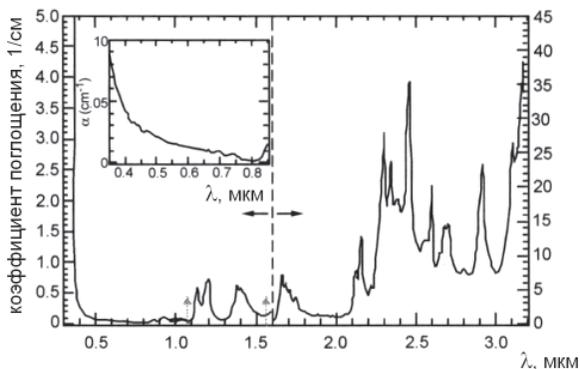


Рис. 2.19. Коэффициент поглощения 5ЦБ в видимой и в близкой ИК областях при  $T = 50^\circ\text{C}$

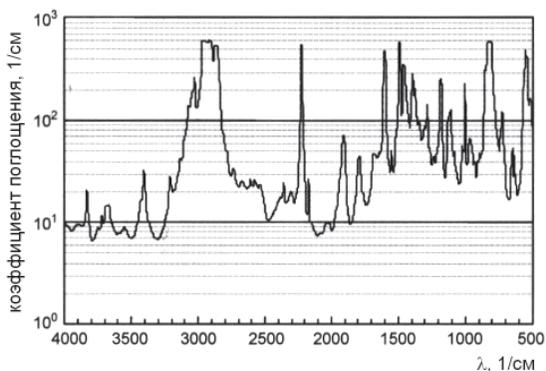


Рис. 2.20. Коэффициент поглощения 5ЦБ в ИК диапазоне при  $T = 50^\circ\text{C}$

спектры поглощения в видимой, ближней и дальней ИК области [86]. Минимум поглощения наблюдается вблизи  $\lambda = 0,8$  мкм. Известно, что коэффициент поглощения ЖК в средней (3–5 мкм) и дальней (7–14 мкм) областях ИК диапазона увеличивается от  $17 \text{ см}^{-1}$  (вблизи 3 мкм) до  $30\text{--}35 \text{ см}^{-1}$  (вблизи 5 мкм). В этой области находятся полосы валентных колебаний  $\text{C} = \text{C}$ ,  $\text{C} \equiv \text{C}$ ,  $\text{CH}_2$ -,  $\text{CH}_3$ -,  $\text{CN}$ -групп, колебаний  $\text{CN}$ -связей бензольного кольца.

Некоторые ЖК соединения содержат  $\text{CN}$ -группу, что приводит к возникновению в спектре интенсивной полосы ( $2225 \text{ см}^{-1}$ ), и кривая поглощения оказывается зависящей от химического состава соединений [86–89]. В случае применения ЖКМ в лазерной технике на узкой частоте излучения можно изменением молекулярной структуры минимизировать поглощение (рис. 2.19) [90].

На рис. 2.21 приведены примеры спектров пропускания для двух ЖК соединений в области 10 мкм, прозрачных для области генерации  $\text{CO}_2$ -лазера. Средние значения коэффициентов экстинкции ряда ЖК соединений в этом диапазоне приведены в табл. 2.7. На рис. 2.22 показаны полосы колебаний и частоты генерации для лазеров, используемых в этом диапазоне: HF (2,6–3,1 мкм), DF (3,6–4,1 мкм), CO (4,8–5,2 мкм) и HeNe (3,34–3,42 мкм). Отметим, что только излучение HeNe лазера попадает в область интенсивного поглощения, в то время как частоты остальных приходятся на окна прозрачности.

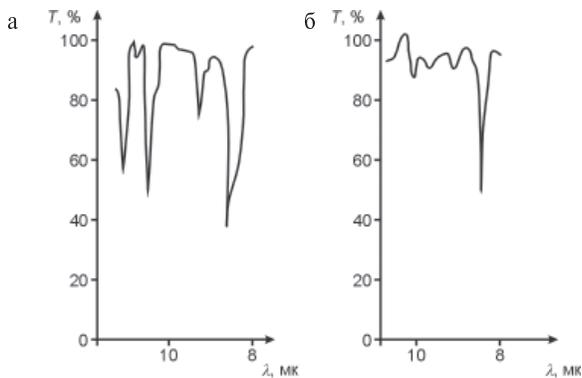


Рис. 2.21. Спектры пропускания ЖК в ИК области: а — 4-октил-4'-этилокситолан, б — 4(4'-пентилциклогексил) бензонитрил [86]

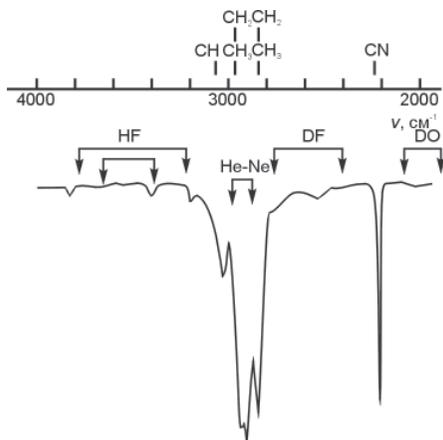


Рис. 2.22. Характерный спектр поглощения ЖК смеси в области 3–5 мкм в сопоставлении с областями генерации ряда наиболее распространенных типов лазеров [86]

Таблица 2.7

**Характеристики прозрачности для ряда ЖК соединений в области 10,6 мкм**

Соединение	Коэффициенты поглощения $K$ (см <sup>-1</sup> ) при длине волны (мкм)				Среднее
	10,57	10,59	10,62	10,65	
<chem>Cc1ccc(cc1)C#Cc2ccc(OC)cc2</chem>	1,57	17,7	16,4	16,1	16,5
<chem>Cc1ccc(cc1)-c2ccc(C#N)cc2</chem>	15,7	10,9	6,5	—	8,3
<chem>Cc1ccc(cc1)-c2c3c(c1)ccc3c2-c4ccc(C#N)cc4</chem>	146,5	69,9	32,5	27,7	69,1
<chem>Cc1ccc(cc1)-c2ccccc2-c3ccc(C#N)cc3</chem>	57,0	36,9	16,8	3,1	28,4
<chem>Cc1ccc(cc1)C(=O)Oc2ccc(C#N)cc2</chem>	52,8	45,9	34,8	21,9	38,9
<chem>Oc1ccc(O)cc1C=Nc2ccc(Cc3ccccc3)cc2</chem>	89,7	93,7	97,6	93,7	93,7

Наличие окон прозрачности открывает перспективы для использования ЖКМ в лазерной технике ИК диапазона, если лазерная прочность материала будет достаточна. В области среднего ИК диапазона порог лучевой прочности ЖКМ может превышать  $10 \text{ Дж/см}^2$  [86], что позволяет применять ЖКМ в силовых лазерных установках.

В широком диапазоне длин волн, в частности в диапазоне 7–14 мкм, поглощение достигает величины до  $10 \text{ см}^{-1}$ . Тогда для обеспечения пропускания более 90 % толщина ЖК элемента должна быть менее 100 мкм. Полосы поглощения на частотах колебаний зависят от параметров приведенных масс и упругости фрагментов молекулы. Обычно полосы валентных колебаний  $\text{C-H}$ ,  $\text{C-H}_2$  и  $\text{C-H}_3$  располагаются в диапазоне 3,2–3,8 мкм и характерны практически для всех синтезированных термотропных ЖКМ.

Соединения с более длинными алкильными цепями имеют большую интенсивность полос поглощения на частотах  $\text{C-H}_2$  из-за большего количества этих групп. В среднем ИК диапазоне находятся также полосы колебаний концевых групп  $\text{C-N}$  и соединительных групп  $\text{C}\equiv\text{C}$ . Их приведенные массы больше, чем у  $\text{C-H}$ -групп, и поэтому полосы поглощения располагаются на больших длинах волн. Однако, поскольку приведенные массы групп  $\text{C}\equiv\text{N}$  и  $\text{C}\equiv\text{C}$  мало отличаются друг от друга, полосы их колебаний лежат в области 4,5 мкм. В отличие от  $\text{C-N}$ -группы, полоса колебаний которой имеет острую форму и большую интенсивность, пик  $\text{C}\equiv\text{C}$  обладает меньшей интенсивностью. Соединительная группа  $(\text{C}\equiv\text{C})_2$  характеризуется двумя полосами поглощения небольшой интенсивности на 4,54 и 4,66 мкм. ЖКМ с полярной группой  $\text{NCS}$  обладают повышенным значением  $\Delta n$  и меньшей вязкостью по сравнению с ЖКМ, содержащими  $\text{C-N}$ -группу. Область их интенсивного поглощения лежит в широком диапазоне (4,3–5,3 и 10,3–11,2 мкм), что исключает их использование с  $\text{CO}_2$  лазерами.

Хотя  $\text{C}\equiv\text{C}$ -группа имеет такую же приведенную массу, как и ацетилен, двойная связь имеет меньшую жесткость, чем тройная, что проявляется в большем сдвиге полосы поглощения (6,25 мкм). В диапазоне 7–10 мкм за полосы поглощения ответственны колебания групп  $\text{C-O}$ ,  $\text{C-N}$  и  $\text{C-C}$ . На длине 10,6 мкм поглощение объясняется деформацией в плоскости  $\text{C-C}$ -группы ароматических колец. При дальнейшем увеличении длины волны поглощение плавно уменьшается вплоть до следующего пика поглощения с центром на длине волны 12,3 мкм, вызываемого колебаниями группы  $\text{C-N}$  вне плоскости колец. Связи  $\text{C-H}$ ,  $\text{C-H}_2$  и  $\text{C-H}_3$  имеют интенсивные полосы

колебаний с центром 3,4 мкм. Усиление водородной связи смещает пик поглощения до 4,5 мкм (полосы СН и СD на рис. 2.22). Увеличение Н-связи можно использовать для смещения поглощения в сторону больших длин волн в ИК диапазоне.

Результаты изучения спектров люминесценции ЖК и их применение для изучения фазовых переходов и в оптике ЖК приведены в работах [91–95].

### 2.4.3. Оптические свойства ХЖК

Холестерические ЖК являются оптически одноосными и имеют отрицательную оптическую анизотропию. Они обладают большой оптической активностью, круговым дихроизмом, селективно отражают свет и имеют необычную дисперсионную зависимость [96, 97]. Эти свойства определяются наличием спиральной структуры и тем, что шаг холестерической спирали может быть соизмерим с длиной волны падающего света. Вследствие селективного отражения белого света слоем ХЖК возникает окраска плоской текстуры. Если представить эту текстуру как дифракционную решетку с системой параллельных слоев толщиной  $p/2$  и средним показателем преломления  $n$ , то в результате интерференции длина волны света  $\lambda_0$ , имеющего максимальную интенсивность, будет подчиняться условию Вульфа-Брегга:

$$\lambda_0 = 2\bar{n} \cdot d \cdot \sin\Theta \quad (2.28)$$

где  $d = p/2$  — период решетки;  $\theta$  — угол между падающим лучом и холестерической плоскостью.

В случае нормального падения, когда  $\theta = 90^\circ$ ,

$$\lambda_0 = \bar{n} \cdot p \quad (2.29)$$

При нормальном падении света плоская текстура селективно отражает свет с длиной волны, равной шагу спирали. Синтезировано много ХЖК с шагом  $p \approx 400\text{--}800$  нм., для которых  $\lambda_0$  лежит в видимой области. Селективное отражение в окрестности  $\lambda_0$  означает, что освещенная белым светом плоская структура ХЖК будет окрашена в цвет, соответствующий  $\lambda_0$ .

Вблизи области селективного отражения коэффициент отражения  $R$  определяется выражением:

$$R = \frac{Q^3}{e^2 \pm \xi^2 \cdot \text{ctg}^2(v \cdot \xi)} \quad (2.30)$$

Здесь  $Q$  — коэффициент отражения на один виток спирали, равный

$\pi\delta_n/n$ ;  $e = -2\pi(\lambda - \lambda_0)$ ;  $\xi = \pm(Q^2 - e^2)^{\frac{1}{2}}$ ;  $v$  — число плоскостей, участвующих в отражении;  $\delta_n$  — двулучепреломление одного квазинематического слоя ( $\delta_n \approx 0,05$ );  $\lambda$  — длина волны света;  $\lambda_0$  — длина волны селективного отражения, на которой вращение плоскости поляризации изменяет свой знак [6].

Если  $-Q < e < Q$ , то  $\xi$  действительно и  $R = 1$ . В диапазоне  $\Delta\lambda = = p\delta_n$  — отражение полное. По обе стороны вне этого диапазона отражение резко уменьшается. Теоретическая и экспериментальная зависимости коэффициента отражения  $R = f(\lambda)$  приведены на рис. 2.23 [96].

Основным предметом исследований оптических свойств ХЖК является установление зависимости шага холестерической спирали  $p$  от концентрации оптически активной добавки  $C$  и температуры  $T$ . Первые исследования зависимости  $p$  от  $C$  смеси были проведены в работах [98, 99]. Различают 4 случая (рис. 2.24). В первом случае показана линейная зависимость  $1/p = f(C)$ , возможная тогда, когда молекулы НЖК и ХЖК химически подобны и отличаются лишь наличием оптически активного фрагмента в ХЖК. Смесь хирального нематика с его рацемическим аналогом дает величину  $p = \infty$

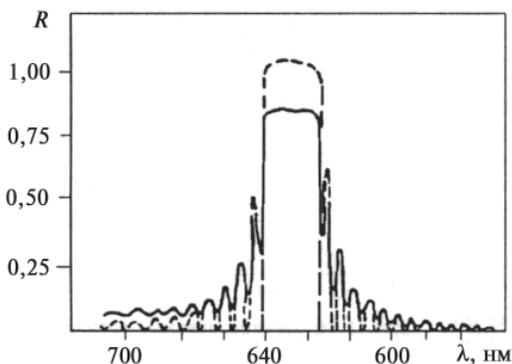


Рис. 2.23. Теоретическая (----) и экспериментальная (—) зависимости коэффициента отражения  $R$  для планарной текстуры холестерика от длины волны  $\lambda$ . Смесь холестерилнаноата, холестерилхлорида и холестерил-ацетата (21:15:6 по массе) при  $T = 24^\circ\text{C}$ . Толщина образца 2 мкм [96].

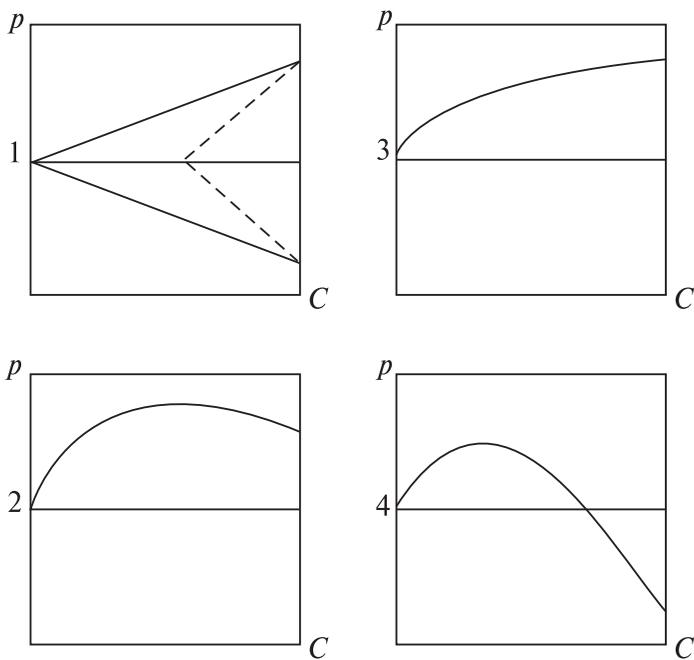


Рис. 2.24. Зависимости шага спирали  $p$  от концентрации оптически активной добавки

(соответствует  $C = 50\%$ , показанной пунктирной линией). Случай 2 обычно наблюдается для смесей НЖК с левовращающими эфирами холестерина. Однако иногда кривая этой зависимости не имеет максимума (случай 3). Случай 4 характерен для смесей НЖК с правовращающими добавками ХЖК.

Температурная зависимость шага немато-холестерической смеси является важнейшей ее характеристикой. Изменение шага спирали (или цвета) определяет применение ХЖК в термографии. С другой стороны, в электрооптических эффектах желательно, чтобы шаг не зависел от температуры. У большинства эфиров холестерина шаг спирали уменьшается с ростом температуры ( $dp/dT < 0$ ). П. Китинг разработал теорию [100], объясняющую отрицательную величину  $dp/dT$  для холестериков. Она основана на допущении ангармоничности сил, обеспечивающих относительную закрутку со-

седних планарных молекул с учетом их вязкости. Из этой теории следует линейная зависимость  $1/p = b_1 + b_2 \cdot T$ ; коэффициент  $b_2$  определяется экспериментально.

В немато-холестерических смесях наблюдаются все три типа зависимости  $p(T)$ . Например, в смеси БМАОБ и холестерилкаприната при содержании ХЖК до 12 % по массе  $dp/dT > 0$ , при 12–40 %  $dp/dT = 0$ , а при концентрации выше 40 %  $dp/dT < 0$  [101].

Многие авторы пытались предсказать ход зависимости  $dp/dT$ , однако связать структуру мезогена с температурной зависимостью  $dp/dT$  не удалось. Анализ теоретических представлений и экспериментальных данных приводит к результатам, представляющим два различных случая. Когда концентрация холестерика мала, нет источника для стерических помех. Характер зависимости  $p(T)$  определяется средней величиной угла закрутки, уменьшающейся с нарушением параметра порядка в направлении длинных молекулярных осей. Поэтому  $dp/dT > 0$ . Аналогичный результат получается для смеси холестерилхлорида и холестерилкаприната (смектоген) (рис. 2.25). Когда концентрация ХЖК велика, появляется источник стерических помех. С увеличением температуры возрастают негармоничные ротационные вибрации, что приводит к  $dp/dT < 0$ . При использовании немезогенов или хиральных нематиков в качестве оптически активных веществ реализуется первый случай, если концентрация оптически активной добавки мала. Пример такого поведения зависимости  $dp/dT$  приведен на рис. 2.26 [102]. При использовании оптически активных веществ, являющихся источником негармоничных ротационных вибраций, наблюдается зависимость  $dp/dT < 0$  даже при малых концентрациях добавки, поскольку их влияние существеннее, чем влияние производных холестерина. На рис. 2.27 показан такой пример при использовании в качестве добавки тигогенина и его производных.

Введение небольшого количества оптически активного вещества в смектогенную матрицу нематика приводит к типичному явлению в области фазового перехода, когда  $p \rightarrow \infty$ . Аналогичная картина наблюдается в эфирах холестерина, образующих смектик А. Существенное увеличение  $p$  при уменьшении  $T$  для большинства холестериков объясняется установлением ближнего порядка в смектической структуре.

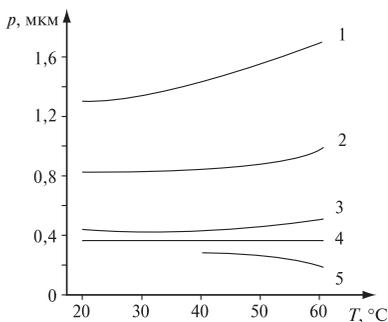


Рис. 2.25. Зависимость  $p(T)$  для смесей БМАОБ+ холестерил формиат: 1 — 5%; 2 — 10%; 3 — 20%; 4 — 27,5%; 5 — 80%

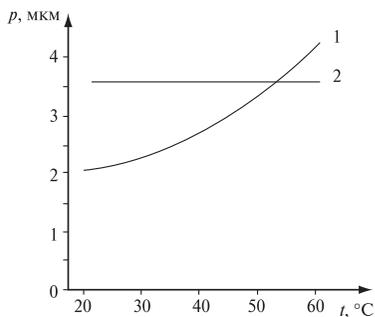


Рис. 2.26. Зависимость  $p(T)$  для смесей: 1 — 95% БМАОБ+5% L-ментилоксалата; 2 — 95% БМАОБ+5% ментилхлороацетата

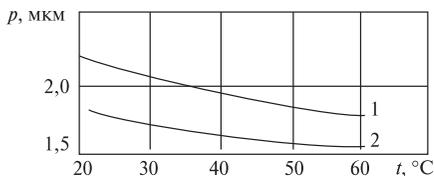


Рис. 2.27. Зависимость  $p(T)$  для смесей: 1 — 97% БМАОБ+3% тигогенинацетата; 2 — 97% БМАОБ+3% тигогенина

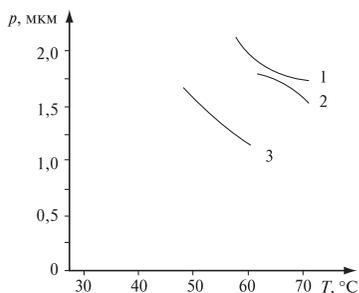


Рис. 2.28. Зависимость  $p(T)$  для смесей: 1 — 93% ЦООБ+7% холестерил формиат; 2 — 93% НПООБ+7% Cl; 3 — 95% НПО-ОБ+5% холестерил капронат

Как видно из рис. 2.27 и 2.28, смектогенные и несмектогенные эфиры холестерина как оптически активные добавки в смектогенной нематической матрице обеспечивают такую же зависимость  $p(T)$ , как и чистый холестерил в предпереходной фазе. Уменьшение шага спирали с повышением температуры наблюдается вплоть до видимого диапазона длин волн.

Раскрутка холестерической спирали осуществляется благодаря свойству нематического компонента образовывать фазы смек-

тик А или С (рис. 2.29). Если используется несмектогенный нематик, как, например, БОБА, то характер зависимости  $p(T)$  изменяется, становясь положительным (рис. 2.30). Таким образом, вид  $p(T)$  в немато-холестерической смеси зависит от наличия смектического порядка в нематической матрице. Это позволяет на основе холестерина и его производных получать различные зависимости  $p(T)$ .

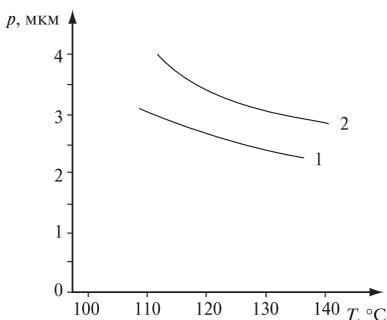


Рис. 2.29. Зависимость  $p(T)$  для: 1 — 97 % НОБА+3 % Cl; 2 — 97 % НОБА+3 % холестерил формиат

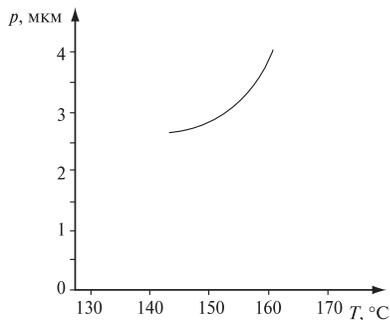


Рис. 2.30. Зависимость  $p(T)$  для смеси 95 % БОБА+5 % холестерил формиат

Оптические свойства хиральных нематиков описаны в работах [103—105]. В работе [104] было сформулировано простое правило относительно молекулярной структуры, абсолютной конфигурации и направления закрутки. При абсолютной конфигурация хирального центра  $S$  (левовращающий изомер) закрутка хирального нематика будет левовращающей в случае расположения хирального центра возле четного номера атомов, удаленных от кольца. Она будет правовращающей, если число атомов будет нечетным. Обратная ситуация возникает в случае, когда хиральный центр имеет  $R$ -конфигурацию.

При исследовании температурной зависимости  $p(T)$  в реальных условиях необходимо учитывать энергию сцепления ХЖК с подложкой [76].

Подводя итог рассмотрению оптических свойств ЖКМ, отметим их существенную зависимость от химической структуры, что открывает возможности для оптимизации при решении конкретных практических задач.

## 2.5. Магнитные свойства

ЖК являются диамагнетиками. Индуцированный магнитный момент  $M$  пропорционален напряженности внешнего поля  $H$ :

$$M = \chi \cdot H \quad (2.31)$$

где  $\chi$  — диамагнитная восприимчивость, имеющая отрицательный знак.

Диамагнитные восприимчивости описываются полярным тензором второго ранга, в котором  $\chi_{11} = \chi_{\perp}$  и  $\chi_{33} = \chi_{\parallel}$ . Этот тензор может быть записан в виде суммы симметричной и асимметричной части:

$$\chi_{ij} = \chi_{\perp} \cdot \delta_{ij} + \Delta\chi_{ni \cdot nj} \quad (2.32)$$

где  $\Delta\chi = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$  — диамагнитная анизотропия,  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Первые исследования диамагнитных свойств ЖК выполнены в 20-е годы [107–110]. Диамагнитная анизотропия ЖК может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Для нематиков и смектиков обычно  $\Delta\chi > 0$ . Следует заметить, что введение циклогексановых колец значительно понижает величину диамагнитной анизотропии, а производные бициклогексанов имеют величину  $\Delta\chi < 0$ , также как и эфиры холестерина. Магнитная анизотропия смесей получается аддитивным сложением  $\Delta\chi$  компонентов. Смешивая НЖК с разными знаками  $\Delta\chi$ , получают композицию с  $\Delta\chi = 0$ , что ценно для неразрушающего контроля, когда необходимо различать действие поля одной природы от другой.

На рис. 2.31 приведены зависимости  $\Delta\chi$  от температуры для нематической фазы ЦБ. Разработаны групповые методы расчета  $\Delta\chi$  [111]. Изучению диамагнитных свойств различных ЖК соединений посвящены работы [112–116]. Было установлено, что при нагревании некоторых анизометричных комплексов Ni(II) с основаниями Шиффа происходит перестройка их координации из плоской в тетраэдрическую, при этом они становятся парамагнитными и ориентируются в мезофазе магнитным полем. При охлаждении они проявляют обратимые парамагнитные свойства.

При изучении поведения металлосодержащих ЖК на основе производных Cu(II) и  $VO^{2+}$  в магнитных полях было подтверждено, что часть соединений ориентируется длинными осями параллельно, а часть перпендикулярно вектору  $H$ . Характер ориентации определяется соотношением диамагнитной и парамагнитной составляющих  $\Delta\chi$ . В случае ванадила они имеют одинаковое направление, и поэтому ориентируются длинными осями параллельно вектору

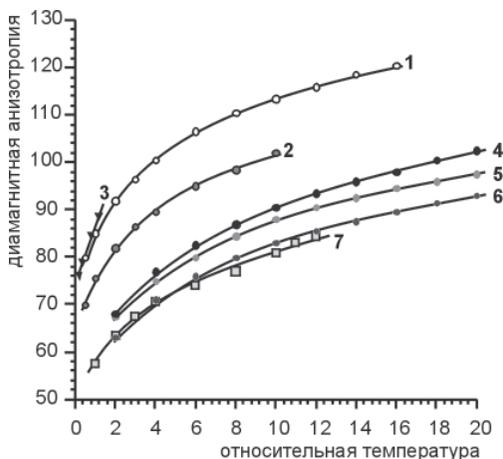


Рис. 2.31. Зависимость диамагнитной анизотропии [ $\cdot 10^{-12}$ ] от относительной температуры ( $T^{NI} - T$ ) °C для цианобифенилов: 1 — пентил, 2 — пентилокси, 3 — гептил, 4 — гептилокси, 5 — октилокси, 6 — гексилокси, 7 — нонил [111]

поля. В комплексах меди, где парамагнитный и диамагнитный компоненты анизотропии направлены противоположно, ориентация может быть параллельной и перпендикулярной. Анализ экспериментальных данных показал, что перпендикулярная ориентация происходит, если в молекуле комплекса меди имеется не более четырех бензольных колец.

Большинство органических ЖК имеет  $\Delta\chi$  порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  [117, 118]. Комплексные ЖК соединения диспрозия (III) и тербия (III) имеют  $\Delta\chi$ , более чем на два порядка превышающую характеристики известных ЖК [119, 120]. Интересных свойств можно ожидать от сегнетоэлектрических металломезогенов [121].

## 2.6. Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение ЖК  $\gamma$  — есть макроскопическое проявление сил межмолекулярного взаимодействия анизотропных ЖК на поверхности. Этот параметр определяет фазовые равновесия, переходы и используется при теоретических вычислениях и реше-

нии практических задач. К ним относятся обеспечение условий ориентации ЖКМ на подложке, обеспечение смачивания изучаемой поверхности при проведении неразрушающего контроля, обеспечение граничных условий «поверхность—ЖК» в капсулированных системах. Соотношение величин  $\gamma_{\text{ЖК}}$  и подложки влияет на устойчивость и возникновение гомеотропной или планарной ориентации и обеспечивает реализацию оптических эффектов. Введение поверхностно активных добавок в материал даже в ничтожно малых количествах может существенно изменить величину поверхностного натяжения.

Для измерения  $\gamma$  разработано несколько методов: капиллярного подъема, максимального давления в пузырьке газа, подвешенной капли, отрыва пластинки Вильгельми, рассеяния света на поверхностных волнах и метод кольца дю Нуа [122]. Для определения  $\gamma$  СЖК используют тонкие слои свободно стоящих пленок. Несмотря на большое число разработанных методов  $\gamma_{\text{ЖК}}$  изучено хуже других параметров. Экспериментальные данные разных авторов, относящиеся к одному и тому же материалу, часто оказываются противоречивыми [123–128]. В табл. 2.8 в качестве примера приведены результаты измерения  $\gamma$  для трех НЖК [123, 129–133].

Таблица 2.8

**Поверхностное натяжение  $\gamma$  (мН/м) для МББА, 5ЦБ и ПАА в области существования нематической мезофазы**

Метод ЖК	Пластинки Вильгельми	Кольца дю Нуа	Подвешен- ной капли	Капил- лярного подъема	Мениска	По спек- рам свето- рассеяния
МББА	32–35	32–34	28,5–35,8	20 для $\perp$ 32,5 для $\parallel$	32,3	38 $\pm$ 3
5ЦБ	28–30	29 – $\perp$ 34–41 – $\parallel$	28–32,8	15,2 – $\perp$ 24,3 – $\parallel$	27,9	
ПАА		39,5	37,2	38,6		38

Знаки  $\perp$  и  $\parallel$  означают ориентацию молекул ЖК относительно подложки, определяемую по коноскопической картине в поляризационный микроскоп.

Анализ данных показывает, что при точности измерений 1–1,5 % разброс результатов составляет до 30 % даже при одном методе измерений. Реакция исследователей оказалась столь же различной. Одни заявили, что  $\gamma$  ЖК вообще невозможно измерить точно, поскольку поверхность ЖК непрерывно движется [126]. Другие объясняли разброс несовершенством методик и стремились устранить эту причину.

Для решения практических задач требуется использование ЖК с различной величиной  $\gamma$ . Было проведено систематическое исследование  $\gamma$  ЖК различных структур. Результаты измерения для отдельных соединений и смесей приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

### Поверхностное натяжение некоторых НЖК

№ п/п	Соединение или смесь	$\gamma$ , мН/м	$T$ , °С	Метод
1	ПАА	38	125	3
		37	120	1
2	ПАФ	31,2	145	3
3	5ЦБ	28,1	31,5	2
		27,9	20	2
4	6ЦБ	28,8	20	4
		28,5	30	—
5	8ЦБ	26,2	41	2
6	5-гептил-2-(цианфенил)пиримидин	26,5	50	4
7	смесь МББА и <i>n</i> -бутилоксибензилиден – <i>n</i> '-гексиланилина (1:1)	29,0	18	4
8	Смесь азоксисоединений и циано-бифенилов	27,4	18	4
9	Смесь на основе цианобифенилов	30,8	18	4
10	Эвтектическая смесь МББА и ЭББА	30,1	18	4
11	Смесь на основе толанов	26,1	18	4
12	Смесь на основе бициклооктанов	35,0	18	4

Обозначения: 1 — метод подвешенной капли; 2 — метод Вильгельми; 3 — метод капиллярного поднятия; 4 — метод мениска.

Из табл. 2.9 видно, что  $\gamma_{\text{ЖК}}$  различных структур существенно различаются. Анализ результатов изменения  $\gamma_{\text{ЖК}}$  для 71 образца мезогенов показал следующее. Максимальной величиной  $\gamma$  (38 мН/м) обладают азоксисоединения и смеси на основе бициклооктанов и оснований Шиффа, минимальной (26,1 мН/м) — смеси на основе толанов и цианобифенилов. Точность измерения  $\gamma$  использованного бесконтактного метода по отражению луча лазера от мениска не превышала  $\pm 0,2$  мН/м [131]. Большой разброс данных по  $\gamma$  для МББА заставил проанализировать достоверность полученных результатов. Возможны следующие причины разброса: различная степень очистки вещества, различие методик и условий измерения (температура, равновесие с паром, время формирования устойчивого состояния) [133].

Влияние степени очистки вещества впервые изучалось методом пластинки Вильгельми в работе [134]. Была обнаружена зависимость  $\gamma$  от чистоты вещества в области изотропного перехода. Для высокоочищенных материалов в интервале мезофазы  $\gamma$  имела несколько большую величину. Однако измерения  $\gamma$  при 25 °С для МББА, имевшего температуру перехода в изотропную фазу 47 °С, дали 32,0 мН/м, а для образца МББА с температурой просветления 43,2 °С — 32,4 мН/м [133]. Небольшие различия величины  $\gamma$  не объясняют наблюдаемый разброс только разной чистотой материала.

Жидкокристаллическое состояние предполагает существование анизотропного межмолекулярного потенциала. Поскольку  $\gamma$  возникает благодаря избыточной энергии молекул на поверхности, то она будет зависеть от ориентации молекул ЖК параллельно или перпендикулярно к поверхности. В этой связи возникает вопрос: что в действительности мы измеряем при использовании существующих методик, и каков вклад  $\Delta\gamma$  в разброс значений  $\gamma$ . В литературе имеются об этом также достаточно противоречивые данные [131, 135–137].

Расчеты  $\Delta\gamma$ , учитывающие только Ван-дер-Ваальсовы силы взаимодействия, приводят к соотношению  $\gamma_{\parallel} < \gamma_{\perp}$  [138–141]. Эти расчеты применимы для ЖК с  $\Delta\epsilon < 0$ , у которых дипольный момент вдоль длинной оси мал, а вне осевой дипольный момент усредняется. В результате молекулы укладываются планарно в плоскости раздела ЖК-воздух.

Возможны три случая ориентации (рис. 2.32), которым будут соответствовать значения поверхностного натяжения, обозначаемые как  $\gamma_{\parallel}$ ,  $\gamma_{\perp}^P$  (для полярных ЖК) и  $\gamma_{\perp}^M$  (для неполярных ЖК). Как след-

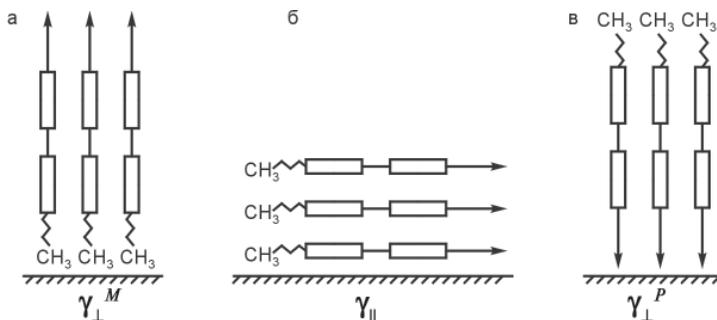


Рис. 2.32. Три возможных случая ориентации молекул ЖК:  
 а) гомеотропная — для неполярных ЖК; б) планарная — для полярных и неполярных ЖК; в) гомеотропная — для полярных ЖК

ствии возможно появление отрицательной и положительной  $\Delta\gamma$  [133]. В [134] для 8 соединений различных структур, измеренных при одинаковых условиях,  $\gamma_{\parallel} > \gamma_{\perp}$ , причем  $\Delta\gamma$  достигала для отдельных образцов почти 50 %.

Температурная зависимость  $\gamma$  для НЖК различной химической структуры во всем температурном интервале мезофазы с использованием единой методики, позволяющей сопоставить результаты, изучалась в работах [131, 142–144]. Измерения проводились методом мениска у вертикальной стенки [126], а при малых количествах исследуемого вещества (0,5–1 мл) использовался метод подвешенной капли. Результаты измерения разными методами хорошо совпадали в пределах погрешности эксперимента. Термостатирование и измерение температуры проводились с точностью  $\pm 0,2$  °С. Величины плотности измерялись на пикнометре с точностью  $\pm 0,005$  г/см<sup>3</sup>. На рис. 2.33 приведена зависимость  $\gamma = f(T)$  для гомологических рядов алкил- и алкилоксицианофенилбензо-

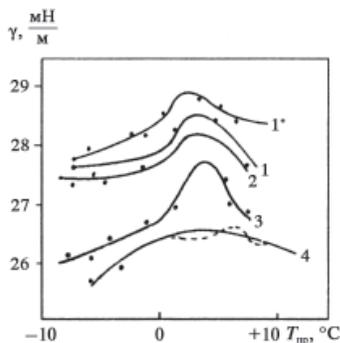


Рис. 2.33 Зависимость поверхностного натяжения  $\gamma$  от приведенной температуры  $T_{пр}$  для НЖК гомологических рядов цианофенилов [6, табл. 4.21]

атов. Кривые для нематиков одного и того же ряда подобны, причем величина  $\gamma$  уменьшается с увеличением номера гомолога. Это объясняется тем, что увеличение длины боковой цепи молекулы при увеличении номера гомолога увеличивает молярный объем  $V = M/\rho$ , где  $\rho$  — плотность, что уменьшает межмолекулярное взаимодействие и, следовательно, приводит к уменьшению  $\gamma$ .

Температурная зависимость  $\gamma$  для гомологического ряда цианобифенилов показана на рис. 2.34. Как видно из графиков, все изученные ЖК имеют максимальное значение  $\gamma$  после перехода в изотропную фазу. Пик кривых в этой зоне более чем на 5 % превышает монотонное изменение функции  $\gamma = f(T)$  при точности измерения 1 % от абсолютного значения.

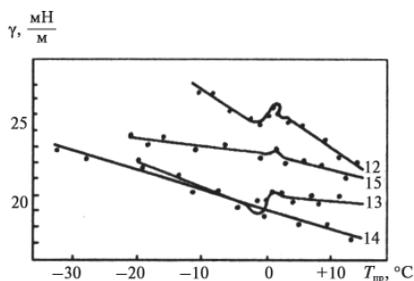


Рис. 2.34. Зависимость поверхностного натяжения  $\gamma$  от приведенной температуры  $T_{\text{пр}}$  для ЖК различных структур [6, табл. 4.21]

Результаты работ [129, 145–153] привели к неожиданным выводам о существенной зависимости  $\gamma$  от времени. Для различных структур эта зависимость различна: если для 5ЦБ  $\gamma$  практически постоянна, то для МББА значения  $\gamma$  за один час изменились от 32 мН/м до 28,5 мН/м. Для установления стабильного термодинамического состояния поверхности ЖК требуется от 4 до 10 часов, что объясняется вязкостью ЖК. Природа этого явления зависит от ряда факторов, из которых важнейшими являются процессы переориентации молекул ЖК на поверхности. Это подтверждают данные о влиянии  $\Delta\mu$  на результаты измерений  $\gamma$ . Нельзя исключать и присутствия молекул газа на границе с ЖК, которое влияет на изменение  $\gamma$ , что проявляется в формировании смектоподобных слоев, сохраняющихся в изотропной фазе. Полученные

результаты могут потребовать пересмотра данных, полученных на ранней стадии исследований  $\gamma$ . Возможность вычисления величины поверхностного натяжения ЖК, исходя из знания его химической структуры, показана в работе [154] и монографии [6].

Поверхностное натяжение ХЖК и СЖК изучено в меньшей степени. Зависимость  $\gamma = f(T)$  для холестерилстеарата представлена на рис. 2.35а в виде монотонно возрастающей кривой, имеющей локальный максимум в районе фазового перехода в ИЖ. Аналогичный вид кривой имеет холестерилмиристрат при охлаждении смектической фазы. При нагревании ход кривой  $\gamma = f(T)$  изменяется (рис. 2.35б) [155].

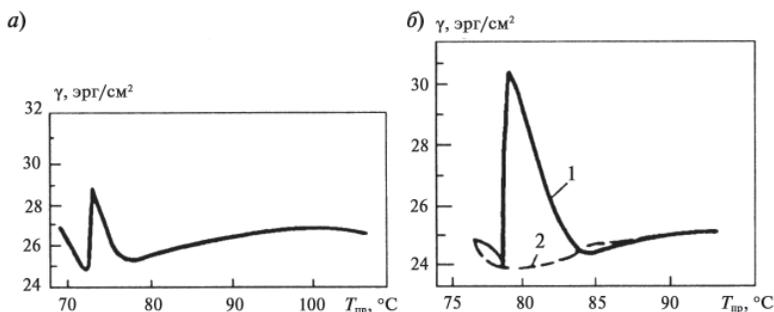


Рис. 2.35. Зависимость поверхностного натяжения  $\gamma$  ХЖК от приведенной температуры  $T_{\text{пр}}$ : а) холестерилстеарат, б) холестерилмиристрат при скорости охлаждения  $0,15^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ; 1 – охлаждение, 2 – нагрев вещества

Имеющиеся экспериментальные данные  $\gamma = f(T)$  для семи гомологов холестерина характеризуются нелинейной зависимостью с увеличением  $\gamma$  при переходе из холестерической в изотропную фазу [128]. Приведенные в той же работе результаты по измерению  $\gamma$  смектиков показывают, что поверхностное натяжение либо постоянно, либо возрастает с температурой, что объясняется дополнительной смектической упорядоченностью на поверхности нематической и, возможно, изотропной фаз [156–159].

Определение  $\gamma_{\text{ЖК}}$  тесно связано с задачей определения критического поверхностного натяжения  $\gamma_{\text{К}}$  граничащей твердой подложки. Результаты измерения  $\gamma_{\text{К}}$  для ряда ориентантов, выполненные с точностью не менее  $\pm 0,5 \text{ мН/м}$ , приведены в табл. 2.10 [160].

Полученные результаты подтверждают литературные данные для ориентантов этих классов [123]. Большинство проведенных экспери-

**Поверхностное натяжение стеклянных подложек  
с разными ориентантами**

Тип ориентанта	$\gamma_K$ , мН/м	Примечание
Полиэтилгидросилоксановая жидкость ГКЖ-94	25,5	—
Ориентант на основе кремний-органики	24,5	—
Полиимидная смола	37,0	без натирания

ментов по определению ориентации различных структур ЖК подтвердили правило, согласно которому, если  $\gamma_{ЖК} > \gamma_K$ , то возникает гомеотропная ориентация; если  $\gamma_{ЖК} < \gamma_K$  — планарная. Редкое исключение составили результаты для ориентантов на основе алкоксисиланов [161].

Результаты изучения поверхностного натяжения ЖК материалов и подложек с различными ориентантами показывает их существенные различия. Это позволяет с учетом изложенных представлений обоснованно выбирать их необходимые сочетания для обеспечения требуемых условий ориентации в оптических элементах, приборах и регистрирующих средах [162].

### 2.7. Вязкость

НЖК и ХЖК имеют вязкость, сравнимую с вязкостью обычных жидкостей. В изотропной фазе их вязкость характеризуется коэффициентом  $\eta_{ИЗ}$ , который определяют капиллярным методом с помощью стандартного вискозиметра. В мезофазе вязкость ЖК зависит от ориентации директора. В случае простого сдвигового потока при фиксированной ориентации директора вязкость описывается тремя коэффициентами Миесовича (рис. 2.36):

- $\eta_1$ , когда директор параллелен градиенту скорости;
- $\eta_2$ , когда директор параллелен направлению потока;
- $\eta_3$ , когда директор перпендикулярен скорости и градиенту скорости.

На рис. 2.37 даны температурные зависимости этих коэффициентов для смеси азоксисоединений А, химический состав которой приведен ранее. В температурном интервале существования мезофазы  $\eta_1 > \eta_3 > \eta_2$ , причем  $\eta_3$ , является как бы продолжением  $\eta_{ИЗ}$ .

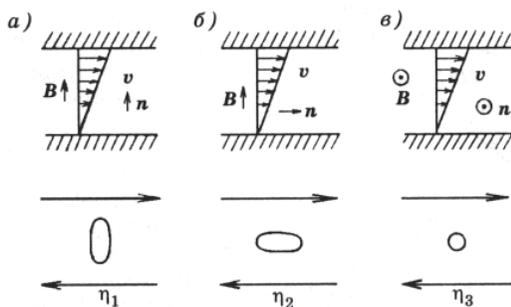


Рис. 2.36. Геометрия изменения  $\eta_1$  (а),  $\eta_2$  (б) и  $\eta_3$  (в)

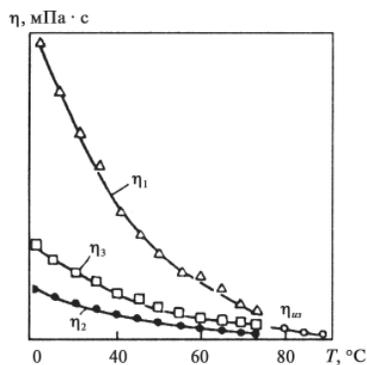


Рис. 2.37. Зависимость коэффициентов вязкости  $\eta$  от температуры  $T$  для смеси А

Если директор не фиксирован, то его собственное движение может быть учтено введением коэффициентов вязкости  $\nu_1$ , когда движение ЖК отсутствует и возможен лишь поворот директора, и  $\nu_2$ , когда есть и движение и поворот директора. Коэффициент  $\nu_1$  называют коэффициентом вращательной вязкости. Времена отклика ЖК элементов прямо пропорциональны вращательной вязкости  $\nu_1$ . Она сильно зависит от температуры, но строго теоретического описания для различных молекулярных структур до сих пор не получено. Попытки теоретического описания с учетом структурных особенностей и наиболее полные экспериментальные данные и методики приведены в [163–166], однако из-за сложных анизотроп-

ных стерических взаимодействий их нельзя считать удовлетворительными. Результаты исследований показали, что вязкость НЖК в основном определяется размером и формой молекул, поляризуемостью заместителей и дипольным моментом молекулы.

Общее выражение для  $v_1$  описывается уравнением:

$$v_1 = (\alpha_0 + \alpha_1 S + \alpha_2 S^2) \exp \frac{ES^m}{k(T - T_0)} \quad (2.32)$$

Здесь  $\alpha_j$  — константы пропорциональности,  $E$  — энергия активации диффузии,  $m$  — показатель степени,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_0$  — температура плавления.

Было предложено несколько упрощенных модификаций уравнения (2.32) для предсказания экспериментальных значений [167]:

$$v_1 = \alpha_0 \cdot \exp \frac{E}{kT} \quad (2.33)$$

$$v_1 = \alpha_1 \cdot S \cdot \exp \frac{E}{kT} \quad (2.34)$$

$$v_1 = \alpha_1 \cdot S^2 \cdot \exp \frac{E}{kT} \quad (2.35)$$

$$v_1 = \alpha_2 \cdot S^2 \cdot \exp \frac{E \cdot S}{kT} \quad (2.36)$$

$$v_1 = \alpha_2 \cdot S^2 \cdot \exp \frac{E \cdot S}{k(T - T_0)} \quad (2.37)$$

$$v_1 = \alpha_2 \cdot S^2 \cdot \exp \frac{E \cdot S^2}{k(T - T_0)} \quad (2.38)$$

$$v_1 = (\alpha_1 \cdot S + \alpha_2 \cdot S^2) \cdot \exp \frac{E}{kT} \quad (2.39)$$

$$v_1 = \alpha_1 \cdot S \cdot \exp \frac{E_1}{kT} + \alpha_2 \cdot S^2 \cdot \exp \frac{E_2}{kT} \quad (2.40)$$

Уравнение (2.33) представляет собой хорошо известное уравнение Аррениуса (1889 г.). Уравнение (2.34) использовано для описания экспериментальных данных по изучению двух изомеров п-метилокси-п'-бутилазоксibenзолов [5]. Уравнения (2.35, 2.36) предложены для

описания характеристик МББА [168, 169]. Уравнения (2.37, 2.38) выведены из разработанной теории свободного объема [170, 171]. Эмпирическое выражение (2.39) [172] явилось модификацией уравнения, выведенного в работе [173]. Зависимость (2.40) предложена в работе [174]. В ней авторы установили, что для нематиков с длинной цепью сопряжения  $\alpha_2 = 0$ , а для соединений, содержащих фрагменты с насыщенной связью,  $\alpha_1 = 0$ . Несмотря на различия в предлагаемых описаниях вращательной вязкости бесспорно определяющими параметрами являются энергия активация и температура [175].

С молекулярной точки зрения, линейные молекулы ЖК обладают малой вязкостью [176]. Однако при этом необходимо учитывать и другие свойства ЖКМ. Например, линейные структуры обладают малой упругостью, что приводит к увеличению точки плавления. В одном и том же гомологическом ряду соединения с более длинной цепью обычно имеют меньшую величину  $T_{пл}$  и больший момент инерции. Это приводит к тому, что гомолог с большей длиной цепи имеет большую вязкость.

Методы измерения коэффициентов вязкости НЖК описаны в работах [177, 178]. При помещении в ориентированные слои ЖК микрочастиц и изучении их движения под действием углового момента, создаваемого светом, появились новые возможности в изучении микровязкости ЖК [179].

Необычные вязкостные свойства ЖК позволяют использовать их как необычные смазочные материалы в технике и медицине [180].

## 2.8. Упругие свойства

Упругие свойства ЖК определяют их поведение во внешних полях, от них зависят такие характеристики, как управляющее напряжение, крутизна вольт-контрастной кривой, время отклика и другие характеристики.

Основная разница между деформациями ЖК и твердых тел заключается в том, что в отличие от твердого тела изменение расстояния между молекулами (неоднородное растяжение или сжатие) не меняет упругую энергию. Деформации сжатия-растяжения очень малы, а деформация сдвига приводит к течению. Поэтому в ЖК наиболее ярко проявляются деформации изгиба поля директора. После снятия внешнего воздействия директор возвращается к исходному равновесному положению под действием упругих сил. Другой особенностью ЖК является их упругость, связанная с локаль-

ным изменением ориентации директора. Различают три основных типа деформации в ЖК [181]: поперечный изгиб (рис. 2.38а) — *splay* (*S*-деформация); кручение (рис. 2.38б) — *twist* (*T*-деформация), продольный изгиб (рис. 2.38в) — *bend* (*B*-деформация).

Плотность свободной энергии записывается уравнением:

$$F = F_0 + F_d \quad (2.41)$$

где  $F_0$  — плотность свободной энергии недеформированного слоя ЖК;  $F_d$  — плотность свободной энергии, связанной с изгибными деформациями.

Величина  $F_d$  определяется структурой ЖК. Для нематиков:

$$F_d = 1/2[K_{11}(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + K_{22}(\mathbf{n} \operatorname{rot} \mathbf{n})^2 + K_{33}(\mathbf{n} \times \operatorname{rot} \mathbf{n})^2] \quad (2.42)$$

Для холестериков  $F_d$  записывается как

$$F_d = 1/2[K_{11}(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + K_{22}(\mathbf{n} \operatorname{rot} \mathbf{n} + t_0)^2 + K_{33}(\mathbf{n} \times \operatorname{rot} \mathbf{n})^2] \quad (2.43)$$

где  $t_0$  — параметр, характеризующий спиральное закручивание в отсутствие внешних деформаций ( $t_0 = \pi/p$ ,  $p$  — шаг спирали);  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  — константы упругости поперечного изгиба, кручения и продольного изгиба.

Обычно при изучении взаимодействия ЖК с поверхностью рассматриваются случаи, когда упругая деформация директора либо плоская, либо радиально-симметричная, и упругой энергией кручения можно пренебречь. При решении простых задач используется одноконстантное приближение:  $K_{11} = K_{22} = K_{33} = K$ . Тогда уравнение (2.42) существенно упрощается:

$$F_d = 1/2K[(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + (\operatorname{rot} \mathbf{n})^2] \quad (2.44)$$

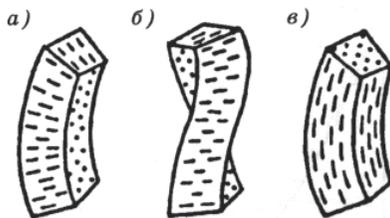


Рис. 2.38. Основные виды деформации ЖК: а) поперечный изгиб; б) кручение; в) продольный изгиб

Типичное значение модулей  $K_{11}$ ,  $K_{33}$  —  $1 \cdot 10^{-6}$  дин. Уменьшение модулей упругости НЖК приводит к повышению чувствительности слоя НЖК к внешним воздействиям. Именно этим сильным изменением направления локального поля директора при слабом внешнем воздействии, сопровождаемым сильным изменением оптических свойств НЖК слоя, объясняется основная причина эффективного применения НЖК в оптических эффектах.

Отношение упругих энергий, затрачиваемых при обычном сжатии НЖК, когда изменяется плотность вещества, и при искажении его ориентации приблизительно равно  $(d/\alpha)^2$ , где  $d$  — толщина слоя,  $\alpha$  — характерный размер молекулы [182]. Полагая  $d = 1$  мкм,  $\alpha = 2$  нм (для МББА), получаем  $(d/\alpha)^2 = 0,25 \cdot 10^6$ . Столь высокая чувствительность НЖК делает их уникальной средой для регистрации слабых внешних воздействий различной природы.

В смектиках А деформация кручения и продольного изгиба невозможны без разрушения слоев. Они описываются специальным модулем упругости В.

Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал, связанный с изучением констант упругости, позволяет сделать следующие обобщения [30]. Значения констант упругости имеют порядок  $10^{-11}$  Н. Во всех случаях  $K_{22}$  меньше  $K_{11}$  и  $K_{33}$ . Равновесное распределение директора  $n$  существенно зависит от отношения констант упругости  $K_{33}/K_{11}$ , которое фактически определяет оптические и электрические свойства слоев НЖК. Типичные значения отношений  $K_{33}/K_{11}$  и  $K_{22}/K_{11}$  лежат в пределах:  $0,5 < K_{33}/K_{11} < 3,0$ ;  $0,5 < K_{22}/K_{11} < 0,8$ . В первом приближении все константы упругости пропорциональны квадрату параметра порядка  $S$ . Соотношение выполняется тем лучше, чем ближе по величине  $K_{33}$  и  $K_{11}$ . В нематиках, обнаруживающих при понижении температуры смектическую фазу, наблюдается в предпереходной зоне резкое увеличение  $K_{33}$  и  $K_{22}$ . Величина констант упругости коррелирует с величиной отношения длины молекулы к диаметру, однако, эта зависимость разная для различных боковых групп и лучше описывает молекулы с жестким остовом. Так, например, для молекул без алкильных цепей  $K_{33}/K_{11}$  изменяется как отношение квадратов длины к диаметру. В гомологических рядах, когда увеличение алкильной цепи приводит к увеличению степени ближнего смектического порядка,  $K_{33}/K_{11}$  падает с увеличением номера гомолога.

Существуют методы измерения  $K_{11}$ ,  $K_{33}$  и отношения  $K_{33}/K_{11}$  по двулучепреломлению и емкости слоя НЖК при переходе Фредерик-

са в зависимости от амплитуды приложенного поля, по рассеянию света и относительному размеру дисклинаций [3]. Модули упругости можно определить из пороговых значений напряжения  $U_n$  и напряженности  $H_n$  для переходов Фредерика в электрическом и магнитных полях соответственно:

$$U_n = \left( 4\pi K_{ii} / \Delta\epsilon \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

$$H_n = \pi / d \left( K_{ii} / \Delta\chi \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.46)$$

где  $\Delta\epsilon$  и  $\Delta\chi$  — соответственно диэлектрическая и диамагнитная анизотропия ЖКМ;  $K_{ii}$  — модуль упругости, зависящий от ориентации директора;  $d$  — толщина слоя ЖКМ.

Измерение  $K_{33}/K_{11}$  по относительному двулучепреломлению является наиболее простым, не требующим предварительных данных о диэлектрических или диамагнитных постоянных НЖК [183]. Модуль упругости  $K_{22}$  может быть определен как по порогу переориентации твистовой структуры при воздействии магнитного поля, так и по напряжению перехода из холестерической в нематическую фазу при раскрутке спирали.

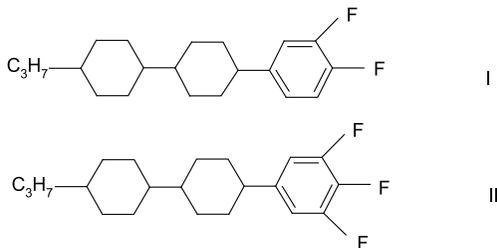
В последние годы большое внимание при описании плотности свободной энергии было уделено учету влияния поверхности. Для этого для расчета свободной энергии используют уравнение:

$$F = \int dV \{ f_F - K_{24} \nabla [ \mathbf{n} (\nabla \mathbf{n}) + \mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n} ] + K_{13} \nabla [ \mathbf{n} (\nabla \mathbf{n}) ] \}, \quad (2.47)$$

где помимо стандартных объемных членов в  $f_F$  ( $K_{11}$ ,  $K_{22}$  и  $K_{33}$ ) вводятся дополнительные члены  $K_{24}$  и  $K_{13}$ . Изучению этих параметров посвящены работы [184–186]. Константы упругости в ЖК элементах оказывают влияние на пороговое напряжение  $U_n$  и время отклика. Зависимость  $U_n$  от констант упругости для планарно ориентированной ячейки характеризуется так: чем меньше будут величины констант упругости, тем меньше будет пороговое напряжение. С другой стороны, время отклика ЖК элемента пропорционально вязкоупругому коэффициенту, представляющему собой отношение  $\nu_1/K_f$ . Это значит, что малые величины констант упругости невыгодны для получения малых времен отклика. Следовательно, необходим компромисс между величинами  $U_n$  и временами отклика.

Для установления связи констант упругости с молекулярными параметрами было развито несколько теорий, из которых наибольшее распространение получила теория среднего поля [187–189]. Она предсказывает, что отношения  $K_{11}:K_{22}:K_{33} = 1:1:(z/x)^2$ , где  $x$  и  $z$  — геометрические параметры молекулы.

На рис. 2.39 показаны графики температурной зависимости констант упругости  $K_{ii}$  для двух F-содержащих соединений [34]:



Во всех случаях  $K_{33} > K_{11} > K_{22}$ . С увеличением температуры  $K_{ii}$  уменьшаются. Соединения с более линейной структурой, т. е. с большим отношением ( $x/z$ ) имеют большие величины констант упругости. Исходя из моделирования молекулярной упаковки [188], отношение длины к ширине для бициклогексафенилов с двумя и тремя F-группами составляет соответственно 3,76 и 3,62. В этой связи соединения с двойной F-группой имеют большие величины констант упругости, чем соединения с тройной F-группой, что подтверждается графиками на рис. 2.39.

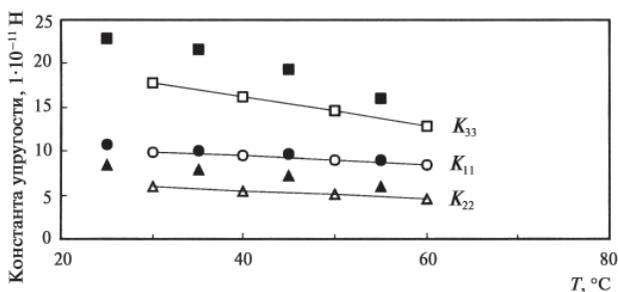


Рис. 2.39. Зависимость константы упругости  $K_{ii}$  от температуры для соединений I (черные значки) и II (белые значки)

Поскольку для известных соединений и смесей выполняется условие  $K_{33} > K_{11} > K_{22}$ , то ориентация ЖК играет заметную роль в уменьшении времени отклика. Так, например, ячейка с планарной ориентацией будет иметь меньшие времена отклика, чем твистовая ячейка ввиду влияния констант упругости, если прочие параметры, такие как величина зазора и вязкость будут одинаковы.

Физические свойства разнообразных структур ЖК при различных граничных условиях позволяют реализовать многочисленные оптические эффекты в ЖК.

## Литература к главе 2

1. Physical properties of liquid crystals / Ed. G.W. Gray et al. Weinheim: Wiley-VCH. 1999. 503 p.
2. Physical properties of liquid crystals: nematics // Ed. D.A. Dunmur et al. EMIS. Datareviews Series. № 25. 2001. 671 p.
3. *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов. М. Мир. 1977. 400 с.
4. *Чандрасекар С.* Жидкие кристаллы. М. Мир. 1980. 344 с.
5. *Де Жё В.* Физические свойства жидкокристаллических веществ. М. Мир. 1982. 150 с.
6. *Томилин М.Г., Пестов С.М.* Свойства жидкокристаллических материалов. СПб. Политехника. 2005. 296 с.
7. *Alben R., McColl J.R., Shih C.S.* The characterization of order in nematic liquid crystals // Solid State Comm. 1972. Vol. 11. P. 1081–1084.
8. *Maier W., Saupe A.* Einfache molekularstatistische Theorie der nematischen Phase // Z. Naturforsch. 1958. Bd. 13A. № 7. S. 564–566.
9. *McMillan W.L.* Simple molecular theory of the smectic C phase // Physics Review A. 1975. Vol. 8. № 4. P. 1921–1929.
10. *Wulf A.* Steric model for the smectic C phase // Physics Review A. 1975. Vol. 11. № 1. P. 365–375.
11. *Bartolino R., Doucet J., Durand G.* Molecular tilt in the smectic C phase: a Zig-zag model // Annales de Physique. 1978. Vol. 3. P. 389–396.
12. *Brown G., Shaw W.* The mesomorphic state. Liquid crystals // Chem. Rev. 1957. Vol. 57. P. 1049.
13. *Gray G.W.* Molecular structure and the properties of liquid crystals. London: Acad. Press. 1962. 314 p.
14. *Knaak L.E., Rosenberg H.M., Serve M.P.* Estimation of nematic-isotropic points of NLCs // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1972. Vol. 17. P. 171.
15. *Thiemann Th., Vill V.* // Liq. Cryst. 1997. Vol. 22. №4. P. 519.
16. *Johnson S.R., Jurs P.C.* Prediction of the clearing temperatures of a series of liquid crystals from molecular structure // Chem. Mater. 1999. Vol. 11. P. 1007–1023.

17. *Kraenz H., Vill V., Meyer B.* Prediction of material properties from chemical structures. The clearing temperature of NLCs derived from their chemical structures by artificial neural networks // *J. Chem. Inf. Comput. Sci.* 1996. Vol. 36. P. 1173–1177.
18. *Schroeder R., Kranz H., Vill V., Meyer B.* Predicting the transition temperature of smectic liquid crystalline compounds from their structure using artificial neural networks // *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2.* 1996. P. 1685–1689.
19. *Аверьянов Е.М.* Изменение температуры фазового перехода НЖК-изотропная жидкость в гомологических рядах // *Журн. физ. хим.* 1985. Т. 59. № 9. С. 2145–2148.
20. *Аверьянов Е.М.* Изменение температуры фазового перехода НЖК-изотропная жидкость в гомологических рядах каламитных жидких кристаллов // *Журн. физ. хим.* 2003. Т. 77. № 8. С. 1383–1392.
21. *Advances in computer simulations of liquid crystals* / Ed: P. Pasini, C. Zannoni. Kluwer. Dordrecht: Reidel Publ. 2000.
22. *Vill V.* Liquid crystals / *Landolt-Boernstein. N.S. Vol. IV/7 a-f.* Springer: Berlin, 1992–1995.
23. *De Jeu W.H., Gerritsma C.J., Goossens W.J.A., van Zanten P.* Relaxation of the dielectric constant and electrohydrodynamic instabilities in a LC // *Phys. Lett.* 1972. Vol. 39A. P. 355–356.
24. *Барник М.И., Блинов Л.М., Иващенко А.В., Штыков Н.М.* Диэлектрические свойства многокомпонентных смесей НЖК // *Кристаллография.* 1979. Т. 24. Вып. 4. С. 811–816.
25. *Рюмцев Е.И., Полушин С.Г., Ковшик А.П., Адоменас П.В.* Молекулярные механизмы диэлектрической поляризации и ее релаксации в НЖК // *Кристаллография.* 1979. Т. 24. Вып. 3. С. 547–552.
26. *Рюмцев Е.И., Полушин С.Г., Ковшик А.П.* и др. «Изотропный» механизм дисперсии нормальной составляющей диэлектрической проницаемости ЖК // *Докл. АН СССР.* 1979. Т. 244. Вып. 6. С. 1344.
27. *Рюмцев Е.И., Полушин С.Г., Ковшик А.П., Адоменас П.В.* Механизм дипольной поляризации НЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией // *Кристаллография.* 1980. Т. 25. Вып. 2. С. 343.
28. *Rjuntsev E.I., Kovshik A.P., Ragimov D.A.* Dielectric relaxation in LC with (CH<sub>2</sub>) in molecules // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1999. Vol. 331. P. 21–26.
29. *Томилин М.Г., Шешкаускас В.А., Ковшик А.П.* Оптико-физические свойства ЖК. Температурно-частотная зависимость диэлектрической анизотропии новых ЖК композиций // *Опт. и спектр.* 1981. Т. 51. Вып. 6. С. 1043–1046.
30. *Гребенкин М.Ф., Иващенко А.В.* Жидкокристаллические материалы. М.: Химия, 1989. 288 с.
31. *Рюмцев Е.И., Ковшик А.П., Рагимов Д.А.* и др. Диэлектрическая дисперсия в ЖК растворах мезогенных молекул, содержащих алкильные спейсеры // *Докл. АН.* 1999. Т. 366. №2. С. 213–215.

32. The physics and chemistry of liquid crystal devices / Ed: G.J. Sprikel. New York: Plenum Press. 1980.
33. *Saiton G., Satoh M, Hasegawa E.* Estimating dielectric anisotropy of LC compounds // *Mol. Cryst Liq. Cryst.* 1997. Vol. 301. P. 13–18.
34. *Naemura S.* Liquid crystals for multimedia display use: materials and their physical properties // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 1997. Vol. 424. P. 295.
35. *Сукиасян С.С., Акопян С.А., Саркисян А.Ц.* и др. Температурная и частотная зависимость диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь холестерилкапроната и холестерилацетата // *Изв. АН Арм. ССР, Физика.* 1976. Т. 11. С. 72–79.
36. *Rjumtsev E.I., Kovshik A.P., Saburov B.S., Umursokov R.M.* Dielectric relaxation in mixtures with of LC with different molecular length // *Mol. Cryst Liq. Cryst.* 1997. Vol. 303. P. 331-339.
37. *Островский Б.И., Рабинович А.З., Сонин А.С., Струков Б.А.* Диэлектрические свойства геликоидального СЖК // *ЖЭТФ.* 1978. Т. 74. Вып. 5. С. 1748–1759.
38. Uchida T. Recent progress of liquid crystal displays // *ASID'00. Xi'an. P.R.China.* 2000. P. 72-77.
39. *Грожек В.А., Адоменас П.В.* Предварительная оценка рефрактометрических параметров НЖК двухкольчатого строения // *Тез. докл. IV межд. конф. соц. стран по ЖК.* Тбилиси. 1981. С. 413–414.
40. *Wu S.T., Lim K.C.* Absorbtion and scattering meaurments of NLCs // *Appl. Opt.* 1987. Vol. 26. P. 1722.
41. *Jones J.C., Raynes E.P., Towler M.J.* et al. Dielectric biaxility in Smectic C host systems // *Mol. Cryst Liq. Cryst.* 1991. Vol. 199. P. 277–285.
42. *Блинов Л.М.* Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука. 1978. 384 с. ; *Blinov L.M.* Structure and properties of liquid crystals. Springer. 2011. P. 439.
43. *Dewar M., Riddle R.* Factors influencing the stabilities of NLCs // *J. Amer. Chem. Soc.* 1975. Vol. 12. P. 6658.
44. *Nakazono Y., Ichinose H., Sawada A.* et.al. // *Int. Display Research Conf.* 1997. P. 65.
45. *Naemura S.* Recent progress in LC materials for AMLCDs // *Proc. Asia Display'98.* 1998. P. 3.
46. *Tarao R., Saito H., Sawada A.* et.al. Advances in LCs for TFT displays // *SID Tech. Digest.* 1994. Vol. 25. P. 233.
47. *McCoy J.B., Kowalczyk L.S.* Thermal conductivity of some mesomorphic compounds // *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.* 1960. Vol. 56. № 30. P. 11–14.
48. *Picot J.J.C., Fredrickson A.G.* Interfacial and electrical effects on thermal conductivity of NLCs // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1968. Vol. 7. P. 84–89.
49. *Yun C.K., Picot J.J.C., Fredrickson A.G.* Thermal conduction near an interface in a NLC subjected to a magnetic field // *J. Appl. Phys.* 1971. Vol. 42. № 12. P. 4764–4767.

50. *Seiberle H., Schadt M.* LC conductivity and cell parameters: their influence on TN and STN LCDs // *Mol. Cryst Liq. Cryst.* 1994. Vol. 239. P. 229–244.
51. *Hartshorne N.H.* Optical properties of liquid crystals / In: *Liquid crystals and plastic crystals.* Chichester: Horwood. 1974. Vol. 2. P. 24–61.
52. *Wu S.-T.* Liquid crystal materials for display applications // *ASID'00.* Xi'an. P. R. China. 2000. P. 78–98.
53. *Uchida T.* Recent progress of liquid crystal displays // *ASID'00.* Xi'an. P. R. China. 2000. P. 72–77.
54. *Wu S.-T., Wu C.-S.* A three band model for LC birefringence dispersion // *J. Appl. Phys.* 1989. Vol. 66. P. 5297.
55. *Цветков В.Н.* Экспериментальное исследование структуры анизотропных жидкостей. Докт. дисс. Л.: ЛГУ. 1940. 200 с.
56. *Меланхолин Н. М., Грум-Гржимайло С.В.* Методы исследования оптических свойств кристаллов. М.: АН СССР. Ин-т кристаллографии. 1954. 191 с.
57. *Грозжик В.А., Адоменас П.В.* Возможности априорной оценки величины двулучепреломления нематогенных соединений // Сб. тез. 3-го НТС «Оптические свойства ЖК и их применение». М.: ЦНИИИ. 1981.
58. *Бахшиев Н.Г., Болотин Б.М., Ковшик А.П.* и др. Оптико-физические свойства жидкокристаллических 4-н-алкилоксисалицилиден-4'-н-алкиланилинов // *Ж. прикл. спектр.* 1983. Т. 38. Вып. 3. С. 429–434.
59. *Адоменас П.В., Болотин Б.М., Ковшик А.П., Томилин М.Г.* Оптическая анизотропия новых низкотемпературных нематических ЖК композиций // *Опт. и спектр.* 1983. Т. 54. Вып. 2. С. 302–307.
60. *Lazarev P.I., Paukshto M.V.* Low-leakage off-angle in E-polarizers // *J. SID.* 2001. № 9/2. P. 101–105.
61. *Ohtsuka T., Ohnishi H., Takatsu H.* Optical properties of nematics for applications / In: *Physical properties of liquid crystals: nematics.* / Eds.: D.A. Dunmur et al. Stevenage: EMIS, Datareviews series, No. 25. 2001. P. 515–522.
62. *Spadlo A., Dabrowski R., Dziaduszek J., Urban S., Scibior E., Gauza S., Wu S.-T.* Liquid crystalline material with high birefringence // *Опт. журн.* 2005. Том 72. № 9. С. 10–13.
63. *Dabrowski R., Dziaduszek J., Stolarz Z., Kedzierski J.* Liquid crystalline material with low ordinary index // *Опт. журн.* 2005. Том 72. № 9. С. 14–19.
64. *Wu S.T., Neubert M.E., Keast S.S.* et al. Wide nematic range alkenyl diphenyldiacetylene LCs // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 77. P. 957.
65. *Wand M.D., Vohra R.T., Thurmes W.N.* et al. // *Ferroelectrics.* 1996. Vol. 180. P. 333.
66. *Wu S.T., Sherman E., Margerum J.D.* et al. High solubility and low viscosity dyes for guest-host displays // *Asia Display'95.* 1995. P. 567.
67. *De Gennes P.G., Prost J.* The physics of liquid crystals. Oxford: Clarendon Press. 1995. 597 p.
68. *Wu S.T., Hsu C.S., Shyu K.F.* High birefringence and wide nematic range bistolane liquid crystals // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 74. P. 344.

69. *Wu S.T., Hsu C.S., Chuang Y.Y.* et al. Physical properties of polar bistolanes liquid crystals // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. Vol. 39. L. 38.
70. *Mada H., Kobayashi S.* Wavelength and voltage dependence of refractive indices of nematic liquid crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1976. Vol. 33. P. 47–53.
71. *Anderson M.H., Jones J.C., Raynes E.P.* et al. Optical studies of thin layers of Smectic C materials // *Journ. of Phys. D.* 1991. V. 24. P. 338–342
72. *Wu S.T., Lim K.C.* Absorbtion and scattering meaurments of NLCs // *Appl. Opt.* 1987. Vol. 26. P. 1722.
73. *Kahn F.J.* Projection displays // *SID Seminar Lecture Notes.* 1994. Vol. 2.
74. *Kirov N., Simova P.* Vibrational spectroscopy of liquid crystals. Sofia. 1984. 329 p.
75. *Sackmann H., Rehn D.* Fluorescence polarization measurement on molecular oriented in liquid crystals // *Chem. Phys. Letters.* 1970. Vol. 4. P. 537–540.
76. *Sackmann H., Mohvald H.* On optical polarization measurements in LCs // *J. Chem. Phys.* 1973. Vol. 58. № 12. P. 537–540.
77. *Haase W., Wedel H.* The application of NLCs as anisotropic solvent in the optical absorbtion spectroscopy for determination of the polarization of electronic transitions of organic molecules and Cu (II)-complexes // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1977. Vol. 38. P. 61–65.
78. *Ильчишин И.П., Тихонов Е.А.* Особенности спектров поглощения и флуоресценции растворов полиметиновых красителей в ориентированных ЖК // *Укр. физ. журн.* 1980. Т. 25. № 8. С. 1257–1262.
79. *Dolganov V.K., Bolotin B.M.* Determination of the molecular arrangement in LC by polarization of fluorescence // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1978. Vol. 47, № 3/4. P. 179–184.
80. *Долганов В.К.* Проявление упорядоченности ЖК структуры в электронных спектрах // *Физ. тв. тела.* 1977. Т. 19, Вып. 11. С. 3269–3273.
81. *Баранова Г.И., Глебовский Д.Н., Бахшиев Н.Г.* Ориентационные свойства НЖК в электрическом поле и их спектры // В сб.: «Оптика жидких кристаллов». Труды ГОИ. 1986. Т. 60. Вып. 194. С. 25–31.
82. *Центер М.Я., Бобович Я.С., Белявская Н.М.* О проявлениях нематического порядка в спектрах комбинационного рассеяния застеклованных ЖК б-бензолазо-(анизол- б'- нафтиламина) // *Опт. и спектр.* 1970. Т. 29. Вып. 1. С. 53-55.
83. *Clark T.* Handbook of computational chemistry. New York: Wiley. 1985.
84. *Либов В.С., Перова Т.С.* Низкочастотная колебательная спектроскопия нематических жидких кристаллов // В сб.: Оптика жидких кристаллов. Труды ГОИ. 1986. Т. 60. Вып. 194. С. 3–25.
85. *Либов В.С., Перова Т.С.* Низкочастотная спектроскопия межмолекулярных взаимодействий в конденсированных средах // В сб.: Оптика жидких кристаллов. Труды ГОИ. 1992. Т. 81. Вып. 215. 193 с.
86. *Багров И.В., Грязнова М.В., Данилов В.В.* и др. ЖК модуляторы как лазерно-оптические элементы для среднего ИК диапазона // *Опт. и спектр.* 1999. Т. 87. № 5. С. 853–864.

87. Данилов В.В. Природа сольватохромии кетоцианинов в МББА // Хим. физ. 1983. Т. 2. № 2. С. 168–174.
88. Аржеухова Н.А., Данилов В.В., Либов В.С. Изучение сольватохромии кетоцианинов в ЖК по спектрам поглощения и флуоресценции // Журн. физ. хим. 1982. Т. 54. № 8. С. 1987–1992.
89. Wu S.T. Absorbtion measurements of LCs in the UV, visible and infrared // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. P. 4468.
90. Wu S.T., Margerum J.D., Meng H.B. et.al. Potential LC mixtures for CO<sub>2</sub> laser application // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64. P. 1204.
91. Subramanian R., Patterson L.K., Levanon H. Luminescence behavior as a probe for phase transitions and eximer formation in LC dodecycloxyanobiphenyl // Chem. Phys. Lett. 1982. Vol. 93. P. 578–581.
92. Tatan T. et.al. Picosecond time-resolved fluorescence spectra of LC: fluorescence behavior related to phase transitions in cyanooctyloxybiphenyl // Chem. Phys. Letters. 1984. Vol. 104. P. 485–488.
93. Данилов В.В., Мазуренко Ю.Т., Савельев Д.А. Перенос энергии электронного возбуждения в ЖК // Опт. и спектр. 1984. Т. 57. № 4. С 784–752.
94. Данилов В.В., Савельев Д.А. Некоторые аспекты использования люминесцентных методов в оптике ЖК // В сб.: Оптика жидких кристаллов. Труды ГОИ. 1986. Т. 60. Вып. 194. С. 31–43.
95. Zanoni C.A. Theory of time dependent fluorescence depolarization of florescence // Mol. Phys. 1979. Vol. 38. № 6. P. 1813–1827.
96. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука. 1983. 320 с.
97. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: ВО «Наука». 1994. 214 с.
98. Saeva F.D., Wyszocki J.J. Induced circular dichroism in ChLCs // J. Am. Chem. Soc. 1971. Vol. 93. P. 5928.
99. Nakagiri T., Kodama H., Kobayashi K.K. Helical twisting power in mixtures of nematic and cholesteric LCs // Phys. Rev. Lett. 1971. Vol. 27. P. 564.
100. Keating P.N. Theory of cholesteric mesophase // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1969. Vol. 8. P. 315.
101. Chilaya G.S. Induction of chirality in nematic phases // Rev. Phys. Appl. 1981. Vol. 16. P. 193–208.
102. Лисецкий Л.Н., Тимман Б.Л., Тищенко В.Г., Колотий О.Д. Молекулярно-статистическая теория холестерических смесей с учетом сил стерического отталкивания // Укр. физ. журн. 1978. Т. 23. № 1. С. 94–99.
103. Gray G.W., McDonnall D.G. New low-melting cholesteragens for electrooptical displays and surface thermography // Electron. Lett. 1975. Vol. 11. P. 556.
104. Gray G.W., McDonnall D.G. Optically active liquid crystals mixtures and LC devices containing them // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1977. Vol. 34. P. 217.
105. Gray G.W. Advances in LC materials for applications. BDH Chem. Ltd. 1978.

106. *Goossens W.Y.A.* Molecular theory of the cholesteric phase // *Phys. Lett.* 1976. Vol. 31A. P. 413.
107. *Foex G., Royer L.* Diamagnetisme des substances nematiques // *C. R. Acad. Sci.* 1925. Vol. 180. P. 1912.
108. *Foex G.* Diamagnetisme des substances mesomorphes; orientation des corps smectiques par le champ magnetique // *C. R. Acad. Sci.* 1927. Vol. 184. P. 147.
109. *Foex G.* Magnetic properties of mesomorphic substances. // *J. Phys. (Paris)*. 1929. Vol. 10. P. 421.
110. *Foex G.* Magnetic properties of mesomorphic substances. Analogues with ferromagnetics. // *Trans. Faraday Soc.* 1933. Vol. 29. P. 958.
111. *Stannarius R.* Diamagnetic properties of nematic liquid crystals / In: *Handbook of liquid crystals* / Ed.: D. Demus. Weinheim: Wiley-VCH, 1998. Vol. 2A. P. 102–127.
112. *Buka A., de Jeu W.H.* Diamagnetism and orientational order of NLCs // *J. Phys. (Paris)*. 1982. Vol. 43. № 2. P. 361–367.
113. *Knepe H., Reiffenrath V., Schneider F.* Anisotropy of the magnetic susceptibility of some NLCs // *Chem. Phys. Lett.* 1982. Vol. 87. № 1. P. 59–62.
114. *Schad H., Osman M.A.* Physical properties of nematic mixtures. // *J. Chem. Phys.* 1981. Vol. 75. P. 880–885.
115. *Gasparoux H., Regaya B., Prost J.* Proprietes magnetiques de substances nematiques. Etude du PAA et du MBBA. // *C. R. Acad. Sci.* 1971. Vol. 272 B. P. 1168.
116. *De Jeu W.H., Bordewijk P.* Physical studies of nematic azoxybenzenes. II. Refractive indices and the internal field. // *J. Chem. Phys.* 1978. Vol. 68. № 1. P. 109–115.
117. *Mueller H.J., Haase W.* Magnetic susceptibilities and the order parameters of some 4,4'-substituted biphenyl cyclohexanes // *J. Phys. (Paris)*. 1983. Vol. 44. № 10. P. 1209–1213.
118. *Shad H., Baur G., Meier G.* Investigation of the dielectric constants and diamagnetic anisotropies of cyanbiphenyls, cyanpentylcyclohexanes and cyanocyclohexylcyclohexanes in the nematic phase // *J. Chem. Phys.* 1979. Vol. 71. P. 3174.
119. *Домрачева Н.Е., Галяметдинов Ю.Г., Манапов П.А.* и др. Магнитные свойства и структурные особенности мезогенного комплекса Fe(III) // *Физ. тв. тела*. 1994. Т. 36. № 8. С. 2154–2161.
120. *Bikchantaev I., Galyametdinov Yu., Prosvirin A.* et al. Correlation between magnetic properties and molecular structure of some metallomesogens // *Liq. Cryst.* 1995. Vol. 18. № 2. P. 231–237.
121. *Vajena M.I., Espinet P., Ros M.B.* et al. Ferroelectric behavior on metal containing LC // *J. Amer. Chem. Soc.* 1994. Vol. 116. P. 1899–1906.
122. *Адамсон А.* Физическая химия поверхности. М.: Мир. 1979. С. 3–38.
123. *Коньяр Ж.* Ориентация НЖК и их смесей. Минск: Изд-во «Университетское». 1986. 101 с.

124. Мочалин С.Н. Поверхностное натяжение жидких кристаллов // Уч. зап. ИвГПИ. Иваново. 1972. Т. 99. С. 321–338.
125. Лукьянченко Е.С., Козунов В.А., Григос В.И. Ориентация НЖК // Успехи химии. 1985. Т. 54, Вып. 2. С. 214–238.
126. Gannon M.G., Faber T.E. The surface tension of NLC // Phil. Mag. 1978. Vol. 37. P. 117–137.
127. Матвеевко В.Н., Кирсанов Е.А. Поверхностные явления в НЖК // Успехи химии. 1986. Т. 55. Вып. 8. С. 1319–1343.
128. Матвеевко В.Н., Кирсанов Е.А. Поверхностные явления в ЖК. М: Изд-во МГУ. 1991. 272 с.
129. Song B., Springer J. Surface phenomena of liquid crystalline substances // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1997. Vol. 293. P. 39–65.
130. Cognard J. The anisotropy of the surface tension of polar liquids: The case of LCs // J. Adhesion. 1984. Vol. 17. P. 123–134.
131. Корженевский В.А., Лебедев В.И., Левичев С.А., Томилин М.Г. Измерение параметров, определяющих ориентацию ЖК в электрооптических элементах // Журнал ОМП. 1984. № 2. С. 19–21.
132. Pestov S.M., Tomilin M.G. How to predict NLC material's surface tension // Book of abstr. 19 ILCC'2002. Edinburgh. 2002. P. 743.
133. Пестов С.М., Томилин М.Г. Поверхностное натяжение термотропных ЖК // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2002. Вып. 1. С. 125–133.
134. Neumann A.W., Springer R.W., Bruce R.T. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1974. Vol. 27. P. 23.
135. Беляев С.В., Малимошенко Н.В., Береснев Г.А. Ориентация ЖК на границе с воздухом // Кристаллография. 1989. Т. 34. № 5. С. 1213–1216.
136. Tzvetkov V.A., Tzvetkov O.V., Balandin V.A. Anisotropic properties of the LC surface tension // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1998. Vol. 329. P. 305–312.
137. Нерсисян С.Р., Оганесян В.О., Пахалов В.Б. Измерение анизотропии поверхностного натяжения свободного слоя нематика МББА с помощью перехода Фредерикса в магнитном поле // Изв. АН Арм. ССР. Физика. 1986. Т. 21. Вып. 1. С. 29–33.
138. Okano K., Marakami. Van der Waals dispersion force contribution to the interfacial free energy of nematic LCs // J. Physique. 1979. Vol. 40. C3. P. 525.
139. Parsons L.D. Ordering and distortion at the nematic-isotropic fluid interface // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1975. Vol. 31. P. 79.
140. Parsons L.D. A molecular theory of surface tension in NLCs // J. Phys. C. 1976. Vol. 37. P. 1187.
141. Perez E., Proust J.E. // J. Phys. Lett. 1977. Vol. 38. P. 117–120.
142. Буйка З.А., Корженевский В.А., Томилин М.Г. Поверхностное натяжение нематиков гомологического ряда 4-цианфениловых эфиров 4-н-алкилоксибензойных кислот // Межвуз. сб.: Вопросы физики формообразования и фазовых превращений. Калинин: КГУ. 1986. С. 60–63.

143. *Адоменас П.В., Корженевский В.А., Томилин М.Г.* Температурная зависимость поверхностного натяжения в гомологических рядах жидкокристаллических цианопенилбензоатов и цианобифенилов // Журн. физ. химии. 1988. Т. 62. № 12. С. 3337–3338.
144. *Korzhenevsky V.A., Tomilin M.G.* Experimental investigation of NLC surface energy // *Liq. Cryst.* 1993. Vol. 15. № 5. P. 643–649.
145. *Калиникова Н.И.* Поверхностное натяжение параазоксифенола // Труды каф. теор. и эксперим. физики Калининградского ГУ. Калининград. 1969. С. 25–30.
146. *Калиникова Н.И.* Поверхностное натяжение некоторых НЖК // Сб.: Жидкие кристаллы. Ив.ГПИ. 1978. С. 110–116.
147. *Schwarz W.M., Mosely H.W.* The surface tension of LCs // *J. Phys. Coll. Chem.* 1947. Vol. 51. P. 826.
148. *Горский Ф.К., Сакевич Н.М.* Определение межфазной энергии на границе твердой и ЖК фаз // Кристаллография. 1968. Т. 12. С. 586.
149. *Krishnaswamy S., Shashidhar R.* Measurement of the surface tension of CVOOA // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1977. Vol. 38. P. 353–356.
150. *Krishnaswamy S., Shashidhar R.* Experimental studies of the surface tension of NLCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1976. Vol. 35. P. 253–259.
151. *Krishnaswamy S., Shashidhar R.* Experimental determination of the surface tension of NLCs // *Pramana, Suppl.* 1975. Vol. 1. P. 247–252.
152. *Chen G.-H., Springer J.* Surface phenomena of liquid crystalline substances: Surface tension of freshly formed droplets // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1997. Vol. 307. P. 89–101.
153. *Song B., Springer J.* Surface phenomena of liquid crystalline substances: Temperature-dependence of surface tension // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1997. Vol. 307. P. 69–88.
154. *Pestov S.M.* Calculation of properties of mesogenic substances // *Abstr. 6 Europ. Conf. on LCs. Halle. 2001.* 2P-18.
155. *Мочалин С.Н., Кузнецов В.С., Петухов В.Н.* Исследование температурной зависимости поверхностного натяжения ХЖК // Сб.: Жидкие кристаллы. Иваново. 1987. С. 102–105.
156. *Лаврентович О.Д., Тарахан Л.Н.* О температурной зависимости поверхностного натяжения на границе ЖК-изотропная среда // *Поверхность.* 1990. Т. 1. С. 39–44.
157. *Лаврентович О.Д., Тарахан Л.Н.* Аномалии температурной зависимости поверхностного натяжения холестерилпеларгоната на границе с глицерином // *Журн. тех. физ.* 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 2071–2073.
158. *Stannarius R., Cramer C.* Surface tension measurements in freely suspended bubbles of thermotropic SmLCs // *Liq. Cryst.* 1997. Vol. 23. № 3. P. 371–375.
159. *Stannarius R., Cramer C.* Self-supporting bubbles of thermotropic Sm-LCs // *Europhys. Lett.* 1998. Vol. 42. № 1. P. 43–48.

160. *Zisman W.A.* Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution // In: *Advances on Chemistry Series*. Wash.: Am. Chem. Soc. 1964. № 43. P. 1–51.
161. *Uchida T., Ishikawa K., Wada M.* Liquid surface alignment and surface energy // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1980. Vol. 60. P. 37–52.
162. *Томилин М.Г.* Явления на границе ЖК с твердой подложкой // *Опт. журн.* 1997. Т. 64, № 5. С. 58–87.
163. *Singh S.* Liquid crystals: fundamentals World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2002. 531 p.
164. *Беляев В.В.* Вязкость НЖК // *Успехи химии.* 1989. Т. 58, Вып.10. С. 1601–1670.
165. *Беляев В.В.* Физические методы измерения коэффициентов вязкости НЖК // *Успехи физ. наук.* 2001. Т. 171. № 3. С. 267–298.
166. *Беляев В.В.* Вязкость НЖК. М.: Физматлит. 2002. 222 с.
167. *Wu S.-T., Yang D.-K.* Reflective LCDs. Chichester: Wiley. 2001. P. 35–64.
168. *Hess S.* Irreversible thermodynamics of nonequilibrium alignment phenomena in molecular liquids and LCs // *Z. Naturforsch.* 1975. Bd. 30A. S. 1224.
169. *Knepe H., Schneider F., Sharma N.K.* Rotational viscosity of NLCs // *J. Chem. Phys.* 1982. Vol. 77. P. 3203.
170. *Martins A.F., Diogo A.C.* Simple molecular statistical interpretation of the nematic viscosity. // *Portgal. Phys.* 1975. Vol. 9. P. 1.
171. *Diogo A.C., Martins A.F.* Thermal behavior of the twist viscosity in a series of homologous NLCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1981. Vol. 66. P. 133.
172. *Wu S.-T., Wu C.S.* Rotational viscosity of NLCs // *Liq. Cryst.* 1990. Vol. 8. P. 171.
173. *Itura H., Okano K.* Temperature dependence of the viscosity coefficients of LCs // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1972. Vol. 11. P. 1440.
174. *Беляев В.В., Иванов С., Гребенкин М.Ф.* Температурная зависимость вращательной вязкости НЖК // *Кристаллография.* 1985. Т. 30. С. 674.
175. *Osipov M.A., Terentjev E.M.* Rotational diffusion and rheological properties of LCs // *Z. Naturforsch.* 1989. Bd. 44A. S. 785.
176. *Wu S.T., Wu C.S.* Experimental confirmation of Osipov-Terentjev theory on the viscosity of LCs // *Phys. Rev. A.* 1990. Vol. 42. P. 2219.
177. *Moscicki J.K.* Measurements of viscosities in nematics / In *Physical properties of liquid crystals: nematics*. Ed. D.A. Dunmur. EMIS. Datareviews Series. № 25. 2001. P. 387–404.
178. *Martins A.F.* Measurements of viscoelastic coefficients for nematic mesophases using magnetic resonance / In *Physical properties of liquid crystals: nematics*. Ed. D.A. Dunmur. EMIS. Datareviews Series. № 25. 2001. P. 404–413.
179. *Asavei T., Stligoe A., Maucort A., Rubinstein H.* Optical tweezers and angular momentum of the light // *Abstr. Of the RIAO-OPTICALS 2010, Lasers, Optics, Photonics.* Sept. 20–24, 2010. Lima. Peru. P.410.
180. *Ермаков С.Ф., Родненков В.Г., Белоенко Е.Д., Купчинов Б.И.* Жидкие кристаллы в технике и медицине. Черо: Асар. Минск. 2002. 412 с.

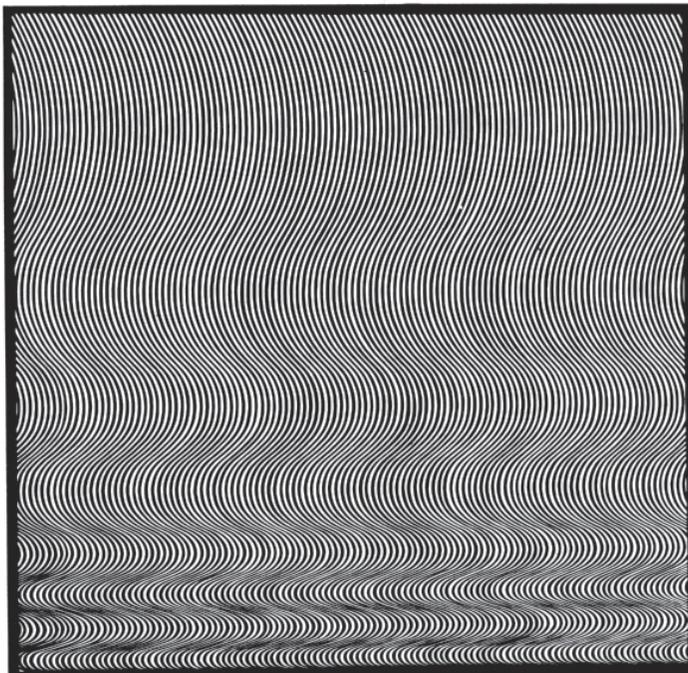
181. *Bradshaw M.J., Raynes E.P., Bunning J.D., Faber T.E.* The Frank constants of some NLCs // *J. Phys. (Paris)*. 1985. Vol. 46. № 9. P. 1513–1520.
182. *Meyerhofer D.* Elastic and dielectric constants in mixtures of NLCs // *J. Appl. Phys.* 1975. Vol. 46, № 12. P. 5084–5087.
183. *Чиринов В.Г., Гребенкин М.Ф.* Определение констант упругости  $k_{11}$  и  $k_{33}$  и коэффициента вязкости  $\eta$  НЖК из ориентационных электрооптических эффектов // *Кристаллография*. 1975. Т. 20. Вып. 6. С. 1240–1244.
184. *Hinov H.P.* On the variation of the  $k_{13}$  nematic surface-like volume energy and the nematic surface energy of Mada // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1987. Vol. 148. P. 197–224.
185. *Lavrentovich O.D., Pergamenschchik V.M.* Stripe domain phase of a thin nematic film and the  $k_{13}$  divergence term // *Phys. Rev. Lett.* 1994. Vol. 73. № 7. P. 979–982.
186. *Sparavigna A., Lavrentovich O.D., Strigazzi A.* Periodic stripe domains and hybrid-alignment regime in NLCs: threshold analysis // *Phys. Rev. E*. 1994. Vol. 49. № 2. P. 1344–1352.
187. *Maier W., Saupe A.* A simple molecular statistical theory for NLC phase. II // *Z. Naturforsch.* 1960. Bd. 15A. S. 287.
188. *Gruler H.* The elastic constants of NLC // *Z. Naturforsch.* 1975. Bd. 30A. S. 230.
189. *Gelbert W.H., Ben-Shaul A.* Molecular theory of curvature elasticity in NLCs // *J. Chem. Phys.* 1981. Vol. 77. P. 916.

## Часть II

### ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Явления — облик невидимых вещей.

Анаксагор, V в. до н. э.



Бриджит Райли. Падение.

Оптические эффекты заключаются в изменении оптических характеристик ЖК при приложении электрических, магнитных, тепловых и световых полей, а также при механических и химических воздействиях. Особенностью оптических эффектов в ЖК является значительное изменение оптических свойств тонких слоев, осуществляемое слабыми внешними воздействиями. Эти изменения обусловлены переориентацией молекул, нарушением их упорядоченности, возникновением фазовых переходов и другими факторами.

Наблюдаемые оптические эффекты, основанные на изменении различных параметров излучения: светопропускания, поляризации, преломления, отражения, фазовой задержки, цветовых характеристик имеют большое практическое значение. При этом возможно плавное или ступенчатое изменение параметров, осуществляемое локально с высоким пространственным разрешением или по всему полю зрения. Времена переключения лежат в интервале от десятков мс до долей мкс. Практическое применение получили в основном электрооптические эффекты благодаря малым величинам напряжений, простоте и гибкости управления.

Разнообразие структур ЖК, физических свойств и их анизотропии, различия в граничных условиях и способность откликаться на внешние воздействия привели к обнаружению большого числа оптических эффектов. Далее будут рассмотрены те эффекты, которые нашли использование в современных информационных технологиях в дисплейных и не дисплейных применениях.

Для наблюдения оптических эффектов в ЖК разработаны ячейки различных конструкций.

## *Глава 3*

### **ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА И ОРИЕНТАЦИЯ МОЛЕКУЛ ЖК**

#### **3.1. Жидкокристаллическая ячейка**

ЖК применяются в оптических устройствах в виде тонких слоев толщиной от нескольких единиц до сотен микрон, изготовление этих устройств основано на тонкопленочной технологии. Тонкие пленки ЖК создают в виде свободных слоев, закрепленных по периметру на оправках; свободных слоев, наносимых на поверхность подложки; и слоев, заключенных в капилляр, образованный, например, двумя подложками.

Свободные слои используют для изучения структур, у которых за исключением кромки устранено взаимодействие с поверхностью [1]. Их получают растягиванием капли материала. Слои ЖК, наносимые на поверхность подложки, применяют для изучения свойств подложки: структуры, микрорельефа, распределения на ней электрических, магнитных или температурных полей. Иногда используют отдельные капли ЖК. Для решения ряда задач необходимо обеспечивать определенную толщину слоя ЖК, а также исключить воздействие на материал влаги и кислорода воздуха. Поэтому ЖКМ заключают в капилляр с фиксированной величиной зазора, например, между двумя подложками, и при необходимости герметизируют. Такой элемент называют жидкокристаллической ячейкой (ЖКЯ). Могут использоваться также ЖК, заключенные в полимерную матрицу (ЖК-композиты).

ЖКЯ имеют много модификаций, предназначенных для изучения структур, измерения физических и эксплуатационных харак-

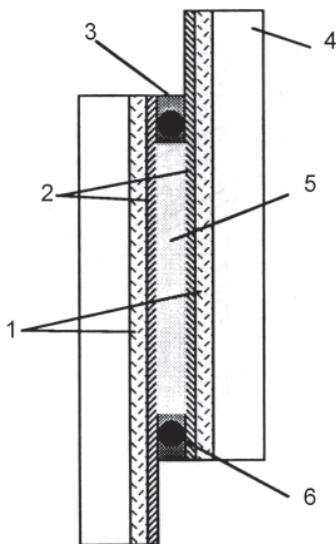


Рис. 3.1. Базовая конструкция ЖКЯ, используемая для электрооптических измерений и в качестве оптических элементов: 1 — токопроводящее покрытие (ITO), 2 — ориентирующий слой, 3 — герметик, 4 — подложка, 5 — слой ЖК, 6 — спейсер

теристик ЖКМ, а также для применения в виде дисплеев, элементов и устройств фотоники.

В большинстве практических случаев используют ЖКЯ типа сэндвича [2, 3]. Слой ЖКМ размещают между плоскопараллельными стеклянными подложками, на внутренней стороне которых нанесен прозрачный токопроводящий слой в виде рисунка необходимой конфигурации (рис. 3.1).

Подложки разделены прокладкой или специальными калиброванными частицами (спейсерами), обеспечивающими необходимую толщину зазора. Склейка осуществляется по периметру герметиком. ЖКЯ в исходном состоянии должна быть максимально прозрачна для рабочего диапазона длин волн, иметь постоянный (или переменный) зазор. Для изготовления ЖКЯ используются операции оптической технологии (рис. 3.2).

В России в качестве материала подложки обычно используют прозрачные стекла марок К8 (обеспечивающие изготовление оптических деталей высокого качества), и ЛК5 (обладающие минимальным коэффициентом теплового расширения). В ряде случаев применяются кварцевые пластины с уменьшенным поверхностным рельефом за счет лазерной обработки [4]. Для специальных целей используются кристаллы, прозрачные в ИК диапазоне длин волн. Применяются также эластичные полимерные подложки, расширяющие сферу использования ЖК элементов. Общие требования, предъявляемые к пластинам, задаются в зависимости от их назначения, размера и величины рабочего зазора. Размеры пластин по диагонали лежат в пределах от нескольких мм до 2,5 м [5].

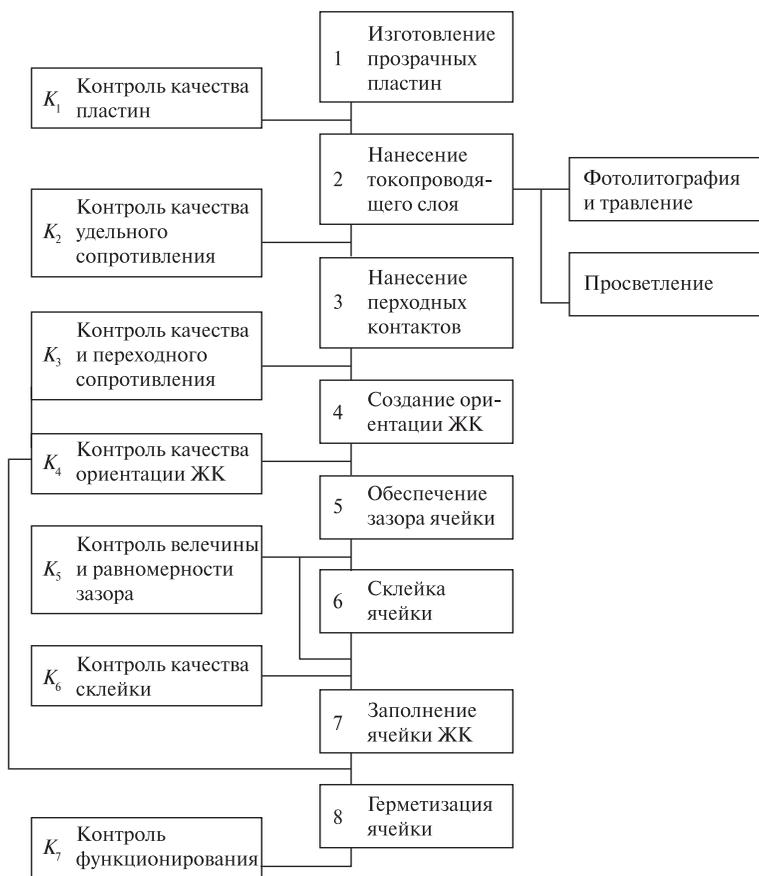


Рис. 3.2. Схема операций для изготовления и контроля ЖКЯ

Промышленностью освоены как плоские, так и выпуклые пластины сферической или цилиндрической формы. Без нанесения просветляющих покрытий пластины имеют отражение в видимом диапазоне длин волн порядка 4 %, а при легком про травливании для получения однородной диффузной поверхности — менее 2 %. Толщина пластин зависит от их размера по диагонали. Обычно используют более толстую переднюю подложку для обеспечения механической прочности и тонкую заднюю подложку для устранения

параллакса, создаваемого тенью. Силикатные стекла содержат много Na и других щелочных ионов, которые могут мигрировать к поверхности. При повышенной температуре, влажности внутри ячейки и ее недостаточной герметичности миграция ионов существенно возрастает, что может приводить к формированию проводящего слоя на поверхности стекла. Следствием этого может быть уменьшение резкости создаваемых изображений, а также падение напряжения между токопроводящим слоем подложки и возникшим проводящим слоем, что может нарушить условия ориентации и немного увеличить управляющее напряжение. Эти процессы уменьшают долговечность работы элемента. Нанесение блокирующих слоев  $\text{SiO}_2$  позволяет в значительной степени устранить этот недостаток. Слои  $\text{SiO}_2$  могут наноситься как под токопроводящие покрытия, так и на них. Другим способом избавиться от влияния щелочных ионов является использование боросиликатных стекол, содержащих меньшее количество ионов Na.

В ЖКЯ хотя бы один электрод должен быть прозрачным. Токопроводящий слой должен быть химически нейтрален к ЖКМ, иметь максимальную прозрачность в рабочем диапазоне спектра излучения и минимальный коэффициент отражения. Для изготовления прозрачных токопроводящих слоев созданы покрытия на основе композиций 85 %  $\text{SnO}_2$  + 15 %  $\text{In}_2\text{O}_3$  (ITO), обладающие высокой механической прочностью и химической устойчивостью. Электронно-лучевой метод испарения композиции в вакууме с последующим прогревом при температурах выше 300 °C дает высокую равномерность покрытий по толщине (3–4 %) и позволяет осуществлять их фотометрический контроль в процессе нанесения. Недостатком ITO пленок, полученных этими методами, является низкая лучевая стойкость, что ограничивает применение ITO слоев в элементах, работающих в мощных световых потоках. Взамен им была разработана технология лазерного испарения [6], позволяющая получать электроды с коэффициентом поглощения 0,01–0,001 (для  $\lambda = 1,06$  мкм) и с лучевой стойкостью 0,6–2,5 Дж/см<sup>2</sup> [7]. Высокая лучевая стойкость ITO пленок обусловлена большей однородностью слоев и меньшим поглощением. Толщина токопроводящего покрытия лежит в пределах 100–500 Å. Особого внимания заслуживают элементы, где прозрачный электрод нанесен поверх многослойного диэлектрического зеркала. Такие элементы имеют лучевую стойкость > 10 Дж/см<sup>2</sup>, что достигается оптимальным расположением слоя ITO в узле стоячей волны, возникающей в многослойном зеркале.

Для обеспечения противоречивых требований максимальной спектральной прозрачности и минимального коэффициента отражения удельное поверхностное сопротивление получают в диапазоне 100–500 Ом/□. Уменьшение удельного сопротивления ниже этих значений снижает коэффициент пропускания, а увеличение повышает опасность изменения сопротивления с течением времени. Светопропускание покрытия можно увеличить на 10–15 % напылением на него в вакууме двуокиси кремния. Микрорельеф токопроводящих покрытий оказывает влияние на характер ориентации молекул ЖК. Для контроля микрорельефа используют методы эллипсометрии [8] и сканирующей оптической туннельной микроскопии [9]. В качестве примера на рис. 3.3 приведено увеличенное изображение поверхности подложки стекла К8 с нанесенным на нее вакуумным способом слоем покрытия  $\text{CeO}_2$ . Методика позволяет получить данные о среднеарифметической высоте пиков  $R_z$ , максимальное расстояние от пика до основания  $R_t$  и картину рельефа в аксонометрии.

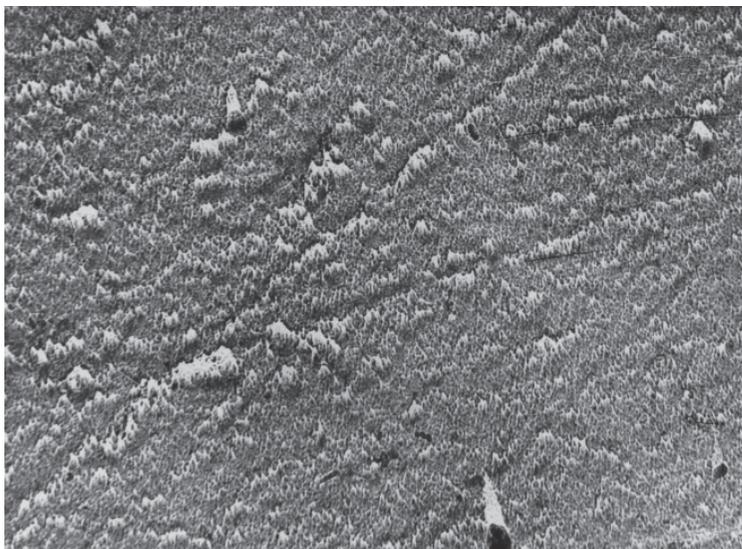


Рис. 3.3. Изображение рельефа покрытия  $\text{CeO}_2$  толщиной 450 Å, нанесенного на холодную подложку вакуумным способом.  
 $R_z = 0,264 \text{ Å}$ ,  $R_t = 0,348 \text{ Å}$ . Увеличение 20000 $\times$ .

При спектроскопических исследованиях применяют ячейки, не содержащие токопроводящих слоев. Для ряда оптических эффектов токопроводящий слой наносят только на одну из подложек. При использовании термооптических эффектов токопроводящие слои заменяют поглощающими. Склеивку пластин ЖКЯ осуществляют стеклянной фриттой при относительно низких температурах (180–200°C). Для обеспечения электрического контакта между пластинами с токопроводящим слоем используют пасту, представляющую собой смесь мелкодисперсного порошка серебра со стеклянной фриттой или эпоксидным композитом.

Реализация быстродействующих эффектов при малых управляющих напряжениях требует зазора величиной в единицы микрометров. С уменьшением зазора сокращаются времена переключения. Однако обеспечение малых зазоров вызывает технологические трудности при больших апертурах. Его получают, используя калиброванные стеклянные трубки или шарики. Величину и однородность зазора по толщине контролируют методами интерферометрии. Для исследовательских целей используют конические или ступенчатые зазоры. Текучесть ЖК позволяет заполнять полости сложной конфигурации, например, пористые стекла, цилиндрические микроканалы и другие стесненные объемы. При изучении оптических явлений, вызываемых механическими или акустическими воздействиями или изменением внешнего давления, одну из пластин выполняют подвижной.

Для расширения функциональных возможностей используют дополнительные слои. При работе на отражение наносят зеркальные покрытия, например, диффузные отражатели из алюминия. При использовании поляризационных эффектов в ЖКЯ применяют анализатор и поляризатор в виде поляроидных пленок. Они уменьшают светопропускание более чем на 50 %. Свойства поляроидных пленок существенно определяют контраст получаемых изображений. Большинство из используемых пленок выполнено многослойными, содержащими кристаллы иода в матрице полвинилацетата, заключенной между слоями ацетата целлюлозы. Для изготовления цветных поляроидных пленок кристаллы иода заменяют на дихромичные красители.

С целью увеличения угла наблюдения при сохранении высокого контраста применяют ЖКМ с отрицательной величиной двулучепреломления на основе дискотиков, компенсирующий характерную для больших углов фазовую задержку [10]. В результате удалось

увеличить угол наблюдения до  $\pm 50^\circ$  в горизонтальной и до  $+30\dots-50^\circ$  в вертикальной плоскости. Для дисплеев используют ЖКЯ со светофильтрами.

Наибольшим быстродействием обладают ячейки, в которых наклон молекул ЖК на верхней и нижней подложках имеет противоположное направление ( $\pi$ -ячейки). Это увеличивает симметричный угол обзора и уменьшает обратный поток ЖК, сопровождающий поворот директора, что способствует повышению быстродействия: при комнатной температуре получены времена переключения 1–1,5 мс. «Пушпульная»  $\pi$ -ячейка содержит два ЖК слоя со взаимно ортогональными направлениями ориентации молекул, причем один из слоев является идеальным оптическим компенсатором для другого, в том числе и при одновременной релаксации. Время переключения такой системы равно времени реакции одинарного слоя. Быстродействие таких ячеек составляет 0,2–0,5 мс при контрастном отношении 50:1 [11, 12].

Большими функциональными возможностями обладают оптически адресуемая ЖКЯ с фотопроводниковым (ФП) слоем. Конструкция содержит слои ЖКМ, ФП, ориентанта, прозрачных электродов и диэлектрического зеркала для работы в отражающем режиме и приведена на рис. 3.4.

Структуры ФП-ЖК используют в когерентной обработке изображений, в нейронных сетях, устройствах волновой коррекции, системах адаптивной оптики, коммуникационных устройствах и проекционных системах. Они позволяют преобразовывать когерентное излучение в некогерентное (и наоборот) и амплитудное изображение в фазовое, изменять спектральный состав излучения, повышать яркость и контраст входного изображения, осуществлять оконтуривание изображений. Каждое из применений требует использования специальных ФП и будет рассмотрено ниже. ЖКЯ могут содержать также пьезоэлектрические или сегнетоэлектрические слои.

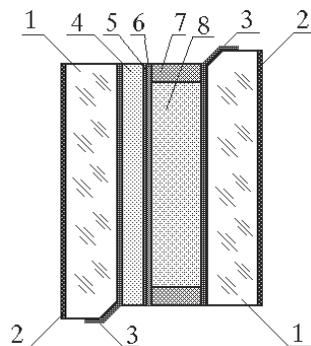


Рис. 3.4. Оптически управляемый элемент отражательного типа: 1 — стеклянные подложки, 2 — просветляющие покрытия, 3 — прозрачные электроды, 4 — фотопроводник, 5 — светоблокирующий слой, 6 — зеркало, 7 — прокладки, 8 — слой ЖК

В условиях серийного производства рассмотренные операции по изготовлению ЖКЯ имеют свою специфику. На смену традиционной вакуумной технологии изготовления ЖКЯ может придти «чашечная» технология получения эластичных пленок, заполненных электрооптическими материалами [13, 14]. Она основана на капельном заполнении микрочашек ЖКМ. На последующих операциях микрочашки герметизируются и покрываются полимерным электродом. Новая технология отражает тенденцию изготовления эластичных элементов, которые можно скручивать в трубку при транспортировке или использовать на поверхностях сложной конфигурации.

Специфической операцией при изготовлении ЖКЯ, не имеющей аналогов в технологии оптического приборостроения, является создание ориентирующего слоя. Для достижения высокого контраста, максимальной прозрачности и качества изображения необходимы однородно ориентированные слои ЖК, причем ориентация должна быть воспроизводимой и долговечной. При определенных условиях только методами ориентации в ЖКЯ можно получать новые оптические элементы.

### 3.2. Ориентация ЖК

Характер ориентации определяется взаимодействием ЖК с поверхностью подложки. Анализу этих вопросов посвящена обширная научная литература, из которой отметим работы [15–26]. Это взаимодействие характеризуется энергией сцепления  $W^S$ , определяющей среднее значение угла  $\theta_0$  между направлением длинных осей молекул и поверхностью границы.

#### 3.2.1. Энергия сцепления

Свободная поверхностная энергия НЖК  $F^S$  равна

$$F^S = F^S_{\text{иЖ}} + F^S_{\text{ЖК}}, \quad (3.1)$$

где  $F^S_{\text{иЖ}}$  характеризует изотропную, а  $F^S_{\text{ЖК}}$  — анизотропную часть энергии, отличающиеся друг от друга на несколько порядков. Изотропная часть  $F^S_{\text{иЖ}}$  тождественна межфазному поверхностному натяжению на границе ЖК–подложка и составляет величину порядка  $10^2$  эрг/см<sup>2</sup>. Анизотропная часть изменяется в пределах пяти порядков от  $1 \times 10^{-5}$  до  $1$  эрг/см<sup>2</sup> [27].

Равновесное положение директора, определяемое направлением легкой ориентации, описывается полярным  $\theta_0^S$  и азимутальным  $\varphi_0^S$  углами (рис. 3.5). При нанесении НЖК на твердую поверхность в виде свободного слоя направление легкой ориентации длинных осей молекул возникает самопроизвольно как следствие специальной обработки поверхности. Для того, чтобы повернуть директор от направления легкой ориентации, необходима энергия  $F_a^S$ . Конкретный вид этой функции не известен, однако имеется ряд ее приближенных представлений, позволяющих оценить величину и сравнить с экспериментами [28, 29]. Простейший вид этой функции был предложен в [28]:

$$F_a^S = F_{\text{ИЖ}}^S + 1/2 W_1 \sin^2 \delta\theta^S \quad (3.2)$$

где  $\delta\theta^S = \theta^S - \theta_0^S$ ;  $W_1$  — полярная часть энергии сцепления при фиксированном значении  $\varphi_0^S$ .

Поскольку оба угла  $\theta^S$  и  $\varphi_0^S$  могут изменяться, введем энергию сцепления для полярного и азимутального углов

$$F_a^S(\theta) = 1/2 W_1^\theta \sin^2(\theta^S - \theta_0^S) \quad (3.3)$$

$$F_a^S(\varphi) = 1/2 W_1^\varphi \sin^2(\varphi^S - \varphi_0^S) \quad (3.4)$$

В общем случае потенциал Рапины (3.2) описывается синусоидальной формой для поворота директора на угол в ( $\delta\theta^S$  или  $\delta\varphi^S$ ) от направления легкой ориентации ( $\theta_0^S$ ,  $\varphi_0^S$ ) (кривая 1 на рис. 3.6).

$$F^S = F_{\text{ИЖ}}^S + 1/2 W_1 \sin^2 \beta \quad (3.5)$$

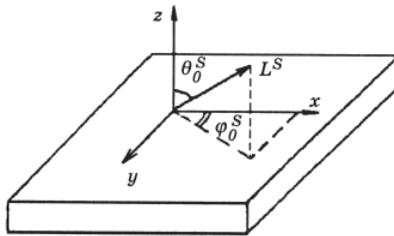


Рис. 3.5. Направление легкой ориентации директора  $L^S$  нематика на твердой поверхности, задаваемой полярным  $\theta^S$  и азимутальным  $\varphi_0^S$  углами

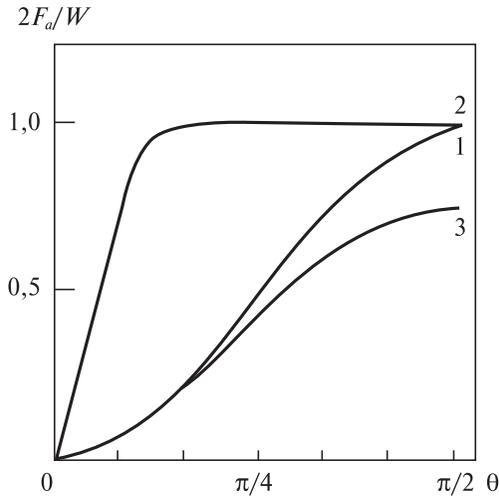


Рис. 3.6. Графики поверхностного потенциала:  
 1 — нормализованный потенциал Рапини;  
 2 — потенциал в виде эллиптического синуса  
 ( $K = 1 \cdot 10^{-7}$ ); 3 — потенциал в форме  
 Лежандра.

Однако в ряде случаев эксперимент лучше описывается потенциалом другой формы, например [29].

$$F^S = 1/2 W \sin^2(\beta, K), \quad (3.6)$$

который точнее определяет минимум потенциала около направления легкой ориентации (кривая 2, рис. 3.6). В ряде работ потенциал  $F_a^S$  представляется в форме полинома Лежандра [30–33]:

$$F_a^S = \sum W_j \cos^{2j} \beta, \quad (3.7)$$

где  $W_j$  — коэффициент ряда. Первый из них  $W_1$  является потенциалом Рапини. Потенциал в форме полинома Лежандра представлен на рис. 3.6 (кривая 3).

Во всех случаях при выбранной форме  $F_a^S$  задача определения поля директора в слое конечной толщины может быть строго решена на макроскопическом уровне.

Вместо энергии сцепления используют экстраполяционную длину

$$b_1 = K_i/W, \quad (3.8)$$

где  $K_i$  — модуль упругости НЖК при деформации в данном эксперименте.

В случае сильного сцепления ( $W \rightarrow \infty$ ) директор не может быть развернут из положения легкого ориентирования при любом его положении в объеме ( $\delta\theta^S = 0$  на рис. 3.7). При конечной энергии сцепления угол наклона директора равен  $\delta\theta^S$  при  $z = 0$ , и кривая  $\theta(z)$  может быть экстраполирована за ограничивающую поверхность. Точка  $z = -b$  вне слоя НЖК, где  $\theta(z) \rightarrow 0$ , означает фиктивную экстраполяционную длину  $b_{11}$  для особого случая фиксированного азимутального угла (рис. 3.7). Чем слабее сцепление, тем больше экстраполяционная длина. Иногда используют безразмерный параметр сцепления

$$W_i = d/b = dW/K_i, \quad (3.9)$$

где  $d$  — толщина слоя ЖК. Условия  $W_i \gg 1$  и  $W_i \ll 1$  относятся соответственно к случаям сильного и слабого сцепления.

Разработано несколько экспериментальных методов определения энергии сцепления, как при наложении электрического поля, так и при его отсутствии [34]. Примером может служить определение энергии сцепления 5ЦБ со стеклянной подложкой с косым напылением SiO по усилию разворота молекул НЖК в магнитном поле [35, 36].

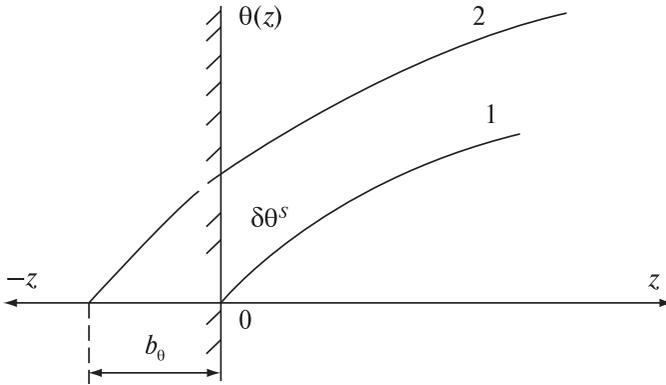


Рис. 3.7. Определение экстраполяционной длины сцепления: 1 — сильное сцепление,  $W \rightarrow \infty$ ,  $b_0 = 0$ ; 2 — конечное сцепление,  $0 < W < \infty$ ,  $b_0 \neq 0$ ,  $\delta\theta^S \neq 0$

Эксперименты показали уменьшение параметра поверхностного порядка при приближении к точке фазового перехода в ИЖ [37]. В работе [38] определена энергия сцепления для 5ЦБ и МББА с подложками из лейкосапфира и ниобата лития при гомеотропной ориентации. Сведения о величинах энергии сцепления для случаев гомеотропной и планарной ориентации молекул НЖК на различных поверхностях, полученные из различных по методикам измерений, обобщены в работах [18–20]. Анализ данных показал, что полярная поверхностная энергия сцепления для гомеотропно ориентированных образцов составляет  $10^{-3} - 10^{-2}$  эрг/см<sup>2</sup>. Для планарно ориентированных образцов полярная поверхностная энергия существенно выше,  $W_{\theta}^S = 10^{-2} - 1$  эрг/см<sup>2</sup>. Таким образом, отношение поверхностной полярной энергии сцепления к азимутальной составляет величину  $10 \sim 100$ . Температурная зависимость энергии сцепления приведена в [39]. Подробный анализ энергии сцепления ЖК с поверхностью сделан в обзоре [40].

### 3.2.2. Методы ориентации НЖК на подложке

В зависимости от угла  $\theta_0$  различают гомеотропную ( $\theta_0 = 0$ ), планарную ( $\theta_0 = \pi/2$ ) и наклонную ( $0 < \theta_0 < \pi/2$ ) ориентации. Если имеется одно направление директора, параллельное подложкам, то планарная ориентация называется гомогенной (рис. 3.8а).

При гомеотропной ориентации директор ориентирован перпендикулярно подложке (рис. 3.8б). Если ориентация на одной подложке планарная, а на другой гомеотропная, то она называется гибридной (рис. 3.8г). Ориентация может быть планарной на обеих подложках, но при этом быть закрученной на  $90^\circ$  или  $180^\circ$ . Такая ориентация называется соответственно твистовой (TN) или супертвистовой (STN) (рис. 3.8д). Наклонная структура, закрученная на  $270^\circ$  с добавлением к нематику хиральной примеси, обозначается как SBE (рис. 3.8е). Характер ориентации молекул ЖК обеспечивается их кооперативной упорядоченностью, вызываемой силами взаимодействия с твердой поверхностью.

На практике часто требуются либо планарная (гомогенная), либо гомеотропная ориентации. Феноменологически взаимодействие ЖК с подложкой характеризуется соотношением поверхностных натяжений подложки  $\gamma_S$  и ЖК  $\gamma_{LC}$  [41, 42]. Если  $\gamma_{LC} > \gamma_S$ , то межмолекулярные силы в ЖК больше сил поверхностного натяжения подложки, что создает гомеотропную ориентацию. Если  $\gamma_S > \gamma_{LC}$ , то силы сцеп-

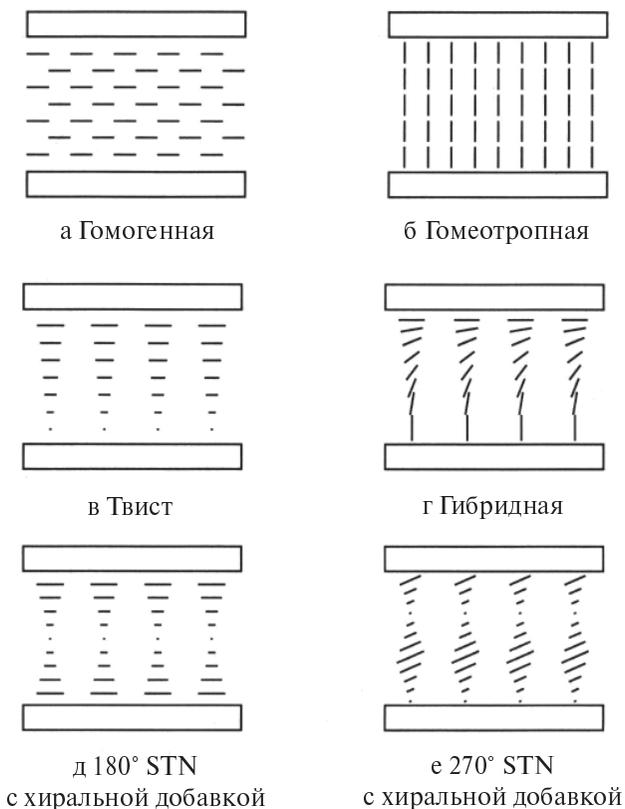


Рис. 3.8. Различные виды ориентации НЖК [24]

ления с поверхностью преобладают, и возникает планарная ориентация. Эти соотношения подтверждены многими экспериментами. Поверхностные взаимодействия жидкостей и твердых тел осуществляются с помощью дисперсионных и диполь-дипольных сил [43].

Известно много методов ориентации: натирание подложек, нанесение поверхностно-активных веществ, косое напыление ориентанта и изменение свойств нанесенных полимерных пленок при облучении светом [44]. Ориентация определяется многими факторами, отражающими свойства материалов, предысторию обработки поверхности и другие условия.

### 3.2.3. Планарная ориентация НЖК

Гладкие слои стекол, оксидов и полимеров ориентируют молекулы НЖК планарно, но не создают однородно воспроизводимой ориентации. Для ее достижения предложено несколько методов обработки поверхности. Одним из наиболее распространенных являлось натирание подложки мягкой тканью, бумагой или щетками в одном направлении (метод Шатлена) [45]. В настоящее время эта операция осуществляется с помощью специальных машин, имеющих вращающийся цилиндр с натирающим материалом (рис. 3.9).

При натирке цилиндр вращается с постоянной скоростью  $\omega$ , а подложка перемещается поступательно со скоростью  $v$ . Для натирания поверхности ИТО может использоваться алмазная паста. Исследование методами электронной микроскопии натертой поверхности выявило систему параллельных выступов и канавок шириной около 1 мкм, вдоль которых укладываются молекулы НЖК. Недостатком метода является недостаточно сильное сцепление ЖК с подложкой. Экспериментально было установлено, что планарная ориентация достигается индуцированной анизотропией межфазной энергии [46, 47]. С увеличением анизотропии, имеющей поря-

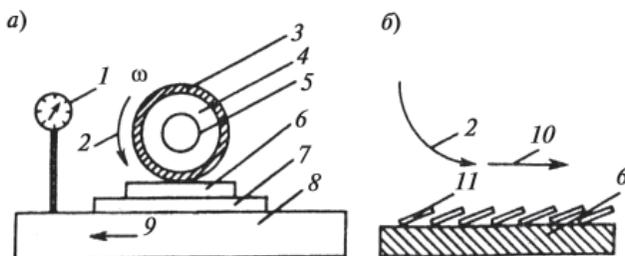


Рис. 3.9. Установка для натирания подложки тканью с регулируемым давлением и скоростью натирания (а) и молекулярная структура натертого слоя НЖК (б): 1 — прибор для измерения давления; 2 — направление вращения цилиндра; 3 — слой ткани; 4 — цилиндр; 5 — вал с приводом от электродвигателя; 6 — подложка; 7 — прокладка с большим трением; 8 — перемещающееся основание; 9 — направление движения подложки при натирании; 10 — направление натирания; 11 — индуцированная ориентация НЖК.

док  $10^{-1}$  эрг/см<sup>2</sup>, энергия сцепления молекул НЖК с поверхностью возрастает. Важным результатом, определившим дальнейшее направление поиска эффективных методов ориентации, явилось установление ее зависимости от оптической или топологической анизотропии поверхности. Для придания поверхности анизотропных свойств были разработаны методы натирания по полимерным пленкам, косоугольного напыления окислов, нанесения лэнгмюр-блужеттовских пленок, создания голографических решеток и микрорельефа средствами микроскопии сверхвысокого разрешения, а также воздействия поляризованным облучением.

Обычно анизотропия межфазной энергии достигается натиранием поверхности, покрытой слоем полимера. На начальной стадии исследований в качестве ориентирующих материалов использовались разбавленные растворы длинноцепных полимеров: как правило, полиимида, в котором наводится оптическая анизотропия [48–53]. Натирание по полиимидным пленкам в одном направлении создает малые углы ориентации молекул ЖК ( $6-9^\circ$ ). Используя параллельное или антипараллельное натирание стенок ЖКЯ, можно получить слой со статической деформацией поперечного изгиба или однородной наклонной структурой [54].

Натирание поливинилового спирта (ПВС) приводит к укладыванию полимерных цепочек ( $-\text{СНОН}-\text{СН}_2-\text{СН}_2-\text{СН}_2-$ ) в направлении натирания [55, 56]. Параллельность цепи ПВС поверхности стекла или слою ИТО обеспечивается путем абсорбции ПВС из раствора на силиконовые группы  $\text{ОН}-\text{Si}\equiv$ . Наклон молекул НЖК к подложке вызван асимметрией в расположении петель макромолекул, ориентированных натиранием (рис. 3.10). Предварительное натирание прозрачных электродов алмазной пастой с размером зерна  $0,5-1$  мкм дает более однородную ориентацию при последующем нанесении ПВС и уменьшает угол наклона директора к подложке на  $0,5^\circ$ .

В работе [57] исследована температурная зависимость полярной энергии сцепления молекул 5ЦБ с полиимидной пленкой, подвергнутой слабому натиранию. С увеличением температуры энергия уменьшается и обращается в нуль при переходе в изотропную жидкость. Это свидетельствует о сильной связи полярной энергии сцепления с поверхностным параметром порядка.

При слабом натирании полярная энергия сцепления при  $t = 30^\circ\text{C}$  составила  $8 \cdot 10^{-4}$  Дж/м<sup>2</sup>, что выше, чем для других ориентантов. Это позволяет получать качественную ориентацию ЖКЯ при натирании

только одной подложки [58]. К недостаткам ориентации натиранием относят трудность получения оптической однородности из-за загрязнения поверхности при натирании и возникновения локальных электростатических полей. При нагревании поверхности до температуры 500 °С возникает опасность исчезновения индуцированной анизотропии.

Метод косо́го напыления для создания планарной ориентации, предложенный Яннингом, не обладает этими недостатками [55]. Он состоит в нанесении микрорельефа различных материалов толщиной менее 1000 Å (хрома, платины, алюминия, золота, монооксида кремния или германия, и других материалов) на подложку под углом примерно 85° к нормали. Поверхностная структура зависит от напыляемого материала и режимов напыления: угла, скорости и толщины пленки (рис. 3.11) [59]. Так, при косом напылении SiO под углом  $\alpha = 80^\circ$  молекулы МББА ориентируются длинными осями под углом до 28° к подложке при толщине ориентанта более 50 Å и параллельно направлению напыления, а при толщине менее 50 Å — перпендикулярно направлению напыления в плоскости подложки [60]. Если после напыления SiO под углом 60° образец поворачива-

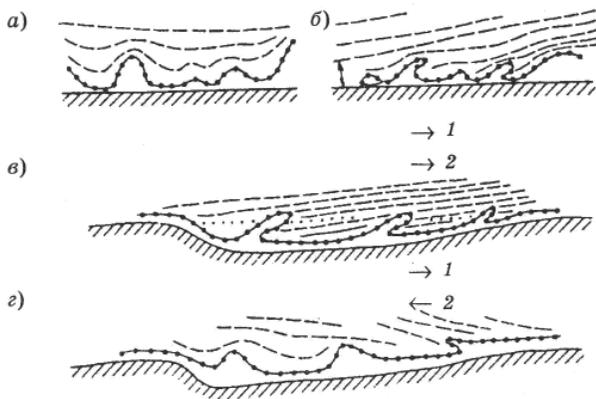


Рис. 3.10. Ориентация адсорбированных макромолекул ПВС на подложке: *a* — в общем случае; *б* — после многократного натирания в одном направлении на гладкой поверхности; *в, г* — на подложках, обработанных абразивом [16]

ли на  $\pi/2$  и вторично напыляли слой толщиной порядка  $5 \text{ \AA}$  под углом  $85^\circ$ , ориентация директора оказывалась параллельной направлению вторичного напыления [61]. Увеличение толщины слоя SiO при вторичном напылении увеличивает угол наклона молекул НЖК до  $30^\circ$ . При одновременном напылении SiO из двух источников обеспечивается ориентация директора под углом  $6^\circ$  [62]. Напыление  $\text{MgF}_2$  дает аналогичные результаты, но с меньшими углами наклона директора [63].

Полимерные пленки, получаемые полимеризацией в плазме при химическом напылении, обладают хорошей термостабильностью, высокой температурой плавления и низкой растворимостью [48]. Условиями ориентации можно управлять плазменной обработкой поверхности после полимеризации [64]. К таким слоям относятся аморфный гидрогенизированный углерод  $\alpha\text{-C:H}$ , дающий стабильную планарную ориентацию смесей цианобифенилов, причем изменение угла напыления не оказывает влияния на ориентацию НЖК. Достоинства этих слоев состоят в возможности их использо-

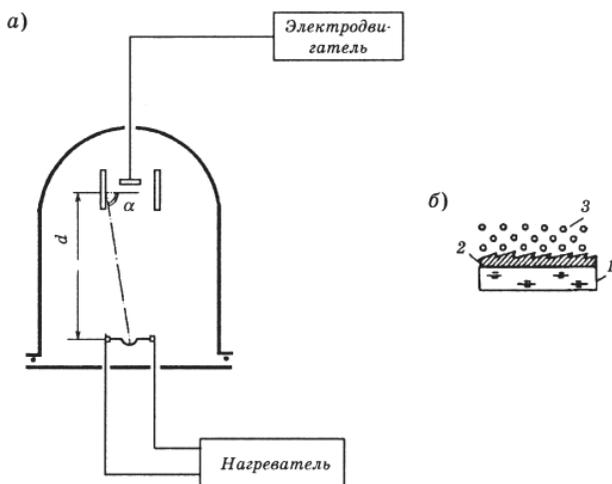


Рис. 3.11. Вакуумная установка для косо́го напыления ориентанта (а) и механизм возникающей планарной ориентации НЖК (б): 1 — подложка; 2 — косо́напыленный слой ориентанта; 3 — молекулы НЖК.  $\alpha$  — угол напыления; d — расстояние от термолодочки с ориентантом до образца

вания для оптической блокировки или в качестве отражающего зеркального покрытия [65, 66].

Предложены и другие методы: ионное травление диэлектрической пленки, сканирование электронным или лазерным лучом, литографическое и голографическое нанесение микрорельефа, использование магнитных покрытий [67–69]. Создание периодической решетки комбинацией голографического и литографического методов на стеклянной подложке со слоем ИТО также обеспечивает однородную и воспроизводимую однородную ориентацию. На решетках с шагом 0,5 и 0,7 мкм и глубиной 400 Å достигнута величина поверхностного ориентационного порядка  $S_S = 0,66$  [70]. В работе [71] описаны различные способы получения подложек с поверхностным рельефом, используемые в оптоэлектронике и устройствах отображения информации.

Планарная ориентация НЖК на рельефной поверхности рассматривалась с позиций теории континуума [72, 73]. Для простоты профиль рельефной поверхности  $z$  считался синусоидальным (рис. 3.12):

$$z = H \sin qx \quad (3.10)$$

где  $x$  — направление, перпендикулярное к направлению натирания;  $q$  — волновой вектор рельефа;  $H$  — амплитуда рельефа.

Ориентация директора в направлении, перпендикулярном к направлению канавок ( $\psi = \pi/2$ ), требует расхода упругой энергии для

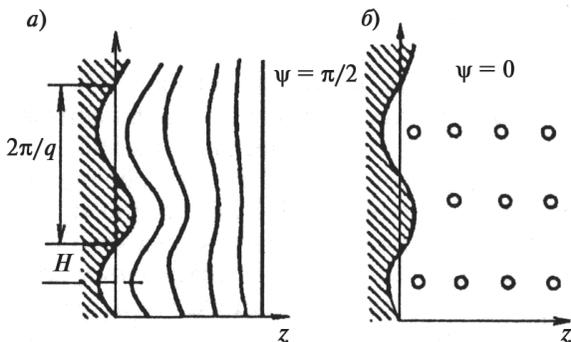


Рис. 3.12. Взаимодействие молекул НЖК с рельефной поверхностью: *a* — ориентация директора в направлении, перпендикулярном направлению канавок; *b* — параллельная ориентация [72, 73]

деформации слоя. При параллельной ориентации ( $\psi = 0$ ) деформация слоя не происходит. Затрачиваемая на деформацию энергия определяется как энергия, необходимая для разворота директора на угол  $\varphi$ . Минимум свободной энергии Франка будет иметь место в случае

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (3.11)$$

где для простоты все три константы упругости приняты равными друг другу.

Решением этого уравнения, удовлетворяющим граничным условиям и условию  $\varphi = 0$  при  $z \rightarrow \infty$ , является выражение:

$$\varphi(x, z) = Hq \cos(qx) e^{-qz} \quad (3.12)$$

Удельная упругая энергия  $f$ , вызванная деформацией слоя НЖК в случае, представленном на рис. 3.13а, зависит от координаты  $z$ :

$$f(z) = \frac{K}{2} \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] = \frac{K}{2} (Hq^2)^2 e^{-2qz}, \quad (3.13)$$

а полная энергия деформации слоя НЖК в окрестности рельефной поверхности

$$F = \int_0^{\infty} f(z) dz = \frac{1}{4} K H^2 q^3 \quad (3.14)$$

Таким образом, при переходе от ориентации, приведенной на рис. 3.12а, к ориентации, показанной на рис. 3.12б, требуется дополнительная энергия, имеющая квадратичную зависимость от глубины рельефа и кубическую от периода. Рассмотренная модель объясняет, почему директору легче ориентироваться вдоль канавок планарно.

В работе [49] были сопоставлены расчетные и экспериментальные данные азимутальной энергии сцепления хирального ЖК в ячейке, обе подложки которой натирались в одном направлении. Энергия закрутки ЖК приводила к повороту директора в сторону от направления натирания. Азимутальная поверхностная энергия сцепления  $A$  определялась из условия баланса, характеризующего начало разворота директора. Измерения производились по выявле-

нию первой линии дисклинации в незакрученной области в клиновидной ячейке. Значения  $A$  определялись из уравнения:

$$\frac{A_m}{K_{22}} = \frac{\pi - 2\Phi}{d_1 \sin \Phi}, \quad (3.15)$$

где  $A_m$  нормируется по упругой константе кручения  $K_{22}$ ;  $d_1$  — толщина ячейки в зоне первой линии дисклинации, известная по значению шага в ЖК смеси;  $\Phi$  — полный угол закрутки, определяемый с помощью поляризационного микроскопа.

Расчетные и экспериментальные данные для  $A$  сопоставлены на рис. 3.13. В обоих случаях с увеличением усилия натирания нормированное значение азимутальной поверхностной энергии возрастает. Однако теоретические вычисления дали на два порядка меньшие значения, чем экспериментальные. Это означает, что ориентация на поверхности натертого полимера определяется не только рельефом поверхности, но и эффектами объемного ориентационного упорядочения и силами межмолекулярного взаимодействия полимера и ЖК.

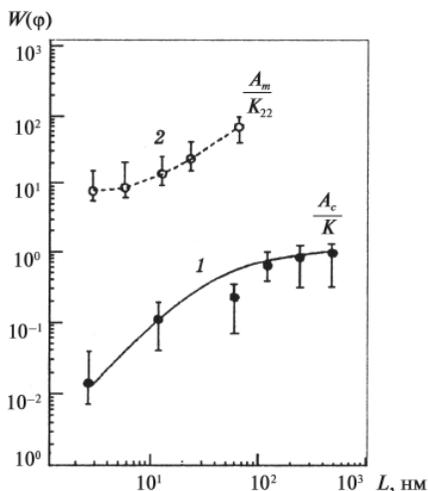


Рис. 3.13. Зависимость азимутальной поверхностной энергии  $W(\varphi)$  от усилий натирания  $L$ : 1 — расчетная; 2 — экспериментальная [49]

Для создания планарной ориентации использовались мономолекулярные слои ориентантов, наносимые на поверхность методом Лэнгмюра-Блоджетт (ЛБ) [74, 75]. Поверхностная анизотропия в монослое достигается направленным потоком, возникающим при осаждении мономолекулярного слоя на поверхность. Особенности использования ЛБ технологии отражены в работах [76, 77].

Планарная ориентация НЖК объясняется химическим взаимодействием с поверхностью, хотя нельзя исключать вклада упругой энергии деформации. Ориентация зависит от режимов натирания и температуры: с увеличением усилия натирания и понижением температуры угол наклона молекул к подложке возрастает.

### 3.2.4. Гомеотропная и наклонная ориентации НЖК

Наиболее просто гомеотропная ориентация достигается на стекле после химического травления или очистки поверхности [41], однако такой способ не универсален для разных структур НЖК. Без обработки гомеотропная ориентация возникает на поверхностях материалов  $Al_2O_3$ ,  $LiNbO_3$ ,  $CaF_2$ ,  $Mg(OH)_2$ , однако она не всегда воспроизводима.

Нанесение поверхностно-активных веществ (ПАВ) обеспечивает воспроизводимую гомеотропную ориентацию. ПАВ адсорбируются поверхностью или пограничным слоем, изменяя соотношение энергии на поверхности раздела (рис. 3.14).

Для создания гомеотропной ориентации НЖК применялись слои полиамидной смолы, лецитина, гексадецилтриметиламмония бромистого [78]. Например, лецитин ориентировал МББА гомеотропно независимо от того, натиралась ли подложка или нет. Ориентирующая сила различных амфифильных пленок уменьшается с увеличением плотности упаковки [79]. Это позволило объяснить механизм ориентации НЖК физико-химическим взаимодействием. Предложенная стерическая модель формирования ориентации показана на рис. 3.15 [80].

В жидком слое «хвосты» поверхностно-активного вещества свободно располагаются в направлении, близком к параллельному. Взаимо-

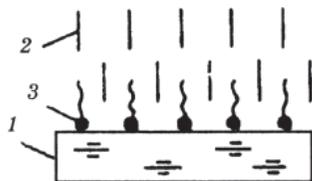


Рис. 3.14. Гомеотропная ориентация: 1 — подложка, 2 — молекулы НЖК, 3 — ПАВ



Рис. 3.15. Монослои поверхностно активных веществ на твердой поверхности: *a* — квазижидкий; *б* — твердый [15]

действуя с ними, молекулы НЖК ориентируются планарно. В твердом слое хвосты перпендикулярны к поверхности, и молекулы нематиков, внедряясь в слой лецитина, ориентируются гомеотропно. Эта модель была экспериментально подтверждена [81]. Однако надежная гомеотропная ориентация возникает при использовании полярных подложки и ПАВ, обеспечивающих сильную адсорбцию на поверхности и способствующих большей энергии сцепления гомеотропно ориентированного слоя с подложкой [82, 83].

ПАВ не обязательно добавлять в НЖК, а можно наносить непосредственно на поверхность. Поскольку адсорбированные слои ориентанта могут изменяться со временем, то применяют слои с сильной связью с подложкой. К ним относятся органосиланы [84]. На рис. 3.16 схематично изображены поверхности, покрытые диметилдодециламино-пропил-триметоксисилил-хлоридом и метилтриаминопропил-триметокси-силаном.

В обоих случаях пропильные цепочки  $(\text{CH}_2)_3$  обеспечивают прочную связь с подложкой, а стоящие нормально к поверхности хвосты молекул обеспечивают гомеотропную ориентацию НЖК. В процессе сушки органосилановых поверхностно-связующих аген-

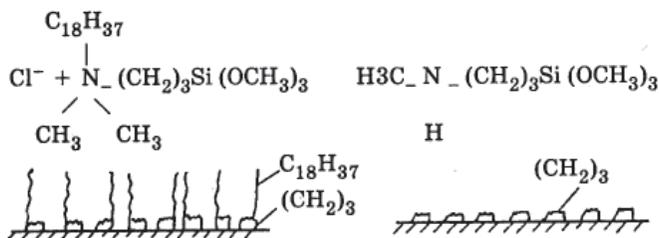


Рис. 3.16. Поверхностно связующие агенты на твердой поверхности: *a* — диметилдодециламинопропил-триметоксисилил-хлорид; *б* — метилтри-аминопропил-триметоксисилан

тов поляризуются силановые мономеры, образуя двумерную сетчатую структуру. Она придает дополнительную химическую стабильность органосилановой поверхности.

Ориентация НЖК поверхностью подложки обусловлена физико-химическими процессами (диполь-дипольные взаимодействия, водородные связи) и механическими взаимодействиями, вызванными анизотропией упругой энергии НЖК. Физико-химическое взаимодействие обычно является преобладающим. По расчетам параметр поверхностного ориентационного порядка  $S_D$  на границе с натертым слоем SiO составляет 0,005, а на границе с натертым слоем ПВХ — 0,27 [85]. Исключение составляет косое напыление ориентанта, когда при слабом сцеплении топографический аспект преобладает над физико-химическим. Это подтверждено экспериментами с решетками разного шага (0,3–3,33 мкм) на различных покрытиях (SiO, SiO<sub>2</sub>, ITO) с НЖК различных структур [68]. Поведение НЖК на гладкой поверхности стекла и косонапыленной пленке SiO (60°) вблизи фазового перехода в изотропную жидкость изучалось в работе [86] по наблюдению остаточного двулучепреломления и переориентации директора в магнитном поле. На поверхности стекла остаточное двулучепреломление сохранялось при превышении температуры просветления почти на 10 °С, а на границе с косонапыленной пленкой SiO возникала полидоменная структура. Это объясняет различия в величинах, отмеченные выше.

Планарная и гомеотропная ориентации являются идеализированными, поскольку почти всегда директор несколько отклонен от нормали или плоскости поверхности. Наклонную ориентацию создают иногда специально, комбинируя топологический фактор и ван-дер-ваальсовы силы взаимодействия. Примером является получение больших углов наклона директора (106–125°) при нанесении НЖК 7ЦБ на косонапыленную пленку SiO, покрытую ПАВ, дающую после натирания гомеотропную ориентацию (рис. 3.17 и 3.18) [87]. Получаемая ориентация почти перпендикулярна направлению напыления пленки SiO. Углы наклона НЖК, образуемые при различных скоростях напыления ориентанта (1–15 Å/с) на основе SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO толщиной около 2000 Å измерялись в работе [88].

Дополнительные возможности в получении наклонной ориентации МББА на стеклянной подложке дают поверхностно-активные вещества. Предполагалось, что ПАВ с короткими алифатиче-

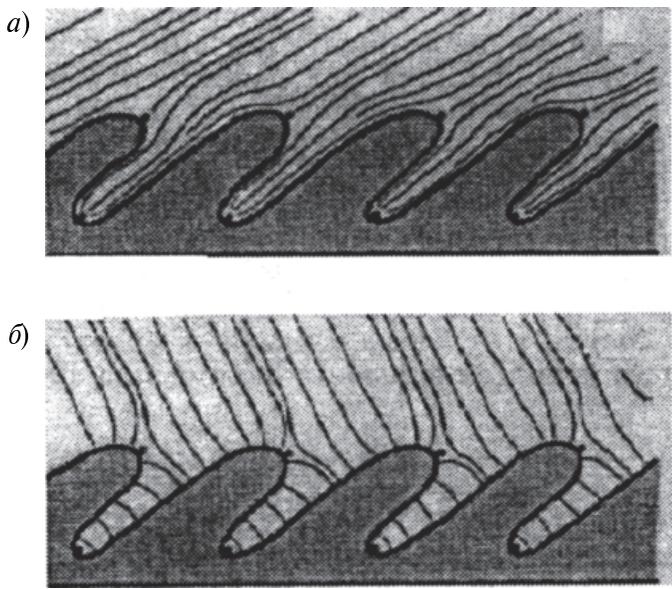


Рис. 3.17. Локальная ориентация директора НЖК параллельно (а) и перпендикулярно (б) к косонапыленным слоям поверхности (точки означают поверхностные дисклинации)

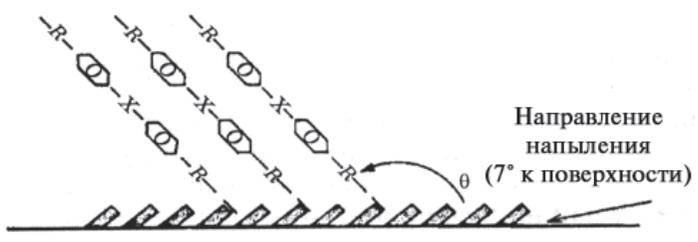


Рис. 3.18. Направление наклонной ориентации НЖК под углом и к нормали напыленной пленки SiO после покрытия гомеотропным сурфактантом и последующего натирания

скими цепями вместо гомеотропной должны давать наклонную ориентацию. Для этого изучалась зависимость угла ориентации МББА на поверхности с мономолекулярными слоями алифатических моноаминов ( $C_nH_{2n+1}-NH_2$ ) с различными длинами цепи ( $6 \leq n \leq 16$ ) [89]. Коноскопические исследования показали, что при  $n \geq 12$  создается гомеотропная ориентация, а при  $n \leq 10$  — наклонная, причем угол наклона от нормали и увеличивается с уменьшением длины цепи.

В ЖКЯ с наклонной ориентацией НЖК возможны два случая. В первом — направления натирания совпадают, и угол наклона по толщине не является однородным; во втором — направления натирания противоположны, а угол наклона по толщине одинаков. Второй случай более предпочтителен. Угол наклона можно определить из величины порога переориентации однородного слоя НЖК под действием электрического и магнитного полей при определенной геометрии эксперимента [90].

Для различных применений нужны разные условия ориентации. Так, малый угол наклона ( $1-2^\circ$ ), требуемый для твистовых ЖК-дисплеев, создается натиранием по полиимидной пленке. Для обеспечения углов наклона  $5^\circ$  и более для супертвистовых ЖКД используют пленки полиимида с алкиламиновыми цепями, подвергаемые натиранию. Еще большие углы наклона получают добавлением к полиимиду хромовых солей или трифторкарбонных соединений. Такая ориентация используется в проекционных дисплеях, эксплуатируемых при температурах до  $60^\circ C$ .

Зависимость угла наклона молекул от температуры для различных структур изучена в работах [91–94]. Она является квадратичной функцией упругой поверхностной энергии и зависит от топографии поверхности и ван-дер-ваальсовых сил взаимодействия. Разработка методов наклонной ориентации вызвала необходимость измерения углов наклона директора к подложке. Разработано несколько методов, основанных на измерении параметров ЖКЯ [95–98], наблюдении коноскопической картины ориентированных одноосных НЖК [99, 100] и его ортоскопической модификации [101], по полному внутреннему отражению и фазовой задержке [102–106], по релеевскому светорассеянию, по флуоресценции красителей в ЖК матрице [107, 108].

Из рассмотренных методов наибольшее применение получил метод натирания по полиимиду. Однако он имеет ряд существенных недостатков. В процессе натирания поверхность может загряз-

няться посторонними включениями, подвергаться механическому разрушению и на ней возникают электростатические заряды, ухудшающие качество ориентации. Поэтому в последние годы был разработан новый метод светоиндуцированной ориентации.

### 3.2.5. Светоиндуцированная ориентация ЖК

Метод светоиндуцированной ориентации является бесконтактным и исключает загрязнение и разрушение поверхности, а также наведение электростатических зарядов. К его достоинствам относится возможность создания ЖК структур с заданным азимутальным направлением директора в выбранной области, что обеспечивает увеличение углов обзора, а также повышение производительности в изготовлении ЖК-дисплеев с активно-матричной адресацией. Метод позволяет получать желаемые углы наклона ЖК к подложке и контролируемую энергию сцепления с ней, обеспечивая высокую стабильность ориентации при воздействии УФ излучения и температуры.

Эффект вызываемой светом ориентации ЖК является следствием фотоиндуцированной оптической анизотропии и дихроизма поглощения в тонких аморфных пленках [109]. Метод светоиндуцированной ориентации ЖК был предложен в 1988 г. и описан в работе [110]. Для управления ориентацией был использован обратимый переход между *цис-транс*-изомерами молекул азобензола, нанесенных на подложку для изменения ориентации ЖК из гомеотропной в планарную при освещении неполяризованным светом. Позже была использована полимерная пленка с красителем, экспонируемая поляризованным светом [111]. Молекулы ЖК, граничащие с освещенной областью, однородно переориентировались перпендикулярно вектору поляризации лазерного излучения и сохраняли ориентацию после экспозиции. В дальнейшем для создания светоиндуцированной ориентации были предложены новые материалы: гребнеобразные полимеры на основе циннаматов [112, 113] и полиимидов [114]. В настоящее время это направление интенсивно развивается за счет использования новых материалов и передовых технологий, что стимулируется потребностью массового производства ЖК дисплеев высокого качества.

Прогресс в использовании метода светоиндуцированной ориентации вызывает необходимость в фундаментальных исследованиях ее механизма. Однако полная картина этих явлений до сих пор отсутствует. Существующее к настоящему времени описание меха-

низмов ориентации носит качественный характер и основывается на фотохимических и фотофизических процессах, происходящих в фоточувствительных слоях.

Основные проблемы обеспечения светоиндуцированной ориентации ЖК, пути их решения, результаты теоретических и экспериментальных исследований светочувствительных материалов, а также области применения представлены в монографиях [115, 116].

Различают несколько механизмов светоиндуцированной ориентации:

— обратимые фотохимические процессы *цис-транс*-изомеризации, происходящие под действием УФ излучения в азокрасителях, содержащихся в слоях полимеров и чистых красителях;

— фотофизическая переориентация молекул азокрасителей хромофора или в растворах, происходящая под действием поляризованного света;

— фотохимическая сшивка в гребнеобразных полимерах с группами цинноматов;

— фотодеградация в полиимидах.

Первые два механизма являются обратимыми, остальные — необратимыми.

*Цис-транс*-изомеризация, происходящая под действием неполяризованного УФ излучения в слоях чистых азокрасителей, рассматривалась в работах [21, 110, 117]. В них описана обратимая *цис-транс*-изомеризация молекул азобензола, нанесенных на подложку, для изменения ориентации с гомеотропной на планарную (рис. 3.19).

Затем была показана возможность управления ориентацией при экспонировании полимерного ориентирующего слоя с добавками красителя поляризованным светом. Молекулы ЖК в экспонированной зоне ориентировались гомогенно и перпендикулярно вектору поляризации света, сохраняя возникшую ориентацию в отсутствие излучения. Для этого использовались ориентирующие слои полимеров, содержащих производные коричной кислоты в боковых цепях и полиимида [117–119]. Недостатками этих слоев, называемых «командными поверхностями», являются неудовлетворительное обеспечение азимутального направления молекул ЖК при переходе к планарной ориентации, самопроизвольное их возвращение к исходной гомеотропной ориентации и недостаточная фотохимическая стабильность слоя красителей, ограничивающего число реверсивных переключений.

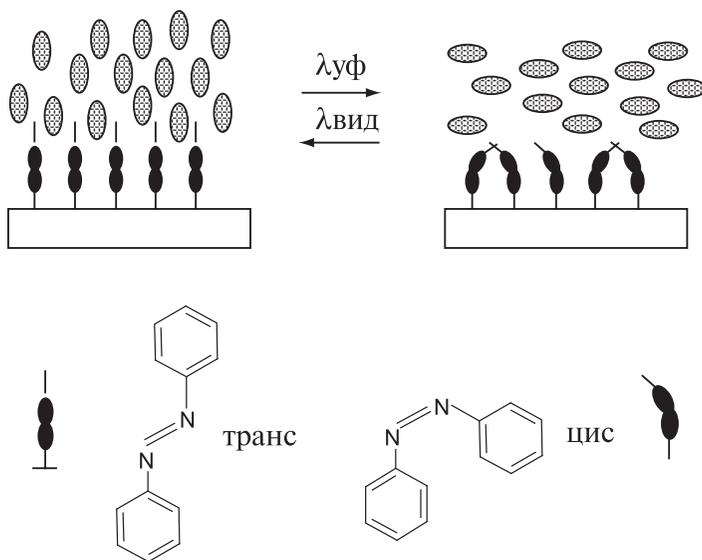


Рис. 3.19. Обратимый переход молекул ЖК из исходной гомеотропной ориентации (слева) к планарной (справа), вызванный *цис-транс*-изомеризацией под действием неполяризованного УФ излучения ( $\lambda_{\text{уф}} = 365$  нм) в молекулах азокрасителей. При воздействии излучения с  $\lambda_{\text{вид}} = 440$  нм восстанавливается исходная гомеотропная ориентация [110]

*Цис-транс* переход в азокрасителях, находящихся в боковых цепях полимеров, под действием поляризованного света изучен в работах [111, 119, 120]. Под действием УФ излучения в них происходит следующий переход: *транс*-изомер, параллельный вектору поляризации УФ света, переходит в *цис*-изомер, а затем в *транс*-изомер, перпендикулярный к вектору поляризации. В результате осцилляторы поглощения ориентируются перпендикулярно к вектору поляризации света (рис. 3.20).

Для светоиндуцированной ориентации использовались молекулы диазодиамина, растворенные в сополимерах кремниевого полиимида [111] и в смесях азокрасителей, введенных в объем ЖК, с использованием эффекта «гость-хозяин» [121]. Светоиндуцированная ориентация НЖК показана на рис. 3.21. Полимерный слой, нанесенный на подложки, подвергался натиранию. ЖК ячейка освеща-

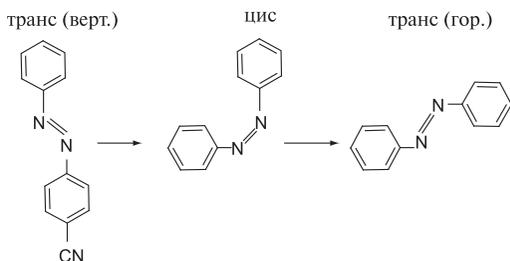


Рис. 3.20. *Цис-транс*-изомеризация, происходящая под действием поляризованного УФ излучения в молекулах азокрасителей в полимере. *Транс*-изомер, параллельный направлению поляризации света, переходит в *цис*-, а затем в *транс*-изомер, перпендикулярный к направлению поляризации света. В результате осцилляторы поглощения ориентируются перпендикулярно к вектору поляризации [120]

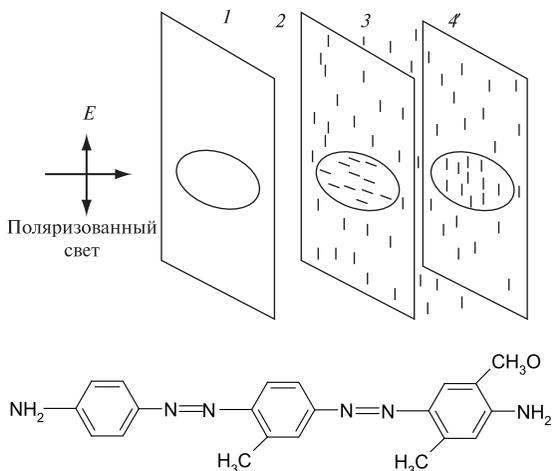


Рис. 3.21 Светоиндуцированная ориентация НЖК фотопolyмерным слоем, сенсibilизированным красителем [111]: 1 — металлическая маска; 2 — передняя подложка с полимером (полиимид), содержащим краситель; 3 — НЖК; 4 — задняя подложка со слоем полиимида

лась через металлическую маску  $\text{Ag}^+$  лазером с  $\lambda = 490$  нм, близкой к области максимального поглощения красителя. Направление поляризации излучения было параллельно натиранию. В освещенной области молекулы азокрасителя переориентировались перпендикулярно направлению поляризации. Возможность записи черно-белых изображений с градацией серого в ЖКЯ была показана в работах [122, 123]. ЖКЯ с зазором 40–50 мкм и исходной планарной ориентацией, обеспеченной натиранием нанесенного на подложки полиимида с азокрасителем, подвергалась воздействию  $\text{Ag}^+$  лазера с длиной волны  $\lambda = 514,5$  нм.

Переориентация молекул азокрасителей перпендикулярно поляризации УФ излучения вызывает соответствующую переориентацию соседних слоев ЖК, повышая контраст оптического изображения. Механизм взаимодействия поляризованного света с молекулами красителя подробно рассмотрен в работах [112, 124].

Энергия сцепления НЖК со светочувствительным полиимидом определена в работах [125–127]. Величина энергии для НЖК (5ЦБ) с ориентирующим слоем фоточувствительного полиимида при световом воздействии и при натирании имеет порядок  $0,1$  мДж/м<sup>2</sup>, причем энергия сцепления со слоем, полученным натиранием, вдвое превысила это значение.

Эффект ориентации молекул азокрасителей (SD-1) перпендикулярно вектору поляризации активирующего излучения впервые наблюдался в пленках Лэнгмюр-Блоджетт (ЛБ) [128, 129]. Были измерены поляризованные спектры поглощения слоя азокрасителя до и после воздействия линейно поляризованного УФ излучения. Кривые поглощения показаны на рис. 3.22.

После облучения линейно поляризованным УФ излучением, вектор поляризации которого параллелен ориентации осциллятора, поглощение уменьшается (кривая 2). Кривая 3, полученная при ориентации осциллятора перпендикулярно вектору поляризации линейно поляризованного УФ излучения, свидетельствует о возрастании поглощения. Было показано, что параметр порядка в ЖК увеличивается с увеличением времени экспозиции и мощности излучения.

Фотохимическая сшивка боковых цепей в гребнеобразных полимерах представляет собой другой механизм для создания светоиндуцированной ориентации ЖК. В одной из первых работ, посвященных переориентации ЖК в поливинил-4-метоксицинонате (ПВМЦ), рассматривалась фотополимеризация его пленок при воздействии линейно поляризованного УФ излучения с  $\lambda = 320$  нм (рис. 3.23) [119].

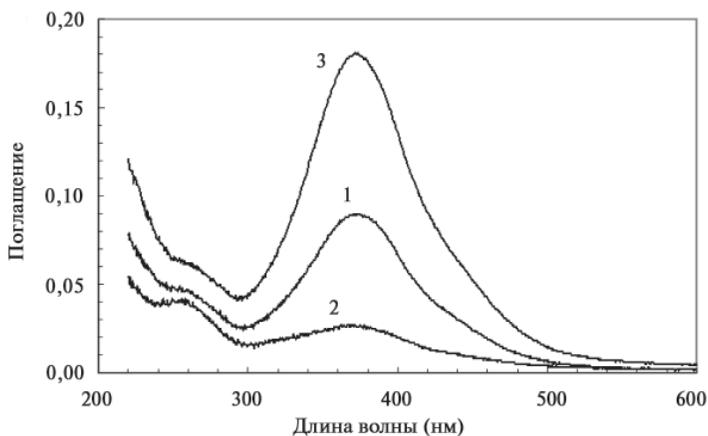


Рис. 3.22. Спектры поглощения красителя SD-1 до экспонирования линейно поляризованным УФ излучением (кривая 1) и после (кривые 2 и 3). Кривая 2 получена при направлении вектора излучения параллельно ориентации осциллятора поглощения, а кривая 3 — перпендикулярно [129]

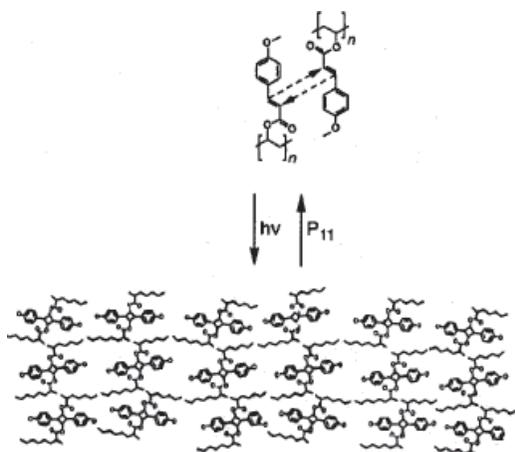


Рис. 3.23. Механизм фотосшивки в поливинил-4-метоксикинномате [119]

Под действием линейной фотополимеризации образуются циклические группы, что резко уменьшает число звеньев цепи, ориентированных параллельно вектору поляризации. Это вызывает анизотропию в распределении молекул циклобутана, ориентированных преимущественно перпендикулярно вектору поляризации излучения, и аналогичную ориентацию молекул ЖК, вызываемую силами межмолекулярного взаимодействия Ван-Дер-Ваальса.

В ряде случаев под действием излучения в некоторых материалах могут одновременно происходить процессы *цис-транс*-изомеризации и образования димеров [131]. В таких случаях ориентация молекул ЖК может совпадать с вектором поляризации излучения (рис. 3.24).

Фотодеградация в полиимидах при воздействии поляризованного света приводит к ориентации молекул ЖК перпендикулярно вектору поляризации [114]. В исходном состоянии цепи полиимида ориентированы случайным образом. При экспонировании излучением

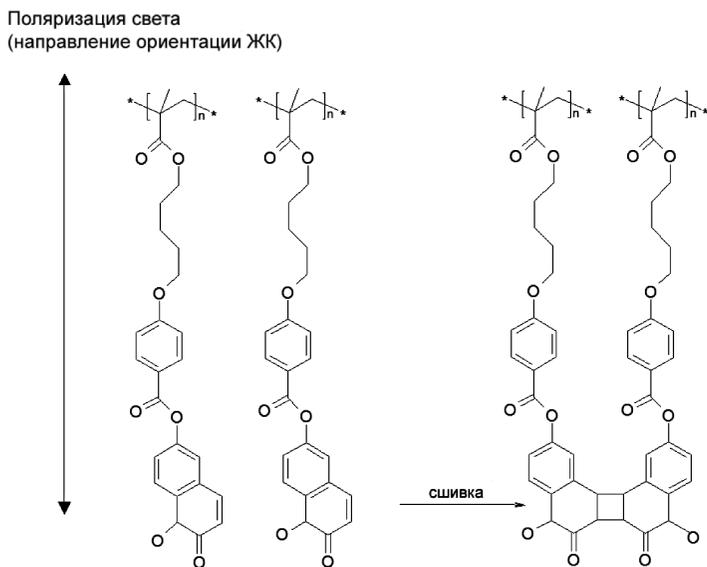


Рис. 3.24. Сшивка боковых цепей полимера с кумарином [131]. Ориентация молекул ЖК совпадает с вектором поляризации излучения

с длиной волны  $\lambda = 257$  нм цепи полиимида, расположенные параллельно вектору поляризованного УФ света, распадаются, и продукты распада оказываются расположенными случайным образом в слое полиимида. Цепи полиимида, расположенные перпендикулярно вектору поляризованного УФ света, остаются неразорванными и вызываются благодаря ван-дер-ваальсовым силам взаимодействия ориентацию молекул ЖК вдоль направления цепей [132].

Величина индуцируемой оптической анизотропии и дихроизма зависит от времени экспонирования и химического состава полимера. Данный метод имеет ряд недостатков: малую величину параметра порядка и соответственно малую величину оптической анизотропии и дихроизма [133]; параметр порядка сильно зависит от времени экспозиции и химического состава веществ и требует тщательного контроля (при длительной экспозиции параметр порядка проходит через максимум и идет к нулю); возникает загрязнение полиимида продуктами фотодegradации. Продукты распада приводят к образованию ионов, ухудшая в устройствах отображения качество изображения [134] и уменьшая термостабильность ЖК ориентации [135]. Из множества рассмотренных материалов большей термостабильностью обладали фотоориентирующие слои с минимальным содержанием цинномата.

Возможность ориентации нематических (и холестерических) полимерных ЖК на отдельных свободных поверхностях показана в работе [136]. Фотополимеризующиеся слои с различной конфигурацией директора ЖК были помещены в тонкую оптически анизотропную пленку. Такие элементы используются для расширения поля зрения экранов мониторов и ТВ; в качестве непоглощающих интерференционных цветных фильтров; фазовых пластинок с положительной или отрицательной задержкой; дихроичных поляризаторов; интерферометров Маха-Цендера для интегральной оптики; фазовых меток высокого разрешения для элементов оптической защиты. К этому следует добавить возможности их использования в качестве противобликующих покрытий, диффузоров и отражателей для разного рода информационных дисплеев [137, 138].

Для практического применения светоиндуцированной ориентации ЖК необходимо обеспечивать конкретные величины энергии сцепления и углы наклона молекул ЖК к подложке со слоем ориентанта. Фотоориентируемые слои ПВМЦ позволяли получать однородные углы наклона молекул ЖК, однако энергия сцепления  $4,2 \cdot 10^{-6}$  Дж/м<sup>2</sup>, была существенно ниже, чем в полимере после на-

тирания [137]. Это приводило к нарушению ориентации ЖК при нагревании слоя до 70 °С. Для повышения термостойкости были разработаны новые ориентанты на основе производных цианобифенил цинномата [139]. Они обеспечили термостойкость при температуре 120 °С в течение 50 часов. Для повышения термостабильности ориентации слоев ЖК были также использованы смеси полиимидов и фотореактивных полимеров при воздействии поляризованного УФ излучения [140].

Термостабильная ориентация с углом наклона 5,3° была достигнута в пленках азокрасителей за счет двухступенчатого экспонирования сначала поляризованным, а затем неполяризованным светом. Для получения малых углов наклона порядка 3° можно освещать ориентант на основе полиимида неполяризованным УФ светом [141]. Большие углы наклона можно получить при косом освещении ориентанта неполяризованным светом.

Результаты сравнения энергии сцепления молекул одного и того же ЖК при ориентации, обеспечиваемой натиранием и световым воздействием приведены в работе [142].

Сведения о светоиндуцированной ориентации дают основания полагать, что эта технология изготовления оптических устройств на основе ЖК станет основным методом ориентации [143].

### ***3.2.6. Бистабильная и мультистабильная ориентации***

Для различного рода модуляторов и дисплеев большое значение имеют бистабильная и мультистабильная ориентации, а также расположение молекул в каплях ЖК, диспергированных в полимерной матрице и стесненных объемах. В ЖК дисплеях бистабильная ориентация сокращает расход энергии: она будет использоваться только на стадии переключения молекул НЖК из одного направления в другое.

Получение бистабильной ориентации основано на упругих свойствах НЖК и топологии подложки. В этом случае имеется два минимума локальной энергии, разделенных энергетическим барьером, превышающим тепловые воздействия. Положения минимума энергии определяются из уравнения  $\nabla^2\theta = 0$  в одноконстантном приближении [144]. Гомеотропная ориентация не может плавно переходить в планарную и разделена стенками со скачкообразным изменением ориентации. Стабильные положения ориентации наблюдаются при наложении электрического поля в вертикальном

направлении и магнитного поля (10 кГс) — в горизонтальном. Была получена стабильная долговременная ориентация и электрически управляемое переключение при напряжении 70 В за время 80 мс. В этом случае дисклинации выполняют полезную функцию.

На рис. 3.25 показана ЖКЯ, подложки которой обработаны так, чтобы создать одинаковые, но противоположно направленные углы наклона молекул НЖК.

В работах [146–148] исследована бистабильность, состоящая в образовании поверхностных слоев с несколькими степенями свободы в толще НЖК и не зависящая от параметров материала (рис. 3.26). Другой эффект бистабильности при малой величине анизотропии энергии сцепления и анизотропии  $\Delta\epsilon$  предсказан исходя из теории континуума [149].

Косонапыленные пленки  $\text{SiO}_2$  на стеклянные подложки также создают мультбистабильную ориентацию [150]. Директор ориентирован на некий полярный угол, занимая одно из двух возможных азимутальных положений симметрично относительно напыленного рельефа пленки. Приложением электрического поля можно переключать директор из одного стабильного положения в другое [151]. Сообщается, что бистабильная ориентация может быть получена в слоях ЖК азополимеров при облучении линейно поляризованным УФ светом [152].

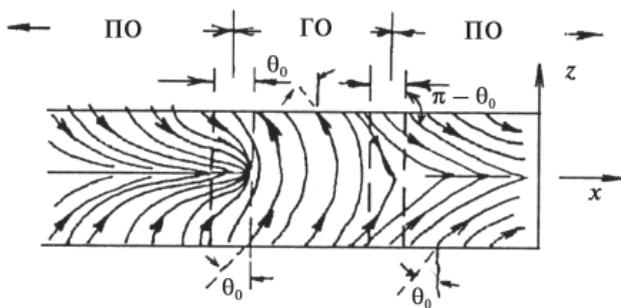


Рис. 3.25. Бистабильные планарная (ПО) и гомеотропная ориентации (ГО), характеризующиеся одинаковыми, но противоположными углами наклона молекул  $\theta_0$ . Штриховыми линиями обозначены стенки, разделяющие домены с различной ориентацией [145]

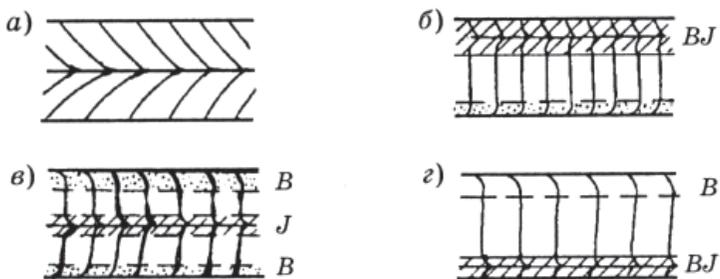


Рис. 3.26. Ненарушенная (а) и нарушенные под действием электрического поля (б–г) конфигурации горизонтальной ориентации молекул ЖК в граничных слоях В и J: симметричная (в) или асимметричная (б), (г) относительно среднего слоя

Если нематик наносится на поверхность твердого кристалла, обладающего  $n$  плоскостями симметрии, то директор может выбрать любую из возможных ориентаций, например, вдоль одного направления легкого ориентирования. Предпочтительная ориентация определяется предысторией образца. Так, если создать плоский капилляр между двумя анизотропными подложками с направлениями легкого ориентирования, совпадающими с направлением заполнения НЖК, то директор ориентируется параллельно направлению заполнения.

Если подложки ориентированы произвольно друг относительно друга, то доменная структура формируется закрученной в каждом домене в соответствии с граничными условиями. Если же направления легкого ориентирования на противоположных подложках совпадают и нет условий для предпочтительного ориентирования вдоль какой-либо из  $n$  осей, то образуется  $n$  доменов с однородной ориентацией директора в каждом из них. Создавая внешнее поле в плоскости подложек, можно переключать домены из одной возможной ориентации в другую. Каждая из устойчивых ориентаций директора отделена от соседней потенциальным барьером, равным половине азимутальной энергии сцепления (рис. 3.26). Мультистабильная ориентация на сколах твердых кристаллов может давать полезную информацию о свойствах структуры поверхности этих материалов, что будет рассмотрено разделе, посвященном исполь-

зованию ЖК в качестве регистрирующих сред. Особый интерес представляет мультидоменная ориентация для обеспечения большого угла обзора в ЖК-дисплеях.

Новой концепцией в ориентации ЖК является разработка электрически управляемых «командных» ориентирующих поверхностей (ECS). Одна из первых попыток создания управляемых граничных условий в реальном времени на основе реверсивного осаждения ориентанта при переносе заряда в ЖКЯ описана в работе [153]. Однако в реализации этой идеи не удалось найти материалы, обеспечивающие большое количество циклов переориентации. Идея оказалась реализованной на основе использования сегнетоэлектрических ЖК полимеров. Принцип основан на том, что переориентация молекул сегнетоэлектрических ЖК полимеров, осуществляемая электрическим полем, благодаря упругим силам сцепления передается объему ЖК [154]. Это открывает возможности для создания различных ЖК модуляторов.

### *3.2.7. Ориентационные переходы в НЖК*

Директор на поверхности может спонтанно переориентироваться при изменении температуры или нанесении НЖК на поверхность, покрытую пленкой другого материала. Изменяя толщину пленки можно изменять ориентацию в объеме. Такая переориентация имеет много общего с фазовым переходом и потому называется «ориентационным переходом» или «локальным переходом Фредерикса» [155–157]. Пример ориентационного перехода показан на рис. 3.27 [156]. В качестве подложки использовали скол слюды мусковит, ван-дер-ваальсово поле которого убывает с расстоянием медленнее  $z^{-3}$ . На слюду по методу Лэнгмюр-Блоджетт (ЛБ) наносили лесенку молекулярных монослоев стеариновой кислоты, на каждую ступеньку которой помещали каплю нематика (МБА, 5ЦБ). Анизотропное ван-дер-ваальсово взаимодействие слюды с НЖК вызвало планарную ориентацию с картиной, приведенной на рис.3.27г, (пленка стеариновой кислоты отсутствует). При увеличении толщины изолирующей пленки из-за противоборства ориентирующего действия сил сцепления с НЖК с ЛБ-пленкой и дисперсионного поля слюдяной подложки происходил локальный переход Фредерикса от планарной к гомеотропной ориентации.

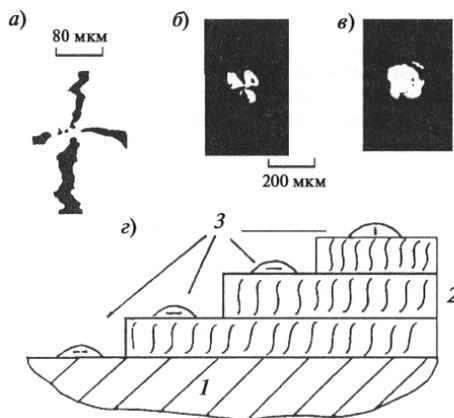


Рис. 3.27. Локальный переход Фредерикса [156]: *a* — слои ЛБ отсутствуют; *б* — два слоя ЛБ пленки толщиной  $100 \text{ \AA}$ ; *в* — три слоя толщиной  $150 \text{ \AA}$ ; *г* — образец: 1 — слюда; 2 — ступени ЛБ слоев; 3 — капли МББА.

Толщина переходного слоя из исходной планарной ориентации в наклонную составила  $150 \text{ \AA}$  для МББА и  $500 \text{ \AA}$  для 5ЦБ, что соответствует радиусу действия дисперсионных сил. Ориентационный переход был использован при разработке объективной диагностики злокачественных тканей с использованием тонких слоев НЖК (см. часть 5).

Спонтанная переориентация молекул НЖК при изменении температуры описана в работах [158, 159]. Пороговый переход из планарной в гомеотропную ориентацию наблюдался при уменьшении температуры в нематической фазе ЖК, молекулы которого имели большой поперечный дипольный момент (рис. 3.28). Плавное изменение ориентации от гомеотропной к конфокальной наблюдалось в ЖК с относительно меньшим дипольным моментом. Ориентационные переходы объясняются изменением с температурой сил взаимодействия на границе ЖК-подложка. Пороговый переход первого рода с большим гистерезисом может быть использован для создания устройств с памятью и в светоправляемых дисплеях.

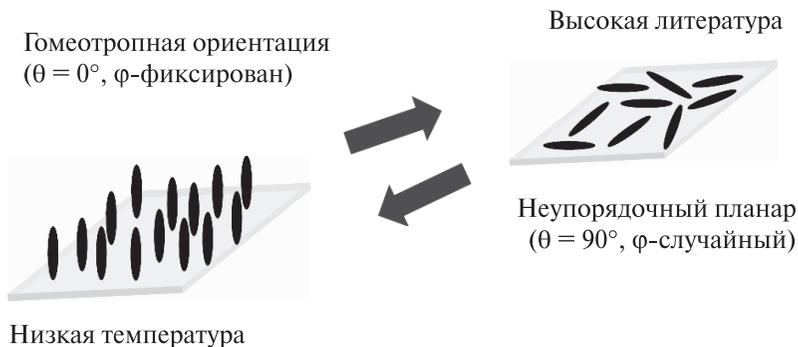


Рис. 3.28. Ориентационный переход в НЖК при изменении температуры [158]

На описанном принципе возможно также создание электрически управляемых бистабильных устройств.

### 3.2.8. Ориентация ХЖК, СЖК, С\*ЖК и ДЖК

В случае ХЖК и СЖК различают следующие виды ориентации (рис. 3.29): планарная (а), квазипланарная (б), гомеотропная (б) и конофокальная (с).

В планарной холестерической структуре молекулы ориентированы параллельно подложкам, а оси спирали перпендикулярно к ним. Гомеотропная текстура с осями спирали, параллельными подложкам, проявляется как текстура «отпечатков пальцев». Неупорядоченная текстура состоит из конфокальных доменов.

Для ориентации ХЖК, смесей НЖК и ХЖК, СЖК и С\*ЖК используются те же методы, что и для ориентации НЖК. В качестве примера рассмотрим поведение смеси МБА и холестерилхлорида (1 % по массе) с шагом спирали 15 мкм в клиновидной ячейке. Если подложки не обработаны, то возникает конфокальная текстура. На подложках, обработанных карбоксилатным комплексом [160], при толщине ЖКЯ 12 мкм наблюдается полное раскручивание спирали под действием сил поверхности. При больших толщинах формируется текстура «отпечатков пальцев». Критическая толщина раскручивания спирали является характеристикой ориентирующего воздействия подложки.

Сведений по ориентации чистых холестериков мало [161]. В термографии, где нужна планарная ориентация, она достигается сдви-

гом верхней подложки относительно нижней или при растекании структуры по нагреваемой поверхности. Молекулу холестерика можно представить в виде гидрофильной головки и двух гидрофобных цепочек. Подложки также разделяют на гидрофильные и гидрофобные. Наиболее сильное взаимодействие с гидрофильной поверхностью происходит при приближении к ней ядра молекулы, т. е. при планарной ориентации. На гидрофобной поверхности молекула холестерика ориентируется гомеотропно, что приводит к образованию конфокальной текстуры. Полиэтилентерафтолат и целлулоид содержат группы, определяющие гидрофильность и, следовательно, планарную ориентацию. Она же возникает на чистом стекле и слюде, что объясняется их большой полярностью с учетом адсорбированной из атмосферы воды. Полиэтилен имеет гидрофобную поверхность, индуцирующую конфокальную текстуру холестерика.

Ориентирующее действие лецитина на ряд холестериков и нематиков с оптически активной добавкой, заключенных в зазор между стеклянной пластиной и плоско-выпуклой линзой, изучали с помощью поляризационного микроскопа. Переход холестерика в нематическую фазу происходил лишь до определенной толщины  $d$  порядка шага холестерической спирали  $p: d = kp$ . Для различных материалов параметр  $k$  изменялся в пределах  $0,77-0,88$ .

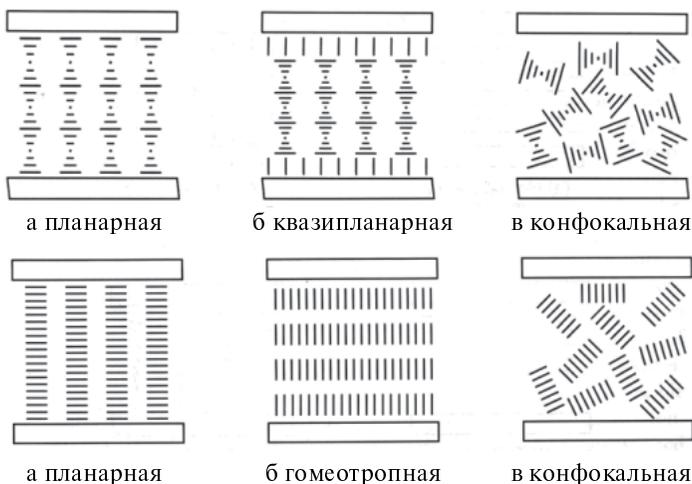


Рис. 3.29. Различные виды ориентации ХЖК (верхний ряд) и СЖК (нижний ряд)

Ориентация смектиков является более сложной задачей, хотя и для них применимы методы, разработанные для ориентации нематиков. Трудности ориентации связаны со слоистой структурой смектиков и упорядоченностью в слоях. В СЖК А молекулы ориентированы перпендикулярно к слою и положение слоев задается молекулярной ориентацией. В наклонных фазах необходимо различать ориентацию молекул и слоя.

В свободно наносимых смектических пленках изучались два аспекта взаимодействия с поверхностью. Первый состоял в изучении очень тонких слоев (до двух) как модели двумерной физической системы с фазовыми переходами первого и второго рода [162–164]. Поскольку количество слоев в пленке можно изменять от двух до нескольких сотен, то такие пленки позволяют выявлять различия в поведении двумерных и объемных объектов, обусловленные появлением новых фаз при изменении температуры, толщины слоя и сдвигом температуры переходов.

Вторая проблема состоит в ориентации смектических ЖК поверхностью. Проще всего ориентируется смектик А, имеющий структуру подобную нематику. Так, ориентация смектика А, получаемого охлаждением из нематической фазы, осуществлялась вакуумным осаждением ориетанта ( $\text{SiO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Al), дающего планарную ориентацию нематикам [165]. Исследовались соединения, имеющие нематическую и смектическую фазы: 4-циано-4-н-октилбифенил, 4-нитрофенил-4-н-октилоксибензоат, 4-гексилорксфенил-4-н-децилоксибензоат. При охлаждении из нематической фазы изучали текстуру ЖК и измеряли угол наклона молекул к подложке. Было установлено скачкообразное изменение угла наклона при переходе из нематической в смектическую фазу, причем в смектике он всегда меньше (рис. 3.30).

Угол наклона в смектической фазе оказался зависящим от угла наклона в нематической фазе и молекулярной текстуры. При многократном охлаждении и нагреве образцов выявлено необратимое изменение ориентации, объясняемое сильной и слабой энергиями сцепления.

Если смектик А смешивается с хиральной компонентой, то созданная на поверхности ориентация не сохраняется в объеме. На твердой подложке, обработанной натиранием, в совпадающем с ним направлении укладывается только пограничный монослой, в объеме угол ориентации отклоняется от направления натирания примерно на  $10^\circ$ . Это указывает на важную роль микроструктуры поверхности материала.

Более детально изучалась ориентация хиральных смектиков С\* с геликоидальной структурой: в каждом слое молекулы наклонены

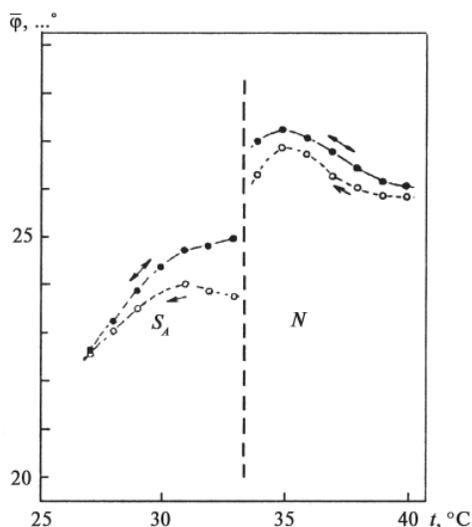


Рис. 3.30. Зависимость угла наклона молекул к подложке  $\varphi$  от температуры для 4-циан-4-н-октилбифенила: ● — большая энергия сцепления; ○ — слабая энергия сцепления; --- — граница фазового перехода;  $\leftrightarrow$  — направление изменения температуры [166]

в некоем направлении, которое линейно изменяется при движении по нормали к слою. Интерес к таким структурам с сегнетоэлектрическими свойствами возрос после того, как была показана возможность создания элементов с поверхностной стабилизацией сегнетоэлектрического ЖК. Они основаны на тонкостенных ячейках, в которых стенки задают ориентацию молекул, раскручивая смектическую спираль и стабилизируя несколько положений ориентации молекул в ячейке, переключения в которые происходит при наложении электрического поля [167–169].

Рассмотрим случай, когда подложки создают слабое сцепление при планарной ориентации (рис. 3.31). Для этого молекулы должны располагаться параллельно поверхности и составлять с нормалью к слою угол  $\psi_0$ , определяемый структурой. Эти условия обеспечивают два возможных положения, в которых ориентация молекул однородна

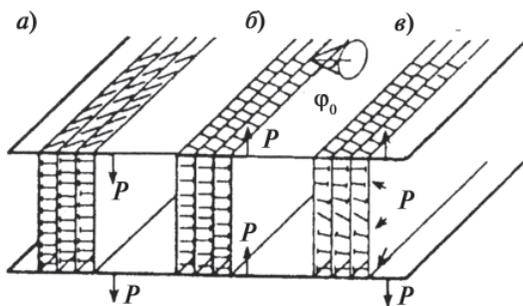


Рис. 3.31. Стабилизированная поверхностью сегнетоэлектрическая ЖКЯ: а, б — однородная ячейка; в — с вращением вектора поляризации  $\mathbf{P}$

(рис. 3.31а,б). Если наложить электрическое поле, они могут перестроиться из одного положения в другое вращением молекул по образующей конуса из направления, стабилизированного одной поверхностью, в другое на другой поверхности. При этом вектор поляризации  $\mathbf{P}$  остается перпендикулярным к обеим поверхностям (рис. 3.31в). Это является результатом полярного взаимодействия сегнетоэлектрического ЖК и поверхности. Дополнительные свидетельства полярного характера взаимодействия получены при рассмотрении электроклининого эффекта в смектической фазе А хирального материала.

Изготовление таких ЖКЯ требует ориентации молекул параллельно поверхности, а слоев — перпендикулярно к поверхности. Обработка поверхности влияет только на ориентацию молекул. Ориентация слоев достигается в смектической фазе А внешним полем, после чего образец охлаждается в смектическую С-фазу. Стенки фиксируют положение слоев, имеющих толщину  $d_A$  в смектической А-фазе и меньшую толщину  $d_C$  в С-фазе из-за наклона молекул к нормали слоя. Фиксирование слоев поверхностью приводит к их наклону в объеме под углом  $\delta_C$  так, что  $d_C = d_A \cos \delta_C$  [41]. Ориентация оказывается сложной в реализации: достигаемая конфигурация минимизирует сумму поверхностной энергии и объемной упругой энергии, каждая из которых в отдельности не минимизируется. Было показано, что на натертой по полиимиду поверхности, обеспечивающей одно легкое направление, параллельное натиранию, ориентация молекул происходит под углом к поверхности и вне плоско-

сти, перпендикулярной к поверхности и включающей направление натирания. Ухудшение такой ориентации может происходить из-за присутствия ионов, снижающих качество полимерного ориентирующего слоя. Сверхтонкие слои силана и SiO (до 75 Å) уменьшают воздействие ионов и позволяют в зависимости от режима обеспечивать планарную или гомеотропную ориентацию.

Светоиндуцированные методы могут использоваться для ориентации лиотропных и термотропных дискотиков [170, 171]. Для этого на поверхность с напыленным слоем SiO наносился слой полимера на основе азофенилметокрилата с fotocувствительными группами цианазобензола толщиной 20 нм. Экспозиция осуществлялась неполяризованным светом под углом 45° или по нормали поляризованным светом с  $\lambda = 436$  нм с энергией 3 Дж/см<sup>2</sup> для обеспечения соответственно наклонной или гомеотропной ориентации (рис. 3.32).

а неполяризованный б линейно поляризованный свет

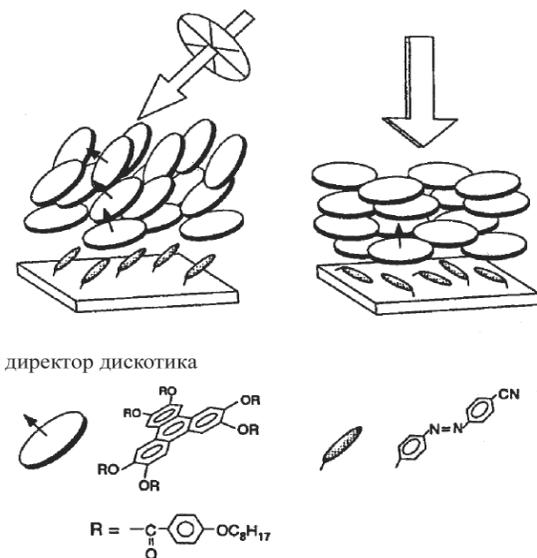


Рис. 3.32. Наклонная и гомеотропная ориентации ДЖК на тонкой пленке азосоединений, экспонированных соответственно наклонным пучком неполяризованного света и нормально падающим пучком поляризованного света

### 3.2.9. Микроскопические методы исследования ориентации ЖК

В последние годы для исследования ориентации ЖК в объеме нашли применение методы атомно-силовой, сканирующей туннельной и конфокальной микроскопии. В одной из первых работ приведены полученные с помощью сканирующего туннельного микроскопа изображения молекул двухкомпонентной смеси 8ЦБ и 12 ЦБ на поверхности  $\text{MoS}_2$  и ее графическая интерпретация [172]. Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) был применен для исследования гомеотропно ориентированного слоя НЖК. Было обнаружено, что при формировании этого слоя первым монослоем является двумерный СЖК, далее идет переходная область, где реализуется фазовый переход СЖК  $\rightarrow$  НЖК, а выше формируется НЖК [173].

Методы атомно-силовой и сканирующей поляризационной микроскопии были применены для исследования ориентации НЖК в объеме, в частности, в направлении, перпендикулярном к подложке (по оси Z) [174]. На рис. 3.33 представлена принципиальная схема определения ориентации молекул. Сверхминиатюрный зонд, представляющий собой оптическое волокно с внутренним диаметром 50 нм, помещен в слой НЖК. Источником излучения является He–Ne лазер ( $\lambda = 532$  нм), свет от которого проходит поляризатор, фазовые пластинки, модулятор и направляется в сканирующий зонд. Далее свет проходит через слой НЖК, анализатор и объектив, после чего регистрируется светоприемником и после обработки выводится на экран персонального компьютера (рис. 3.34).

В работе было предложено использовать кантилевид АСМ для создания нанорельефа на подложке, покрытой полиимидом. Создание регулярного нанорельефа представляет интерес для его использования в качестве ориентирующего слоя в дисплейных применениях. Принцип создания нанорельефа иллюстрирует рис. 3.35.

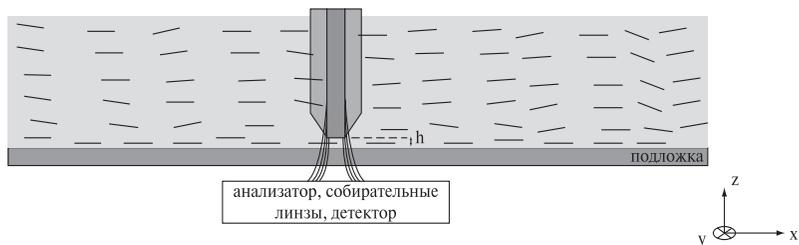


Рис. 3.33. Схема определения ориентации молекул НЖК в объеме слоя



Рис. 3.34. Принципиальная схема установки для сканирования зонда микроскопа сверхвысокого разрешения относительно слоя НЖК

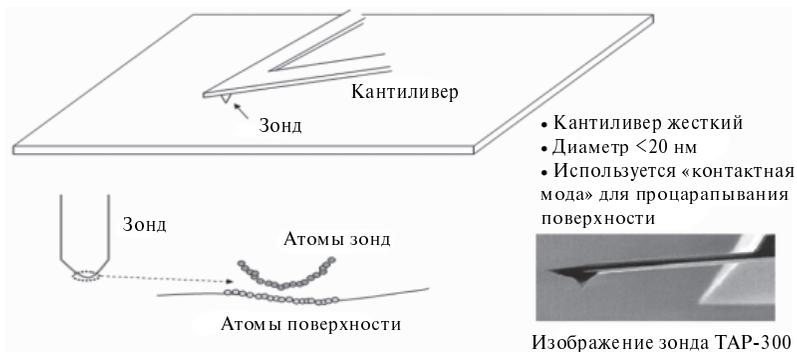


Рис. 3.35. Принцип создания нано рельефа на подложке [174]

Кантиливер, представляющий собой жесткую консоль, содержит зонд, выполненный в виде иглы с диаметром острия около 20 нм. Этим зондом он процарапывает поверхность, снимая слой атомов, как показано на рис. 3.35. Изменяя направление сканирования зонда, можно получить различный рельеф поверхности с определенным профилем и углом наклона борозд. На подложку со сформированным нанорельефом наносился свободный слой НЖК, ориентация молекул которого по оси *Z* исследовалась с помощью зонда. Было обнаружено, что в непосредственной близости от подложки (до 200 нм) ориентация молекул совпадает с рельефом поверхности. При увеличении расстояния до 500 нм влияние рельефа на ориентацию существенно ослабевает. Метод позволяет эффективно определять ориентацию молекул в объеме НЖК.

Для изучения характера ориентации директора в объеме слоя ЖК нашел применение метод флуоресцентной конфокальной поляризационной микроскопии (ФКПМ) [175–179]. ФКПМ описан в работе [180]. Принципиальная схема микроскопа для изучения ориентации ЖК в объеме приведена на рис. 3.36. В изучаемый ЖК добавлялся флуоресцентный краситель. В работе [175] были исследованы НЖК и СЖК А с добавкой красителя *n*, *n*'-бис(2,5 ди-терт-бутилфенил)-3,4,9,10-перилен-едикарбокси-мида с помощью микроскопа Olympus Fluoview BX-50, оснащенного поляризаторами. Возбуждающее флуоресценцию излучение осуществлялось Ar-лазером ( $\lambda = 488$  нм). Лазерный луч фокусировался объективом в малый объем ЖК ( $< 1$  мкм<sup>3</sup>). Флуоресценция от этого объема регистрировалась с помощью фотоумножителя (РМТ1) в спектральном диапазоне 510–550 нм. Диафрагма диаметром 100 мкм, расположенная перед фотоумножителем, ограничивала сигнал от соседних от выбранного объема зон. Малая мощность лазера (100 нВт) исключала влияние излучения на ориентацию молекул красителя. Интенсивность флуоресценции была максимальной, когда поляризация излучения была параллельна директору, и минимальной, когда перпендикулярна ему. Сильная зависимость интенсивности флуоресцентного сигнала от ориентации красителя позволяла определять ориентацию молекул ЖК в объеме. Сканирование фокусированного луча по горизонтали и вертикали (по оси *Z*) давало полную картину ориентации в объеме. Разрешение по оси *Z* составило около 1 мкм. Существующие методы обработки изображений позволяют придавать различные цвета областям излучения различной интенсивности, что делает более наглядными результаты эксперимента.



Рис. 3.36. Принципиальная схема ФКПМ для изучения ориентации ЖК в объеме.

Рассмотренная методика была использована для исследования эффекта Фредерикса в ЖКЯ при различных величинах управляющего напряжения (рис. 3.37).

Предложенный метод позволяет исследовать динамику процесса переориентации молекул с временным разрешением 1 мс, а также ориентацию молекул в окрестности дефектов в объеме ЖК [176–179].

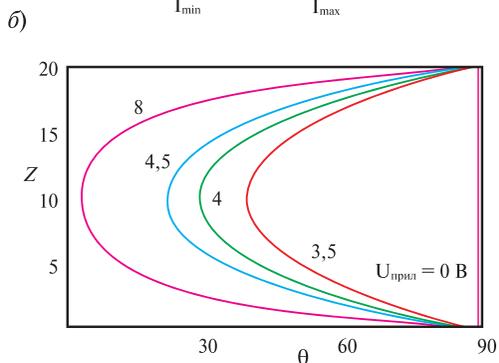
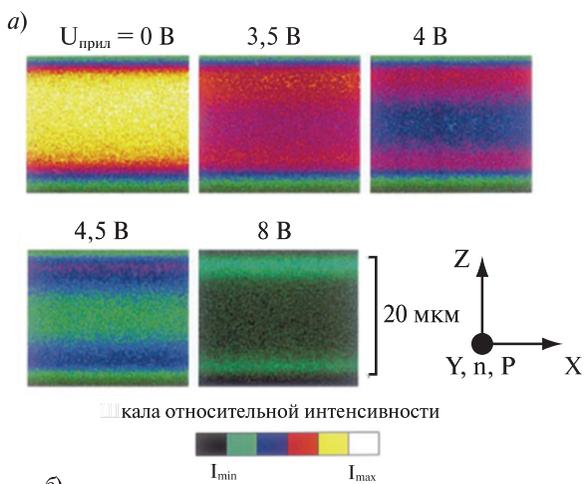


Рис.3.37. Картины распределения интенсивности излучения в сечениях по вертикали в ЖКЯ (а) и результаты компьютерного моделирования угла и между директором и нормалью к поверхности (б) при переходе Фредерикса в НЖК

Рассмотренные методы ориентации молекул ЖК на подложке позволяют задать необходимые граничные условия для реализации различных оптических эффектов в ЖК.

### Литература к главе 3

1. *Sonin A.A.* Freely suspended liquid crystalline films. J. Wiley, Chichester. 1998.
2. *Raynes E.P.* Electro-optic devices using liquid crystals / in Gunter P.: Electro-optic and photorefractive materials // Springer Verlag, Berlin. 1986. P. 99–109.
3. *Crawford G.P.* Liquid-crystal technology // SID'02. Seminar Lecture Notes. M-2. 2002. 28 p.
4. *Онохов А.П., Буркат Т.М., Добычин Д.П.* и др. Влияние лазерной обработки на структуру и оптические свойства поверхности полированного кварцевого стекла // Физика и химия стекла. 1991. Т. 17. № 6. С. 908–913.
5. *Томлин М.Г.* Какая дисплейная технология победит в битве за большой экран? // Оптический журнал. 2004. Т. 71, № 10. С. 85–88.
6. *Kikuo Tominaga et. al.* ITO films prepared by facing target-sputtering system. Thin Solid Films. 1996. Vol. 281. P. 194-197.
7. *Онохов А.П., Исаев М.В.* Лазерное напыление в технологии создания жидкокристаллических устройств // Оптический журнал. 2001. Т. 68. №9. С. 83–88.
8. *Толмачев В.А., Васильев П.Я., Онохов А.П.* Исследование оптического профиля покрытий на основе  $\text{In}_2\text{O}_3\text{--SnO}_2$  методом эллипсометрии // Опт. журн. 1998. Т. 65. № 2. С. 28–32.
9. *Couljon D., Sarayeddine K., Spajer M.* Scanning tunneling microscopy // SPIE. 1989. Vol. 1139. Optical Storage and Scan. Techn. P. 68–72.
10. *Wu Sh.-T.* Homeotropic liquid crystal cell with compensating film for direct observation display // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76. № 10. P. 5975.
11. *Bos P.J., Koehler K.R.* The p-cell: a fast liquid crystal optical switching device // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1984. Vol. 113. P. 329–339.
12. *Haven T.J.* True 3D imaging techniques... // SPIE. 1987. Vol. 761. P. 23–26.
13. *Wang X., Kiluk S., Chang K.* et al. Microcup electronic paper and converting processes // Proceed. of ASID'04. 2004. Nanjing, China. P. 396–399.
14. *Zang H., Hwang J.-J., Gu H.* et al. Threshold and grayscale stability of microcup electronic paper // Techn. progr. and summary digest of IS&T / SPIE 16-th annual symp. Electr. Imaging. 2004. 5289A-12. P. 63.
15. *Коньяр Ж.* Ориентация НЖК и их смесей. Минск: БГУ. 1986. 104 с.
16. *Матвиенко В.Н., Курсанов Е.А.* Поверхностные явления в ЖК. М.: МГУ. 1991. 272 с.
17. *Sonin A.A.* The surface physics of liquid crystals. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers. 1995. 192 p.
18. *Blinov L.M., Chigrinov V.G.* Surface phenomena // In a book: Electrooptic effects in LC materials. Berlin: Springer-Verlag. 1994. P. 97–131.
19. *Томлин М.Г.* Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. СПб.: Изд. Политехника. 2001. 325 с.

20. *Chigrinov V.G., Kozenkov V.M. Kwok H.S.* New developments in photo-aligning and photo-patterning technologies: physics and applications // In a book «Optical Applications of Liquid Crystals», Ed. by L. Vicari, Institute of Physics Publishing. Bristol and Philadelphia. 2003. P. 201–244.
21. *Takotoh K., Hasegawa M., Koden M., Itoh N., Hasegawa R., Sakamoto M.* Alignment technologies and applications of LC devices. Taylor & Francis. 2006. 320 p.
22. *Chigrinov V.G.* Liquid crystal devices: physics and applications. Artech House. 1999. 357 p.
23. *Goossens W.J.A.* Bulk, interfacial and anchoring energies of LCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1985. Vol. 124. P. 305–331.
24. *Лукьянченко Е.С., Козунов В.А., Григорьев В.И.* Ориентация ЖК // *Успехи химии.* 1985. Т. 54. Вып. 2. С. 214–238.
25. *Блинов Л.М., Кац Е.И., Сонин А.А.* Физика поверхности ЖК // *УФН.* 1987. Т. 152. Вып. 3. С. 449–477.
26. Rasing T., Musevich I. Surface and interface of LCs. Springer. 2004. 410 p.
27. *Блинов Л.М., Раджабов Д.З., Субачус Д.Б.* и др. Определение анизотропной части поверхностного термодинамического потенциала НЖК // *Письма в ЖЭТФ.* 1991. Т. 53. Вып. 4. С. 223–227.
28. *Rapini A., Popoular M.J.* Distorsion d'une lamelle nematique sous champ magnetique conditions d'ancrage aux parois // *J. Phys. Colloq. (Paris).* 1969. Vol. 30. NC4. P. 54–57.
29. *Барник М.И., Блинов Л.М., Коркишко Т.В.* и др. Новый вид граничных условий при ориентационных деформациях в гомеотропных слоях НЖК // *Журн. эксп. и теорет. физики.* 1983. Т. 85. С. 176–185.
30. *Barbero G., Evangelista L.R.* Adsorbtion phenomena and anchoring energy in NLCs. Taylor & Francis. 20005. 368 p.; Barbero G., Madhusudana N.V., Palierne J.F. Optical determination of large distortion surface anchoring torques in NLC // *Phys. Lett.* 1984. Vol. 103 A. № 8. P. 385–388.
31. *Yang K.H.* Weak boundary storage LC display // *J. Phys. Colloq. (Paris).* 1983. Vol. 44. P. 1051–1059.
32. *Yokoyama H., Van Sprang H.A.* A novel method for determination the anchoring function at a NLC wall interface from director distortions at high fields // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 57. № 10. P. 4520–4526.
33. *Barbero G., Durand G.* On the validity of the Rapini-Papoular surface anchoring energy form in NLCs // *J. Phys. Colloq. (Paris).* 1986. Vol. 47. P. 2129–2134.
34. *Марусий Т.Я., Резников Ю.А., Решетняк В.Ю.* и др. Энергия сцепления НЖК с ориентирующими поверхностями. Методы определения // *Препринт № 8.* Киев: ИФ АН УССР. 1988. 10 с.
35. *Faetti S., Gatti M., Paleshi V.* et al. Almost critical behavior of the anchoring energy at the interface between a NLC and SiO substrate // *Phys. Rev. Lett.* 1985. Vol. 55. № 16. P. 1681–1684.
36. *Гуняков В.А., Паршин А.М., Подопрigора В.Г.* и др. Определение энергии сцепления из S-эффекта на тонких нематических пленках в силь-

ном магнитном поле // Препринт № 629Ф. Красноярск: ин-т физики им. Л.В. Киренского СО АН СССР. 1990. 24 с.

37. *Motooka T., Fukuhara A.* Fredericks transition and anchoring effects in the oblique configuration of a NLC // *Appl. Phys. Lett.* 1979. Vol. 34(5). P. 305–306.

38. *Блинов Л.М., Сонин А.А.* Определение энергии сцепления нематиков с кристаллическими подложками по данным измерения электрооптических эффектов // *Журн. экспер. и теорет. физики.* 1984. Т. 87. Вып.2(8). С. 476–482.

39. *Rosenblatt C.* Temperature dependence of the anchoring strength coefficients of a NLC-wall interference // *J. Phys.* 1984. Vol. 45. № 6. P. 1087–1091.

40. *Jerome B.* Surface effects and anchoring in LCs // *Rep. Prog. Phys.* 1991. Vol. 54. P. 391–451.

41. *Kahn F.J., Taylor G.N., Schonhorn H.* Surface-produced alignment of LCs // *Proc. IEEE.* 1973. Vol. 61. P. 823.

42. *Creage L.T., Kmetz A.R.* Mechanism of surface alignment in NLCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1973. Vol. 24. P. 59.

43. *Адамсон А.* Физическая химия поверхностей. М.: Мир. 1979. 586 с.

44. *Castellano J.A.* Surface anchoring of LC molecules on various substrates // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. Vol. 94. P. 33–41.

45. *Chatelain P.* Sur l'orientation des cristaux liquids par les surfaces frottees // *Bull. Soc. Fr. Min.* 1943. Vol. 66. P. 33–41.

46. *Mada H.* Surface stress anisotropy of treated glass and LC alignment // *J. Chem. Phys.* 1981. Vol. 75(1). P. 372–375.

47. *Лукьянченко Е.С., Козунов В.А., Григос В.И.* и др. Взаимодействие НЖК с анизотропными полимерными поверхностями // *Поверхность. Физика, химия, механика.* 1985. № 2. С. 121–125.

48. *Dubois J.C., Gazard M., Zahn A.* Liquid crystal orientation by polymeric surfaces // *J. Appl. Phys.* 1976. Vol. 47, № 4. P. 1270–1274.

49. *Lee E.S., Saito Y., Uchida T.* Detailed morphology of rubbed alignment layers and surface anchoring of LCs // *Proc. Intern. Conf. Japan Display'92.* 1992. P. 595–598.

50. *Kutty T., Fischer A.* Planar orientation of NLCs by chemisorbed polyvinyl alcohol surface layers // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. Vol. 99. № 1/4. P. 301–318.

51. *Kutty T.* Uniformity in bias tilt for nematics oriented by polyvinyl alcohol surface layers // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1984. Vol. 102. P. 167–174.

52. *Seo D.S., Iimura Y., Kobayashi S.* Temperature dependence of the polar anchoring strength of weakly rubbed polyimide film for NLC (5CB) // *Appl. Phys. Lett.* 1992. Vol. 61(2). P. 234–236.

53. *Uchida T., Seki H.* «Surface alignment of liquid crystals» in *Liquid crystals application and uses* / Ed. by B. Bahadur. Singapore. World Scientific. 1991.

54. *Toko Y., Iimura Y., Kobayashi S.* Fabrication of TN and STN LCDs using one side rubbing // *Proceed. Intern. Conf. Japan Display'92.* Tokyo. 1992. P. 491–494.

55. *Yanning L.* Thin film surface orientation for LCs // *Appl. Phys. Lett.* 1972. Vol. 21. № 4. P. 173.
56. *Hiroshima K., Mochizuki M.* Influence of SiO film thickness on LC orientation // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1980. Vol. 3. P. 567–568.
57. *Meyerhofer D.* New technique of alignment LCs on the surfaces // *Appl. Phys. Lett.* 1976. Vol. 29. № 11. P. 691–692.
58. *Buzcek D.M.* A thin film process to improve off axis viewing of LCDs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1978. Vol. 47. P. 145
59. *Pollack J.M., Haas W.E., Adams J.E.* // *J. Appl. Phys.* 1977. Vol. 48. P. 831.
60. *Goodman L.A., McGinn J.T., Anderson C.H., Digernimo F.* // *IEEE Trans. Elect. Dev.* 1977. ED 24. P. 795.
61. *Watanabe R., Nakano T., Satoh T.* et al. Plasma-polymerized films as orientating layers for LCs // *J. Appl. Phys.* 1987. Vol. 26. № 3. P. 373–376.
62. *Конишина Е.А.* Взаимодействие между НЖК и аморфными углеводородными ориентирующими слоями // *Кристаллография.* 1995. Т.40. № 6. С. 1074–1076.
63. *Исаев М.В., Конишина Е.А., Онохов А.П.* и др. Влияние структуры приповерхностных ориентирующих слоев на ориентацию ЖК // *Журн. техн. физ.* 1995. Т.65. Вып. 10. С. 175–179.
64. *Конишина Е.А.* Поглощение и ширина оптической щели пленок а-С:Н, полученных из ацетиленовой плазмы.// *ФТП.* 1999.Т.33. Вып.3. С.469–475.
65. *Конишина Е.А.* Корреляция оптических и электрических свойств пленок а-С:Н. // *ЖТФ* 2000. Т. 70. Вып. 3. С. 87–89.
66. *Конишина Е.А., Онохов А.П.* Применение поглощающих пленок а-С:Н в жидкокристаллических модуляторах света отражательного типа // *ЖТФ.* 1999. Т. 69. С. 80.
67. *Cheng J., Boyd G.D.* The alignment properties of of photolithographic gratings // *Appl. Phys. Lett.* 1979. Vol. 35. № 3. P. 44.
68. *Nakamura M., Ura.* Alignment of NLC on ruled grating surfaces // *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52. № 1. P. 210.
69. *Sugawara K., Ishitaka Y., Abe M.* et al. Consideration on alignment control on LCs by geometrical structures // *Proc. Intern. Conf. Japan Display'92.* 1992. P. 815–818.
70. *Sugimura A., Yamamoto N., Kawamura T.* High surface ordering of NLC using periodicity grating // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 20. № 7. P. 1343–1344.
71. *Беляев В.В.* Применение подложек с поверхностным микрорельефом в оптоэлектронике и устройствах отображения информации (Обзор) // *Опт. журн.* 2005. № 9. С. 79–85.
72. *Berremans D.W.* Alignment of LCs by grooved surfaces // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1973. Vol. 23. P. 215.
73. *Berremans D.W.* Solid surface shape and alignment of an adjacent NLCs // *Phys. Rev. Lett.* 1972. Vol. 28. P. 1683.

74. *Seo D.-S., Muroi K.-J., Kobayashi S.* Generation of pretilted angles in NLCs, 5CB, media alignment on polyimide film prepared by spin-coating and LB technique: effect of rubbing // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1992. Vol. 213. P. 223–228.
75. *Komitov L., Stebler B., Gabrielli G.* et al. Amphiphilic Langmuir-Blodgett films as new tool for inducing alignment transition in nematics // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1994. Vol. 243. P. 107–124.
76. *Miyano K.* Interface as a field for arranging organic molecules // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 24, № 11. P. 1379–1388.
77. *Блинов Л.М.* Физические свойства и применение ЛБ моно- и мультимолекулярных структур // *Успехи химии.* 1983. Т. LII. Вып. 8. С. 1263–1300.
78. *Naemura S.* Measurement of anisotropic interfacial interaction between NLC and various substrates // *Appl. Phys. Lett.* 1978. Vol. 33, № 1. P. 1–3.
79. *Hiltrop K., Stegmeier H.* Contact angle and alignment of LCs on lecithin monolayers // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1978. Vol. 49. P. 61–65.
80. *Proust J.E., Ter-Minassian Saraga L., Guyon E.* Orientation of NLC by suitable boundary surfaces // *Solid State Commun.* 1972. Vol. 11. P. 1272–1280.
81. Experimental results and problems concerning «Blue Phases» / H. Stegmeyer, K. Bergman // Ed. by W. Helfrich, G. Heppke. Berlin: Springer, 1980. P. 161–175.
82. *Ohgawara M., Uchida T.* Effect of impurities of LC molecular orientation on inorganic surfaces // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 20, № 1. P. 75–78.
83. *Uchida T., Ohgawara M., Shibata Y.* Liquid crystal orientation on inorganic surfaces // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. Vol. 98. P. 149–161.
84. *Kahn F.J.* Orientation of LCs by surface coupling agents // *Appl. Phys. Lett.* 1973. Vol. 22. P. 383–389.
85. *Yokayama H., Kobayashi S., Kamei H.* Effect of substrate surface on the formation of nematic phase at the isotropic-nematic transition // *Appl. Phys. Lett.* 1982. Vol. 41(5). P. 438–440.
86. *Van Sprang H.A.* Surface order in nematics // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. Vol. 97. P. 255–261.
87. *Heffner W.R., Berreman D.W., Sammon M.* et al. Liquid crystal alignment on surfactant treated obliquely evaporated surfaces // *Appl. Phys. Lett.* 1980. Vol. 36(2). P. 144–146.
88. *Wilson T., Boyd G.D., Westerwick E.H.* Alignment of LCs on surfaces with films deposited obliquely at low and high rates // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. Vol. 94. P. 359–366.
89. *Porte G.* Tilted alignment of MBBA induced by short-chain surfactants // *J. de Phys. (Paris).* 1976. № 10. P. 1245–1252.
90. *Gurtler R.W., Casey J.W.* Surface tilted distributions of homogeneously aligned LCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1976. Vol. 35. P. 275–306.
91. *Toda A., Mada H., Kobayashi S.* Temperature dependence of pretilt angle for NLCs // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 17. № 1. P. 261–262.

92. *Mada H.* Study of the surface alignment of NLCs: temperature dependence of pretilt angles // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1979. Vol. 51. P. 43–56.
93. *Van Sprang H.A., Aartsen R.G.* The temperature dependence of LC tilt angles // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1984. Vol. 56, № 2. P. 251–262.
94. *Sygyiyama T., Kuniyasu S., Kobayashi S.* Temperature dependence of pretilt angle in NLC cell // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1993. Vol. 231. P. 199–214.
95. *Kahn F.* Capacitive analysis of twisted NLC displays // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1974. Vol. 1. P. 109–123.
96. *Yamashita M., Asmemiya J.* Effect of substance surface on alignment of LCs // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1976. Vol. 15. № 11. P. 2087.
97. *Meyerhofer D.* Field induced distortion of a LC with various surface alignment // *Phys. Lett.* 1975. Vol. 51A. P. 407–408.
98. *Shimoda S., Mada H., Kobayashi S.* Apparent threshold characteristics of pretilted LC cell // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1978. Vol. 17. P. 1359–1364.
99. *Rayns E.P., Rowell D.K., Shanks J.A.* Liquid crystal surface alignment treatment giving controlled low angle tilt // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1976. Vol. 34. P. 105–110.
100. *Crossland W.A., Morrissy J.H., Needham B.* Tilt angle measurements of nematic phase of cyano-biphenyls aligned by obliquely evaporated film // *J. Phys. D.* 1976. Vol. 9. P. 2001–2014.
101. *Birecki H., Kahn F.* The physics and chemistry of LC devices // Ed. By G.J. Sprokel. NY: Plenum Press. 1980. P. 115.
102. *Гуляков В.А., Корец А.А., Шабанов В.Ф.* Оптические методы измерения углов наклона молекул в слоях НЖК // Препринт № 397. Красноярск: Ин-т физики им. Л.В. Киренского СО АН СССР. 1986. 14 с.
103. *Baur G., Wittwer V., Berreman D.W.* Determination of the tilt angles at surfaces of substrates in LC cells // *Phys. Lett.* 1977. Vol. 56A, № 2. P. 142–144.
104. *Nakano F., Isogai M., Sato M.* Simple method of determining LC tilt-bias angle // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1980. Vol. 19. P. 2013–2014.
105. *Chiarelli R., Faetti S., Frobzoni L.* Determination of molecular orientation at the free surface of LCs from Brewster angle measurements // *Opt. Commun.* 1983. Vol. 46. № 1. P. 9–13.
106. *Некрасов Г.Л.* Измерение среднего угла наклона молекул в локализованных участках ЖКЯ // Вести АН БССР. Сер. Физика. 1981. № 8. С. 114–118.
107. *Akiyama R., Abe S., Fukuda A.* Determination of tilt bias angle in NLC cells by observing angular dependence of Rayleigh line intensity // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 21. P. 226–228.
108. *Salamon Z., Skibinski A.* Fluorescent emission of guest molecules as a tool of surface alignment study in NLCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. Vol. 90. P. 205–215.
109. *Макушенко А.М., Непорент Б.С., Столбова О.В.* Обратимый ориентационный фотодихроизм и фотоизомеризация ароматических азосоединений // *Опт. и спектр.* 1971. Т. 31. Вып. 4. С. 557–564.

110. *Ichimura K., Suzuki Y., Seki T., Kawanishi Y., Aoki K.* Reversible alignment change of nematic liquid crystal induced by pendent azobenzene groups containing polymer thin films // *Makromol.Chem. Rapid Commun.* 1989. Vol.10. P. 5.

111. *Gibbons W.M., Shannon P.J., Sun S.T.* et al. Surface mediated alignment of nematic liquid crystals by polarized laser light // *Nature.* 1991. V.351. P. 49

112. *Schadt M., Schmitt K., Kozenkov V.* et al. Surface-induced parallel alignment of LCs by linearly polymerized photopolymers // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 31. P. 2155–2164.

113. *Dyadyusha A.S.G., Marusii T.Ya., Reznikov Yu.A.* Orientational effect due to a change in the anisotropy of the interaction between a liquid crystal and a bounding surface // *JETP Lett.* 1992. Vol. 56. P 17–19.

114. *Hasegawa M., Taira Y.* Nematic Homogeneous Alignment by photo depolymerization of polyimide // *J. Photopolym. Sci. Technol.* 1995. Vol. 8. P. 241.

115. *Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.S.* New Developments in Photo-aligning and Photo-patterning Technologies: Physics and Applications // *Optical Applications of Liquid Crystals* (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003).

116. *Chigrinov V.G., Kozenkov V.M., Kwok H.S.* Photoalignment of liquid crystalline materials. Physics and applications. Wiley. Series in Display technologies. 2008. 248 p.

117. *Aoki K., Tamaki T., Seki T., Kawanishi Y., Ichimura K.* Regulation of alignment of cyanobiphenyl liquid crystals by azobenzene molecular films // *Langmuir.* 1992. Vol. 8. P. 1014.

118. *Seki T., Tamaki T., Suzuki Y., Kawanishi Y., Ichimura K., Aoki K.* Photochemical alignment regulation of a nematic liquid crystal by Langmuir-Blodgett layers by azobenzene polymers as «command surfaces» // *Macromolecules*, 1989. Vol. 22. P. 3505.

119. *Schadt M., Schmitt K., Kozenkov V., Chigrinov V.* Surface-induced parallel alignment of liquid-crystals by linearly polymerized photopolymers // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992. Vol. 31. P. 2155.

120. *Shibaev V.P., Kostromin S.A., Ivanov S.A.* Liquid-crystalline ionomers as a new class of mesomorphous // In *Polymers as Electrooptical and Photooptical Active Media.* Berlin. Springer-Verlag. 1996. P. 37–110.

121. *Sun S. T., Gibbons W. M., Shannon, P. J.* Alignment of guest-host liquid crystals with polarized laser light // *Liq. Cryst.* 1992. Vol. 12. P. 869–874.

122. *Shannon P.J., Gibbons W.M., Sun S.T.* Patterned optical properties in photopolymerized surface-aligned liquid-crystal films // *Letters to Nature.* 1994. Vol. 368. P. 532.

123. *Gibbons W.M., Kosa T., Palffy-Muchoray,* et al. Continuous gray-scale image storage using optically aligned NLCs // *Letters to Nature.* 1995. Vol. 377. P. 43.

124. *Chigrinov V, Prudnikova E., Kozenkov V., Ling, Zh., Kwok, H-S.* Azodye aligning layers for liquid crystal cells // *SID International Symposium Digest of Technical Papers.* 2002. Vol. 33. №. 2. P. 1106–1109.

125. *Liu J., Liang X., Gao H.* Novel photoalignment materials for liquid crystals based on modified polysiloxane // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. Vol. 39. P. 1221–1224.
126. *Kawatsuki N., Takatsuka H., Yamamoto T.* Inclined homeotropic alignment control of LCs on photo-cross-linked polymer film by slantwise nonpolarized UV irradiation // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. Vol. 39. P. L 230-L 232.
127. *Chung D.-H., Takezoe H., Park B.* et al. Comparative study of anchoring strength for photo- and rubbing-aligned liquid crystals on photoisomerizable polyimide alignment films // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. Vol. 39. P. 1252–1253.
128. *Козенков В.М., Юдин С.Г., Катушев Е.Г.* и др. Механизм оптической анизотропии, индуцированной в пленке азополимера // *Письма в ЖЭТФ.* 1986. Т. 12. С. 1267.
129. *Барник М.И., Козенков В.М., Штуков Н.М.* и др. Молекулярно упорядоченные структуры на твердых поверхностях // *Журн. молек. электр.* 1989. Т.5. С. 53.
130. *Schadt M., Seiberle H., Schuster A.* Optical patterning of multi-domain LC with wide viewing angles // *Nature.* 1996. Vol. 351. P. 212–215.
131. *O'Neil M., Kelly S.M.* Photoinduced surface alignment for liquid crystal displays // *J. Phys. D.* 2000. Vol. 33. R67.
132. *Nishikawa M., Taheri B., West J.L.* Mechanism of unidirectional LC alignment on polyimides with linearly polarized UV light exposure // *Appl. Phys. Lett.* 1998. Vol. 72. P. 2403.
133. *Sung S.-J., Kim H.-T., Lee J.-W.* Photo-induced LC alignment on polyimide containing fluorinated groups // *Liquid Crystals.* 2002. Vol. 29. P. 243–250.
134. *Yang K.H., Tajima K., Takenaka A.* Charge trapping properties of UV-exposed polyimide films for the alignment of LCs // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1996. Vol. 35. P. 561.
135. *Wang Y., Xu C., Kanazawa A., Shiono T., Ikeda T., Matsuki Y., Takeuchi Y.* Thermal Stability of Alignment of a Nematic Liquid Crystal Induced by Polyimide Exposed to Linearly Polarized Light // *Liq. Cryst.* 2001. Vol. 28. P. 473.
136. *Schadt M.* Liquid crystal displays and novel optical thin films enabled by photo-alignment // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2001. Vol. 364. P. 151.
137. *Schadt M., Schuster A., Seiberle H.* Photo-alignment, patterning and stacking of nematic liquid crystalline polymer optical films // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1995. Vol. 34. P. 3420.
138. *Schadt M.* Photo-alignment of monomeric and polymeric liquid crystals in displays and optical thin-films on single substrates // *Abstracts of 7-th European Conf. on LC.* Jaca. Spain. 6–11 April 2003. PL1.
139. *Yamamoto T., Hasegawa M., Hato H.* Liquid-crystal alignment by slantwise irradiation of non-polarized UV light on a polyimide layer. // *SID'96 Digest.* 1996. P. 642.
140. *Hyundae H., Sung S.-J., Cho K.Y., Park J.-K.* Molecular orientation of LC on polymer blends of coumarin and naphthalenic polyimide // *Polym. Bull.* 2008. Vol. 61. № 3. P. 383–390.

141. *Seo D.-S., Hwang L.-Y., Kobayashi S.* Preliminary communication generation of high pretilt angle in a NLC with single oblique polarized UV irradiation on polyimide surfaces // *Liq. Cryst.* 1997. Vol. 23. P. 923.
142. *Umanskiy B.A., Novoseletskii N.V.* Competition of photo-induced and rubbing anchoring in LC cells // *Abstr. of XVI LCC. Stare Jablonki. Poland.* 2005. P. 36.
143. *Невская Г.Е., Томилин М.Г.* Достижения в ориентации ЖК // *ЖК и их практическое использование.* Иваново. 2009. Вып. 1. С. 5–23.
144. *Cheng J., Thurston R.N., Berreman D.W.* Boundary-layer model of field effect in a bistable LC geometry // *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52(4). P. 2756–2765.
145. *Boyd G.D., Cheng J., Ngo P.D.T.* Liquid crystal orientational bistability and nematic storage effect // *Appl. Phys. Lett.* 1980. Vol. 36(7). P. 556–558.
146. *Cheng J., Thurston R.N.* The propagation of disclinations in bistable switching // *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52(4). P. 2766–2775.
147. *Cheng J., Thurston R.N., Boyd G.D.* A nematic liquid crystal storage display based on bistable boundary layer configurations // *J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 40(12). P. 1007–1009.
148. *Yang K.H.* Weak boundary storage effect in homogeneous LC cells // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1983. Vol. 22, № 3. P. 389–393.
149. *Monkade M., Boix M., Durand G.* Order electricity and oblique nematic orientation on rough solid surfaces // *Europhys. Lett.* 1988. Vol. 5. P. 697–702.
150. *Barberi R., Boix M., Durand G.* Electrically controlled surface bistability in NLCs // *Appl. Phys. Lett.* 1989. Vol. 55. P. 2506–2508.
151. *Dozov I., Durand G.* Surface controlled nematic bistability // *Liquid crystals today.* 1998. Vol. 8. № 2. P. 1–7.
152. *Блинов Л.М., Сонин А.А.* Взаимодействие нематиков со сколами твердых кристаллов. Ориентационная бистабильность // *Поверхность.* 1989. № 9. С. 105–113.
153. *Томилин М.Г.* Необратимые явления переориентации НЖК при переносе заряда в твист-ячейке // *Опт. и спектр.* 1983. Т. 54. Вып. 4. С. 688–691.
154. *Drevensek-Olenik I., Copic M., Kunstelj K., Kodcilija J., Komitov L.* Ferroelectric switching of electrically commanded alignment layers for LC displays // *Book of Abstracts. ECLC2007. Lisbon. Portugal. July 2–6. 2007. OE1.*
155. *Blinov L.M., Kobayenkov A. Yu., Sonin A.A.* Experimental studies of the anchoring energy of NLCs // *Liq. Cryst.* 1989. Vol. 5. № 2. P. 645–651.
156. *Блинов Л.М., Давыдова Н.Н., Сонин А.А.* и др. Локальный переход Фредерикса в НЖК // *Кристаллография.* 1984. Т. 29. Вып. 3. С. 537–541.
157. *Proc. of Intern. LC workshop: Surface Phenomena / Ed.: E.I. Ruyntsev, M.G. Tomilin.* Bellingham: SPIE. 1996. Vol. 2731. 228 p.
158. *Dhara S., Jin-Ki-Kim, Jeong S.-M., Kogo R., Araoka F., Ishikawa K., Takezoe H.* Anchoring transitions of transversely polar LC molecules on perfluoropolymer surfaces // *Phys. Rev.E.* 2009. Vol. 79. Issue 6. P. 060701–5.
159. *Kumar A. et al.* Inverse Freedericksz Transition // *Phys. Rev. E.* 2010. Vol. 82. P.011701

160. *Matsumoto Sh., Kawamoto M., Kaneko N.* Surface-induced molecular orientation of LC by carboxylatochromium complexes // *Appl. Phys. Lett.* 1975. Vol. 27. № 5. P. 268–270.
161. *Prise F., Bak C.* Orienting effects of substrates on cholesteric esters // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1975. Vol. 29. P. 225–229.
162. *Young C.Y., Pindak R., Clark N.* et al. Light-scattering study of two-dimensional molecular orientation fluctuations in a freely suspended FLC film // *Phys. Rev. Lett.* 1978. Vol. 40. P. 773–776.
163. *Rosenblatt C., Pindak R., Clark N.* et al. Freely suspended FLC film: absolute measurement of polarization, elastic constants and viscosities // *Phys. Rev. Lett.* 1979. Vol. 42. P. 1220–1223.
164. *Rosenblatt C., Amer N.M.* Optical determination of smectic A layers spacing in freely suspended thin film // *Appl. Phys. Lett.* 1980. Vol. 36. P. 432–434.
165. *Hauck G., Koswig H.D.* Alignment of nematic and smectic LCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1990. Vol. 179. P. 435–444.
166. *Ikeno H., Suki A.Oh., Nitta M.* et al. Electrooptic bistability of ferroelectric LC device prepared using polyimide LB orientation films // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1988. Vol. 27. P. 475–476.
167. *Xue J., Clark N.A.* Surface electroclinic effect in chiral smectic-A LCs // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Vol. 64. P. 307–310.
168. *Clark N.A., Lagerwall S.T.* Surface stabilized ferro-electric LC electrooptics: new multistable structures and devices // *Ferroelectrics.* 1984. Vol. 59. P. 25–67.
169. *Doroski D., Perlmutter S.H., Moddel G.* Alignment layer for improved surface stabilized ferroelectric devices // *Appl. Optics.* 1994. Vol. 33. p. 2608–2610.
170. *Furumi S., Ichimura K.* Surface-Assisted Photoalignment of Discotic Liquid Crystals by Nonpolarized Light Irradiation of Photo-Cross-Linkable Polymer Thin Films. // *J Phys Chem B Condens Matter Mater Surf Interfaces Biophys.* 2007 Jan 23.
171. *Monobe H., Azehara H., Shimizu Y., Fujihira M.* Alignment Behavior of Discotic Nematic and Rectangular Columnar Phases on Self-Assembled Monolayers of Alkanethiol and Asymmetrical Disulfide // *Chemistry Letters.* 2001. Vol.30. № 12. P.1268.
172. *Frommer J.* Liquid crystals – as seen by scanning tunneling microscopes // *Liquid Crystals Today.* 1993. Vol.3. №2. P. 1, 5–12.
173. *Чувывров А.Н., Гирфанова Ф.М., Мальцев И.С.* Процессы самоорганизации и топологические дефекты в нанослоях НЖК // *ЖЭТФ.* 2008. Т.133. Вып.5. С. 1081–1090.
174. *De Luca A., Barna V., Atherton T.J., Carbone J., Rosenblatt C.* Optical nanotomography of LCs // *Book of Abstracts of 12<sup>th</sup> Intern Topical Meet. on Optics of LCs.* Puebla. Mexico. 2007. O-65. P. 88.
175. *Smalyukh I.I., Shiyonovskii S.V., Lavrentovich O.D.* Three-dimensional imaging of orientational order by fluorescence confocal polarizing microscopy // *Chem. Phys. Lett.* 2001. Vol. 336. P. 88–96.

176. *Smalyukh I.I., Lavrentovich O.D.* 3D director structure of defects in Grandjean-Cano wedges of cholesteric LCs studied by fluorescence confocal polarizing microscopy // *Phys. Rev.* 2002. E 66. 051703.

177. *Smalyukh I.I., Senyuk B.I., Palffy-Muhoray P., Lavrentovich O.D., Huang H., Gartland E.C., Bodnar Jr.V.H., Kosa T., Taheri. B.* Electric-field-induced nematic-cholesteric transition and three-dimensional director structures in homeotropic cells // *Phys. Rev. E* 72. 2005. 061707.

178. *Smalyukh I.I., Senyuk B.I., Gu M., Lavrentovich O.D.* Focused laser beams and liquid crystals: fast three-dimensional imaging of structures and topological defects // *LC Photonics. Proceed. SPIE.* 2005. Vol. 5947.

179. *Smalyukh I.I., Senyuk B.I., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D., Kuzmin A.N., Kachynski A.V., Prasad P.N.* Optical trapping, manipulation, and 3D imaging of disclination in LCs and measurement of their line tension // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 450. P. 79–95.

180. *Pawley J.B.* *Handbook of Biological Confocal Microscopy*, second ed. Plenum Press. N.-Y. 1995.

## Глава 4

### ЭЛЕКТРО- И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В НЖК

В главе рассмотрены электро- и магнитооптические эффекты, на основе которых созданы дисплеи, оптические элементы и устройства, а также те, которые делают возможным применение ЖК в качестве регистрирующей среды. Более подробное описание всех электрооптических эффектов приведено в работах [1–4].

#### 4.1 Ориентационные (поляризационные) эффекты

Ориентационными эффектами в ЖК называют управляемую электрическим (магнитным) полем переориентацию, обусловленную диэлектрической  $\Delta\epsilon$  (диамагнитной  $\Delta\chi$ ) анизотропией и сопровождаемую изменением оптических свойств жидких кристаллов. Особенность этих эффектов состоит в том, что они реализуются при слабых внешних воздействиях, при этом оптические свойства ЖК изменяются существенным образом. Этим объясняется их широкое применение в фотонике.

Анализ ориентационных эффектов обычно проводят в приближении отсутствия объемных электрических зарядов и токов, что позволяет рассматривать ЖК как идеальный диэлектрик.

При приложении электрического поля к слою ЖК плотность свободной энергии равна

$$F = F_d + F_e, \quad (4.1)$$

где  $F_d$  — плотность свободной энергии, связанной с изгибными деформациями:

$$F_d = 1/2[K_{11}(\text{div } \mathbf{n})^2 + K_{22}(\mathbf{n} \text{ rot } \mathbf{n})^2 + K_{33}(\mathbf{n} \times \text{rot } \mathbf{n})^2], \quad (4.2)$$

$F_e$  — плотность свободной энергии ЖК в электрическом поле.

Директор  $\mathbf{n}$  в электрическом поле переориентируется вследствие наличия вращающего момента, пропорционального диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon$  и вектору поляризации  $\mathbf{P}$ . Это дает соответствующий вклад в плотность свободной энергии ЖК:

$$F_e = F_E + F_P \quad (4.3)$$

здесь  $F_E$  — плотность свободной энергии, обусловленной наличием  $\Delta\epsilon$ ;  $F_P$  — плотность свободной энергии, зависящей от  $\mathbf{P}$ .

$$F_E = -\mathbf{DE}/8\pi = -\epsilon_{\perp} E^2/8\pi - \Delta\epsilon(\mathbf{E}\mathbf{n})^2/8\pi \quad (4.4)$$

$$F_P = -(\mathbf{PE}), \quad (4.5)$$

где  $\mathbf{P}$  — вектор поляризации в случае спонтанной или флексоэлектрической поляризации ( $\mathbf{P}_f$ ).

Распределение директора  $\mathbf{n}$  для всех ориентационных эффектов должно соответствовать минимуму свободной энергии при заданных граничных условиях. Это условие является исходным при рассмотрении этих эффектов.

Для их наблюдения используется ЖКЯ, расположенная между двумя поляризаторами (рис. 4.1), и потому электрооптические эффекты в этом случае называют поляризационными.

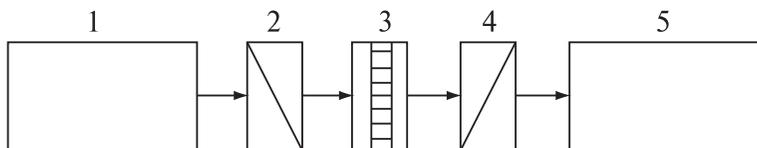


Рис. 4.1. Схема наблюдения ориентационных (поляризационных) эффектов: 1 — He-Ne лазер; 2 — поляризатор; 3 — ЖК ячейка; 4 — анализатор; 5 — фотоумножитель

Далее рассматриваются основные ориентационные эффекты в НЖК: переходы Фредерикса, «гость — хозяин», твист и супертвист, бистабильность и флексоэлектрический эффект.

#### 4.1.1. Переходы Фредерикса

Впервые ориентационные эффекты в НЖК наблюдались в магнитном поле русским физиком В.К. Фредериксом и его сотрудниками [5].

Ими вопреки распространенной в то время концепции дипольных сил была впервые объяснена природа ориентирующих сил наличием диамагнитной анизотропии  $\Delta\chi$  НЖК. Был также установлен пороговый характер деформаций НЖК и впервые дано описание этого эффекта под влиянием магнитного поля с учетом исходной ориентации молекул. Позже пороговый характер переориентации молекул НЖК в электрическом поле был объяснен наличием диэлектрической анизотропией  $\Delta\epsilon$  НЖК. Эффекты переориентации, наблюдаемые в магнитных и электрических полях вследствие анизотропии  $\Delta\epsilon$  и  $\Delta\chi$ , получили в мировой научной литературе имя Фредерикса (рис. 4.2). Его вклад в развитие науки о ЖК описан в книге [6].

Переориентация директора НЖК в электрическом поле наблюдается в случае, когда в исходном состоянии направления поля и директора не соответствуют условию минимума свободной энергии. Тогда в электрическом поле, способном преодолеть силы упругости, установится новое стационарное распределение директора.

Известны  $S$  (*splay*)- и  $B$  (*bend*)- эффекты, а также  $T$  (*twist*)- деформация наблюдаемые при различной исходной ориентации директора в ЖКЯ: гомогенной ( $\vec{E} \perp \vec{n}$ ) для  $S$ -эффекта и гомеотропной ( $\vec{E} \parallel \vec{n}$ ) для  $B$ -эффекта. В случае  $S$ -эффекта и  $T$ - деформации —  $\Delta\epsilon > 0$ , для  $B$ -эффекта —  $\Delta\epsilon < 0$  (рис. 4.3).

Рассмотрим закономерности  $S$ - и  $B$ -эффектов (собственно  $T$ -деформация не нашла применения и далее не анализируется).

На рис. 4.3а представлена исходная гомогенная ориентация директора НЖК ( $\Delta\epsilon > 0$ ), перпендикулярная направлению  $E$ , и распределение директора при воздействии электрического поля. Проекция директора на оси  $x$  и  $y$  соответственно равны:

$$n_x = \cos\theta(z) \quad \text{и} \quad n_z = \sin\theta(z). \quad (4.6)$$

Подставив в выражение (4.2) для  $S$ -эффекта:  $\text{div} n = \partial n_x / \partial z = \cos\theta(\partial\theta/\partial z)$ , для  $B$ -эффекта:



Рис. 4.2. В.К. Фредерикс (1885–1944) — основатель отечественной школы физиков, работающих в области ЖК

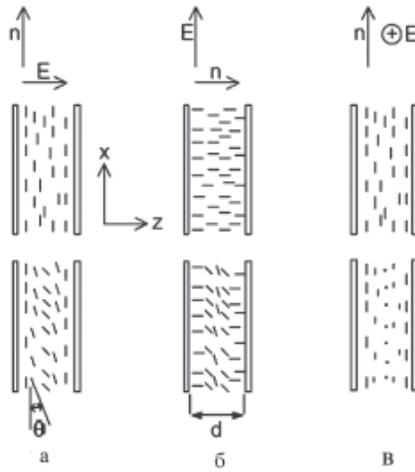


Рис. 4.3. Переходы Фредерикса: а — S-эффект, б — B-эффект, в — T-деформация. В верхнем ряду показана исходная ориентация, в нижнем — ориентация при напряжении выше порогового

$rot \mathbf{n} = -\sin\theta(z) (\partial\theta/\partial z)\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{n} \times rot \mathbf{n} = \sin\theta(z) (\partial\theta/\partial z) (\sin\theta\mathbf{i} - \cos\theta\mathbf{k})$   
 получим:

$$F_d = (K_{11} \cos^2\theta + K_{33} \sin^2\theta)(\partial\theta/\partial z)^2$$

или для одноконстантного приближения ( $K_{11} = K_{33} = K$ )

$$F_d = K(\partial\theta/\partial z)^2 \tag{4.7}$$

В результате для свободной энергии слоя ЖК толщиной  $d$  в электрическом поле имеем:

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d \left[ K \left( \frac{\partial\theta}{\partial z} \right)^2 - \frac{\Delta\epsilon E^2}{4\pi} \cos^2\theta \right] dz \tag{4.8}$$

Чтобы функционал (4.8) имел минимум, его аргумент должен удовлетворять уравнению Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} + \frac{\Delta\epsilon E^2}{4\pi K} \sin\theta \cos\theta = 0 \tag{4.9}$$

Решение уравнения (4.9) позволяет найти распределение директора в слое ЖК [2]. Показано, что при жестком сцеплении НЖК с подложкой переориентация директора в электрическом поле возможна только при достижении порогового значения напряженности ( $E_n$ ), определяемого выражением:

$$E_n = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{4\pi K}{\Delta\varepsilon}} \quad (4.10)$$

Формула (4.10) позволяет рассчитать пороговое поле для  $S$ -эффекта при  $K = K_{11}$ , и пороговое поле для  $B$ -эффекта при  $K = K_{33}$ . Результаты расчета распределения директора по толщине ячейки в зависимости от величины напряженности поля представлены на рис. 4.4.

Деформация слоя НЖК сопровождается изменением его оптических свойств:  $S$ - и  $B$ -деформации вызывают изменение двулучепреломления НЖК слоя, которое однозначно связано с распределением показателя преломления необыкновенного луча  $n_e(z)$  [2]:

$$n_e = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{\sqrt{n_{\perp}^2 \cos^2 \theta(z) + n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta(z)}} \quad (4.11),$$

где  $n_{\parallel}$  и  $n_{\perp}$  — главные значения показателей преломления.

Разность фаз между необыкновенным и обыкновенным лучами для монохроматического света с длиной волны  $\lambda$  находится интегрированием по толщине слоя  $d$ :

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(z) - n_o] dz = \frac{2\pi d \langle \Delta n(z) \rangle}{\lambda} \quad (4.12)$$

Интенсивность света, прошедшего через ячейку и анализатор, зависит от угла  $\beta$  между вектором поляризации падающего луча и исходным направлением директора НЖК:

$$I = I_0 \sin^2 2\beta \sin^2 \Delta\Phi/2 \quad (4.13),$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего на ячейку линейно поляризованного света.

Таким образом, внешнее электрическое поле изменяет направление директора,  $\theta = \theta(E, z)$  и, следовательно, величины  $\Delta n(E, z)$  и  $\Delta\Phi(E)$ . Изменение разности фаз приводит к осциллирующей зависимости оптического пропускания на выходе анализатора (рис. 4.5).

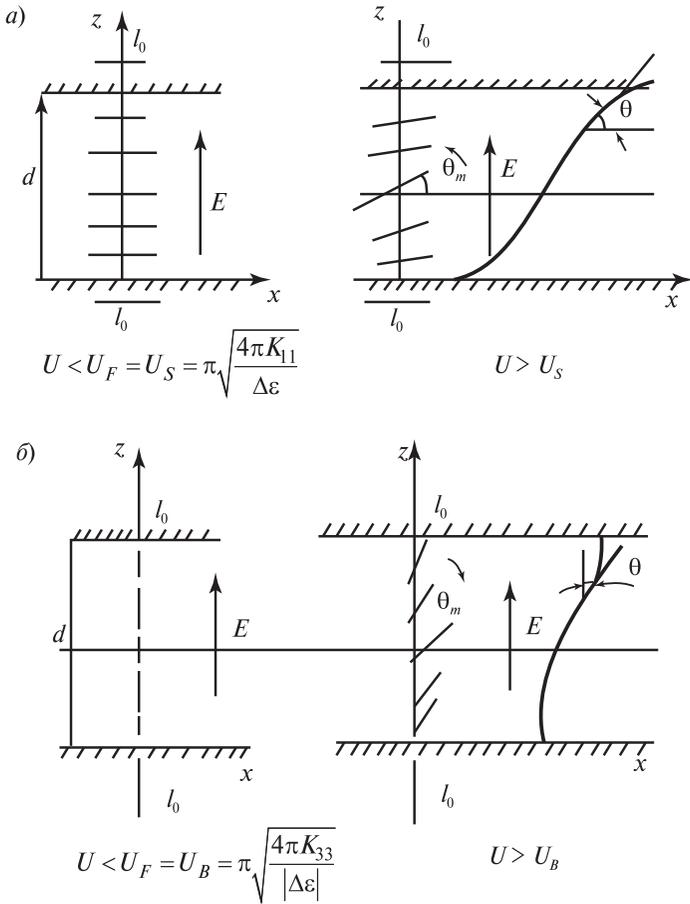


Рис. 4.4. Картина деформации НЖК: а — S-эффект, исходная ориентация планарная,  $\Delta\epsilon > 0$ ; б — B-эффект, исходная ориентация гомеотропная,  $\Delta\epsilon < 0$ .  $\theta$  — угол, характеризующий распределение директора по оси  $z$

Зависимости интенсивности света, прошедшего через ячейку, для S- и B-эффекта отличаются тем, что в начальном состоянии соответственно  $\Delta\Phi = \Delta\Phi_{\max}$  и  $\Delta\Phi = 0$ . Начальное пропускание ячейки с гомеотропной ориентацией в скрещенных поляроидах минимально.

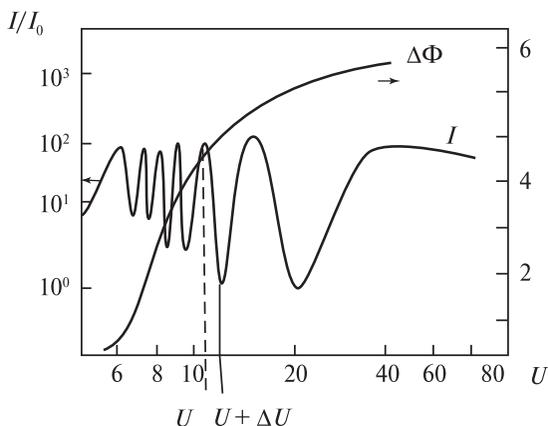


Рис. 4.5. Зависимости разности фаз  $\Delta\Phi$  и интенсивности света  $I$  от напряжения  $U$  (В) в случае  $S$ -эффекта. Поляризатор ориентирован под углом к исходной ориентации директора, анализатор — перпендикулярно этому направлению [2]

Если директор НЖК имеет угол наклона к подложке ( $\theta_0 \neq 0, \pi/2$ ), то в этом случае порог эффекта Фредерикса пропадает и деформация директора начинается с бесконечно малых напряжений [2]. Для малых значений углов  $\theta_0$  оптический отклик носит квазипороговый характер.

Электрооптические свойства квазигометропного слоя нематика с углами наклона молекул в противоположные стороны на верхней и нижней подложках описаны в работе [3]. В этих слоях в соответствии с граничными условиями

$$\theta|_{z=0} = \theta_0, \quad \theta|_{z=d} = -\theta_0, \quad \theta_0 \neq 0, \pi/2$$

директор испытывает поперечную деформацию. Угол  $\theta$  линейно зависит от координаты  $\theta = 2\theta_0 z/d$  и принимает нулевые значения в середине слоя. В этом случае для ЖК с  $\Delta\epsilon < 0$  переход Фредерикса носит квазипороговый характер, т. е. значение  $\theta = 0$  в середине слоя соответствует значениям напряжений меньшим порогового  $U_n = \pi(4\pi K_{33}/\Delta\epsilon)^{1/2}$ . Для достаточно тонких слоев ЖК квазигомеотропная ориентация спонтанно превращается в гомеотропную, реали-

зую так называемый спонтанный переход Фредерикса в отсутствие электрического поля.

Гибридная (гомеопланарная) ориентация директора изучалась для различных направлений приложенного электрического поля: параллельно плоскости разворота директора [7] и перпендикулярно к нему [8]. Было показано, что во втором случае эффект имеет пороговый характер, причем пороговое напряжение ниже, чем в случае гомеотропной ориентации.

Динамика эффекта Фредерикса рассмотрена в работах [1, 2]. Времена включения ( $t_{\text{вкл}}$ ) и выключения ( $t_{\text{выкл}}$ ) определяются формулами:

$$t_{\text{вкл}} = \frac{4\pi v_1 d^2}{\Delta\epsilon U^2 - 4\pi^3 K_{11}}; \quad (4.14)$$

$$t_{\text{выкл}} = \frac{v_1 d^2}{\pi^2 K_{11}}, \quad (4.15)$$

где  $v_1$  — вращательная вязкость.

Суммарное время включения и выключения для ЖК с толщиной слоя ЖК в несколько микрометров составляет величину порядка 1–10 мс, причем времена включения на порядок короче времен выключения. Для сокращения времен выключения используют двухчастотный режим управления, при котором происходит изменение знака  $\Delta\epsilon$ , наблюдаемое в диапазоне частот 1–10 кГц [9]. При этом времена выключения и включения становятся одного порядка.

Переходы Фредерикса были рассмотрены для случая жесткого сцепления ЖК с подложкой. При слабом сцеплении ЖК с подложкой пороговые напряжения уменьшаются [10]. Влияние поверхностной энергии сцепления на переходы Фредерикса рассмотрено в работе [3].

S- и B-эффекты в ЖК ячейке, освещаемой белым светом, можно использовать для электрически управляемого изменения цвета.

#### 4.1.2. Эффект «гость — хозяин»

Эффект «гость — хозяин» наблюдается в НЖК при добавлении дихроичного красителя («гостя»), молекулы которого переориентируются вместе с молекулами ЖК («хозяина») при воздействии электрического поля. На рис. 4.6 приведена ячейка с планарной ориентацией ЖК ( $\Delta\epsilon > 0$ ), в котором растворен краситель.

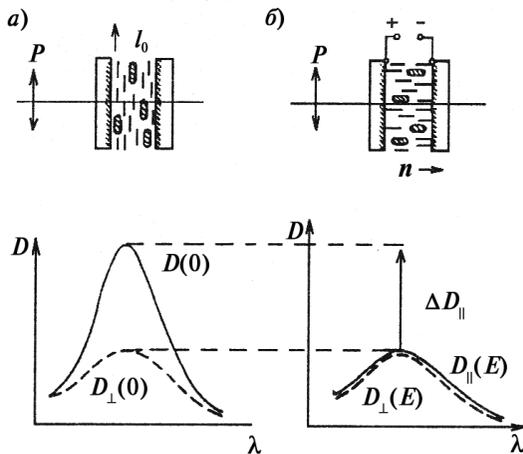


Рис. 4.6. Эффект «гость-хозяин» в ЖК. Ориентация молекул красителя и спектры поглощения поляризованного света  $D = f(\lambda)$ :  $a$  — в отсутствии поля;  $b$  — при напряжении, превышающем  $U_n$  переориентации ( $P$  — направление поляризации света)

Молекулы красителя имеют вытянутую форму, осциллятор поглощения параллелен длинной оси. В отсутствии поля оптическая плотность ячейки различна для поляризаций света  $E \parallel n(D_{\parallel})$  и  $E \perp n(D_{\perp})$  (рис. 4.6а). Если приложенное к ЖК ячейке напряжение превышает порог Фредерикса, молекулы ЖК переориентируются, увлекая за собой молекулы красителя, и оптические плотности для света любой поляризации становятся одинаковыми (рис. 4.6б). Впервые этот эффект наблюдался в работе [11]. Максимальное изменение оптической плотности  $\Delta D = D_{\parallel}(0) - D_{\parallel}(E)$  оказалось примерно равно 1,5, а интенсивность проходящего света при приложении электрического поля увеличилась в 30 раз. Введение красителя (не более 2 %) не изменяет большинства свойств ЖК, поэтому единственным параметром, который требует специального исследования, является контрастное отношение:  $I(E, \lambda)/I(0, \lambda)$  для различных красителей.

По измерению светопропускания ЖКЯ с красителем можно определять некоторые эксплуатационные характеристики: фазовую

задержку, угол наклона молекул на подложке, знак дихроизма и диэлектрической анизотропии и др. [3]. Эффект «гость – хозяин» применяют для изменения параметров флуоресценции, изучения межмолекулярных взаимодействий методами спектроскопии и для переключения света в устройствах отображения информации.

#### 4.1.3 Твист- и супертвист эффекты

В том случае, если при исходной планарной ориентации молекул НЖК направления директора на противоположных подложках перпендикулярны друг другу (рис. 4.7а) и вещество имеет положительную диэлектрическую анизотропию, то при приложении электрического поля вдоль оси  $z$  возникает ориентационный эффект, представляющий комбинацию из  $S$ -,  $B$ - и  $T$ -деформаций и называемый твист-эффектом.

В отсутствии электрического поля закрученная структура ЖК вызывает вращение плоскости поляризации линейно поляризованного света, распространяющегося вдоль оси  $z$ , на  $90^\circ$ . Это выполняется для всех длин волн, удовлетворяющих условию Могена [12]:

$$\lambda \ll \Delta n P, \quad (4.16)$$

где  $P$  — шаг спирали (при закрутке директора на  $90^\circ P = 4d$ ).

При толщинах слоя НЖК  $d \geq 10$  мкм условие Могена выполняется для всех длин волн видимого диапазона. Однако в большинстве твист-ячеек с целью получения малых времен отклика используют слой НЖК толщиной менее 10 мкм, и потому условие Могена не выполняется. В результате вращение вектора поляризации света происходит не строго на  $90^\circ$ , что ухудшает характеристики ячейки.

При подаче напряжения выше порогового молекулы НЖК ориентируются вдоль вектора напряженности электрического поля, что приводит к исчезновению оптической активности в ЖКЯ.

Теория отклика твист-ячейки на внешнее электрическое поле строится по той же схеме, что и для  $S$ -эффекта. Разница заключается в том, что в случае твист-эффекта деформация является двумерной и от координаты  $z$  зависит не только угол наклона молекул  $\theta(z)$ , но и их азимут  $\varphi(z)$ . В результате в выражение для порогового поля, определяющего начало деформации, входят все три модуля упругости НЖК.

$$E_n = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{4\pi}{\Delta\varepsilon} \left[ K_{11} + \frac{1}{4}(K_{33} - K_{22}) \right]} \quad (4.17)$$

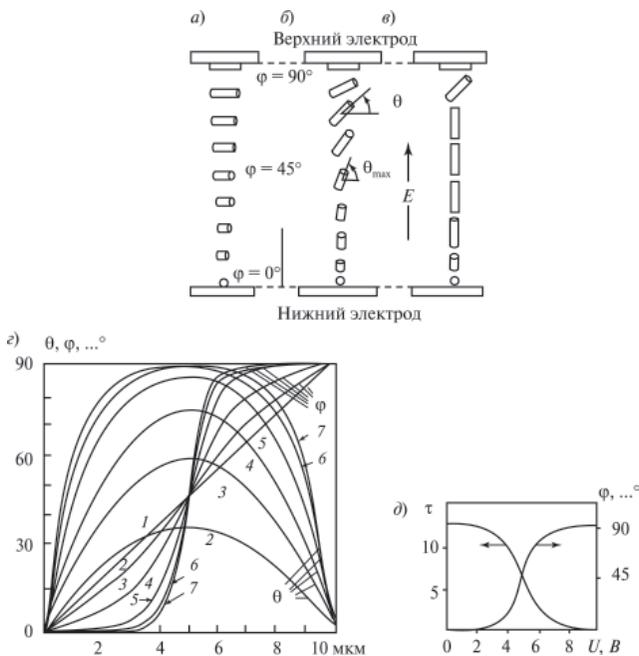


Рис. 4.7. Твист-эффект в ЖК. Молекулярная ориентация: *a* — в отсутствии поля; *б* — при  $U \geq U_n$ ; *в* — при  $U \gg U_n$ ; *г* — зависимость углов  $\theta$  и  $\varphi$  от толщины  $d$ ; 1 — при  $U/U_n \leq 1$ ; 2 — при  $U/U_n = 1,083$ ; 3 — при  $U/U_n = 1,295$ ; 4 — при  $U/U_n = 1,69$ ; 5 — при  $U/U_n = 2,13$ ; 6 — при  $U/U_n = 2,56$ ; 7 — при  $U/U_n = 4,12$ ; *д* — переходная характеристика твист-ячейки

С повышением напряжения угол наклона  $\theta(z)$  увеличивается примерно так же, как при переходе Фредерикса из планарной ориентации (рис. 4.7б). При достаточно большом напряжении молекулы в центральной части практически перпендикулярны электродам ( $\theta_{\max} = \pi/2$ ) и потому центральная часть слоя не вращает плоскости поляризации света. Все изменение угла  $\varphi(z)$  происходит в прилегающих к электродам областях, слишком тонких, чтобы выполнялось условие Могена. В результате при достаточно высоком поле твист-структура вообще перестает поворачивать плоскость поляризации света и ЖКЯ в параллельных поляризаторах оказывается прозрачной. Резкое увеличение пропускания вследствие нарушения усло-

вия Могена происходит в полях, заметно превышающих порог деформации, поэтому оптический порог твист-эффекта всегда опережает порог начала деформации, который может быть зарегистрирован по изменению емкости ячейки.

На рис. 4.8 приведены кривые оптического пропускания для двух случаев: когда вектор поляризации входящего света параллелен директору (1) и когда он составляет угол  $45^\circ$  (2) при  $z = 0$ .

Порог деформации  $U_0 \approx 6$  В совпадает с рассчитанным по формуле 4.17. Оптический порог твист-эффекта повышается с уменьшением длины волны света ( $U_T = 8,9$  и  $10,2$  В соответственно для  $\lambda = 750$  и  $450$  нм), поскольку для более коротких волн отсечка режима Могена наступает позже, при более тонких приэлектродных областях, где происходит изменение угла  $\phi$  (рис. 4.7г).

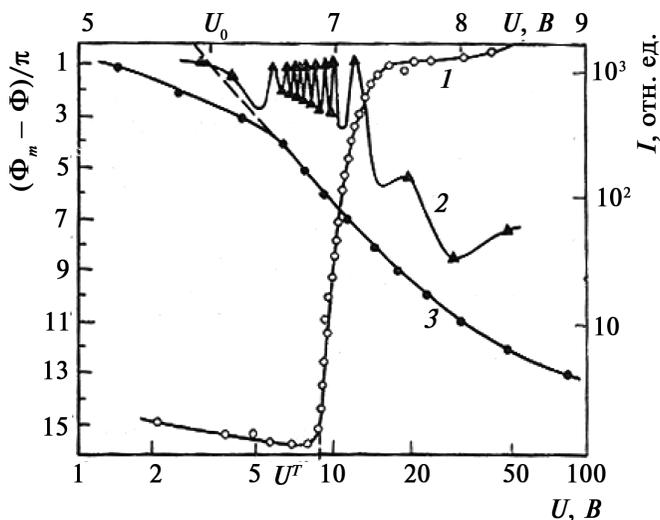


Рис. 4.8. Оптические характеристики твист-ячейки в параллельных поляроидах в зависимости от напряжения ( $d = 30$  мкм,  $\Delta\epsilon = 0,22$ ,  $T = 23^\circ\text{C}$ ) [2]: 1 — пропускание, когда вектор поляризации входящего света параллелен директору; 2 — пропускание, когда ячейка повернута вокруг нормали на угол  $45^\circ$  к первоначальному положению; 3 — фазовая задержка  $\Delta\Phi$ , рассчитанная по кривой 2

Времена включения и выключения твистовой ячейки определяются формулами [2]:

$$t_{\text{вкл}} = \frac{4\pi v_1 d^2}{\Delta\varepsilon U^2 - 4\pi^3 \left[ K_{11} + \frac{1}{4}(K_{33} - 2K_{22}) \right]}; \quad (4.18)$$

$$t_{\text{выкл}} = \frac{v_1 d^2}{\pi^2 \left[ K_{11} + \frac{1}{4}(K_{33} - 2K_{22}) \right]} \quad (4.19)$$

Времена переключения имеют величину того же порядка, что и в случае *S*- и *B*-эффектов и имеют ту же зависимость от толщины слоя и вращательной вязкости ЖК. При  $v_1 = 0,1$  Н с/м<sup>2</sup>, коэффициентах упругости порядка  $10^{-11}$  Н и толщине слоя 10 мкм, время отклика составляет примерно 100 мс. Более короткие времена получают при использовании слоев меньшей толщины [1].

Если имеет место нежесткое сцепление молекул НЖК с поверхностью подложек, то крутизна кривой оптического пропускания увеличивается, а порог уменьшается.

Твист-эффект нашел самое широкое применение в фотонике, что объясняется высоким контрастным отношением при малых управляющих напряжениях и относительно малыми временами переключения. Твист-ячейка в устройствах фотоники выполняет функцию амплитудного модулятора света, поэтому ее определяющими эксплуатационными характеристиками являются величины контрастного отношения *C* и угловые зависимости пропускания *T* и контраста.

Контрастное отношение *C* определяется выражением:

$$C = I_{\text{вкл}} / I_{\text{выкл}} \quad (4.20)$$

где  $I_{\text{вкл}}$  — интенсивность проходящего света при напряжении, больше порогового ( $U_T$ );  $I_{\text{выкл}}$  — при  $U = 0$ .

Оптическое пропускание *T* описывается выражением:

$$T = I / I_0 \quad (4.21)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего на ячейку линейно поляризованного света; *I* — интенсивность прошедшего света (4.13).

Рассмотрим зависимости пропускания *T* и контраста *C* от угла падения света на твист-ячейку. На рис. 4.9 показано пропускание твист-ячейки при наклонном падении света. Азимутальное пропускание твист-ячейки при параллельной ориентации поляризаторов и директора относительно подложек и под углом 45° к вектору поляризации света, симметрично (рис. 4.9, а). Если директор имеет угол

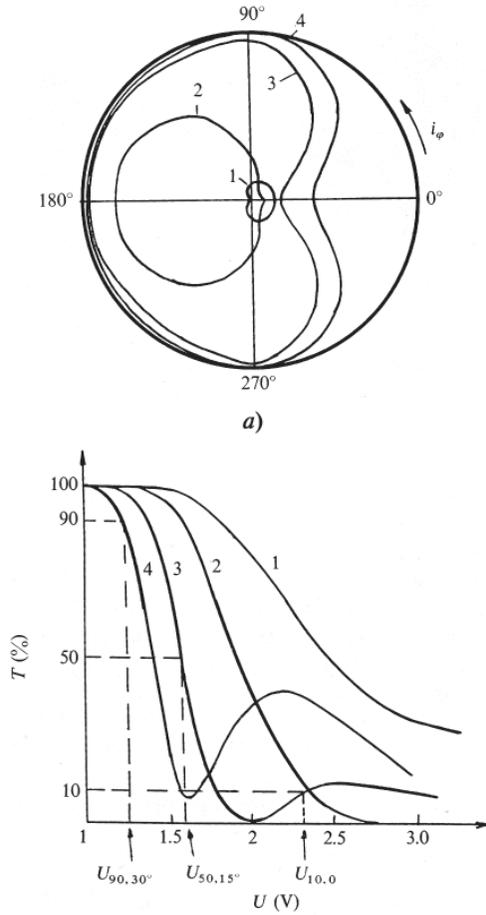


Рис. 4.9. Пропускание твист-ячейки при наклонном падении света: *a* — азимутальная зависимость пропускания при параллельной ориентации поляризаторов для случаев  $U_1 < U_2 < U_3 < U_4$ , где  $U_i$  — напряжение, относящееся к  $i$  — кривой, угол падения  $i_0 = 20^\circ$ ; *b* — вольт-контрастная характеристика для полярного  $i_0$  и азимутального  $i_{i\theta}$  углов наклона: 1— $(15^\circ, 0^\circ)$ , 2— $(0^\circ, 0^\circ)$ , 3— $(15^\circ, 180^\circ)$ , 4— $(30^\circ, 180^\circ)$  [2]

наклона к подложке, симметрия нарушается. Анализ вольт-контрастных характеристик для разных углов падения показывает, что при определенном азимутальном угле падения ( $i_\phi = 180^\circ$ ) оптический порог твист-эффекта уменьшается с ростом угла  $i_\theta$  и становится ниже, чем при нормальном падении.

На рис. 4.10 приведены кривые пропускания равного контраста (изококонтрастные кривые) для твист-ячейки в скрещенных поляризаторах в белом свете (контрастные отношения 20:1 и 100:1). Радиальные координаты на диаграммах указывают величины полярного угла  $i_\theta$ , а стрелкой обозначено направление отсчета азимутального угла  $i_\phi$ . В белом свете угол обзора больше тогда, когда поляризатор перпендикулярен к директору на входной подложке.

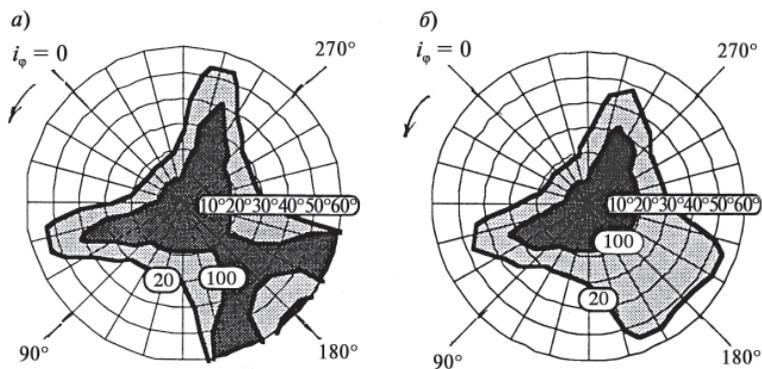


Рис. 4.10. Кривые равного контраста для твист-ячейки в скрещенных поляризаторах в белом свете. Первый поляризатор перпендикулярен (а) и параллелен (б) директору на входной подложке [2]

Если угол закрутки директора нематика более  $90^\circ$ , то эффект называют супертвистом (STN). Для обеспечения таких углов в НЖК вводят хиральную добавку. Отношение толщины слоя  $d$  к шагу спирали  $p$  определяет твистовый угол  $\phi$ :  $d/p = \phi/2\pi$ . Например, для  $\phi = 240^\circ$  отношение  $d/p = 0,667$ . Шаг спирали увеличивается пропорционально концентрации хиральной добавки.

Схема STN ячейки с твистовым углом  $270^\circ$  и распределение углов директора в ячейке в положениях «выключено» и «включено» приведены на рис. 4.11. При приложении электрического поля для НЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  директор переориентируется примерно гомеотропно, что приведет к изменению пропускания света. STN ячейка имеет

более крутую вольт-контрастную характеристику (ВКХ), чем твист ячейка (TN), что позволяет их использовать в дисплеях с пассивной матричной адресацией. Высокая крутизна характеристики дает возможность увеличить величину мультиплексирования строк. В первых STN дисплеях  $\Delta U = U_{\text{вкл}} - U_{\text{выкл}} \approx 0,15 \text{ В}$ , что позволяло осуществлять адресацию более чем к 100 строкам.

На крутизну влияют твистовый угол, угол преднаклона директора к подложке, отношения  $d/p$ ,  $K_{33}/K_{11}$ ,  $K_{22}/K_{11}$ ,  $\Delta\epsilon/\epsilon_{\perp}$ . Хотя увеличение твистового угла и приводит к увеличению крутизны

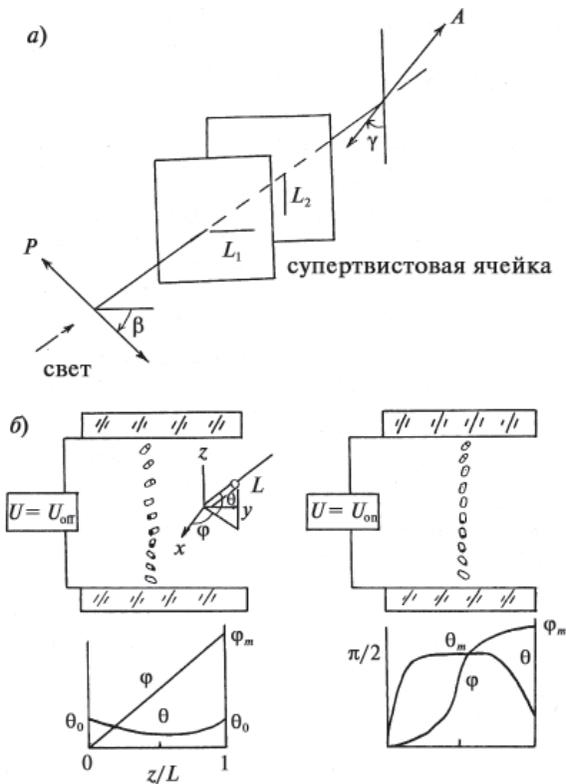


Рис. 4.11. Схема STN ячейки с твистовым углом  $270^\circ$  (а) и распределение углов директора в ячейке в положениях «выключено» (слева) и «включено» (справа) (б);  $\theta_0$  — угол наклона директора,  $\varphi_m$  — максимальный твистовый угол [3]

ВКХ и, следовательно, росту числа мультиплексируемых слоев, это затрудняет обеспечение шкалы серого. Более пологая ВКХ для TN ячейки более предпочтительна для получения шкалы серого, но уменьшает число мультиплексируемых слоев. В результате обычно используют STN ячейки с твистовым углом в диапазоне 210–240°.

Высокий контраст, большие углы обзора и слабая зависимость характеристик пропускания света от угла падения являются преимуществами STN ячейки при ее использовании в системах отображения информации.

Однако STN ячейки имеют следующие недостатки:

- требуется высокая точность обеспечения зазора, при его изменении на 2 % при прохождении света возникают интерференционные цвета;
- необходимо строго обеспечивать требуемые углы наклона директора к подложке по всей ее поверхности;
- светопропускание в видимом диапазоне зависит от длины волны;
- большие времена отклика (300–400 мс).

Устранение этих недостатков в новых STN дисплеях осуществляется за счет подбора твистового угла, угла между направлением директора и вектора поляризации на входной подложке и угла между поляризаторами. Кроме того, можно оптимизировать параметры НЖК и углы наклона директора к подложке  $\theta_0$ . Для уменьшения времени отклика используют малые углы наклона директора, большие значения  $\Delta l$ , малые отношения  $K_{33}/K_{11}$  для НЖК и большой шаг спирали.

Для увеличения контраста и обеспечения приемлемой яркости при создании черно-белых переключателей используют STN ячейки в сочетании с фазовыми пластинками [2]. Идея состоит в компенсации фазовых различий при прохождении света через ячейку. Оптические характеристики STN ячеек позволяют их использовать в качестве экранов в персональных компьютерах.

В TN ячейке (рис. 4.7а) электрическое поле направлено вдоль оси закрученной структуры. При наблюдении ячейки под разными углами возникает различная фазовая задержка, определяемая наклоном директора в объеме слоя НЖК. Это приводит к возникновению малых и асимметричных углов обзора в вертикальном направлении. Для обеспечения больших углов обзора в 1970-е годы была предложена схема с поперечным направлением приложенного элект-

трического поля [12]. В 1990-е годы она нашла применение в TFT LCD [13]. Встречно-штыревые электроды размещены на одной подложке и создают поперечное краевое поле, вызывая поворот директора в плоскости (рис. 4.12). Эта схема управления получила название IPS (переключение в плоскости).

В исходном состоянии молекулы ЖК ориентированы гомогенно вдоль направления натирания под углом  $10^\circ$  к штыревым электродам (рис. 4.13). Плоскость поляризации света, прошедшего через поляризатор, параллельна или перпендикулярна директору; поляризатор и анализатор скрещены. В этом случае ячейка не пропускает свет. При подаче напряжения молекулы переориентируются, в результате чего возникает фазовая задержка, и это приводит к пропусканию света.

Как показано на рис. 4.14 в области над электродами (I) не создается твист структуры из-за наличия вертикальной составляющей электрического поля в приграничных областях электродов. В результате светопропускание над электродами оказывается меньше, чем в области II. В IPS ячейках с НЖК, имеющим  $\Delta\epsilon > 0$ , пропускание составляет 76 % от пропускания TN ячейки.

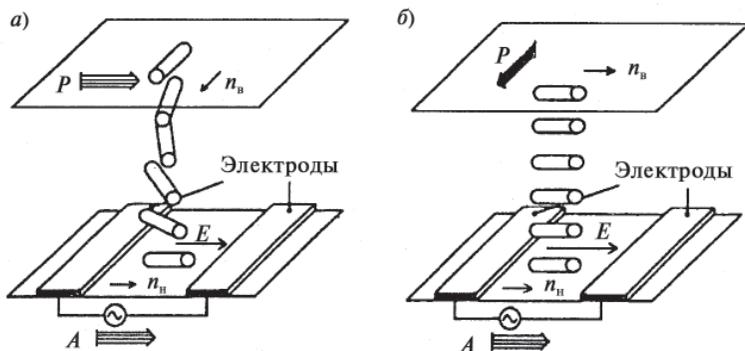


Рис. 4.12. ЖКЯ с использованием поперечного электрического поля в плоскости (IPS): *a* — исходное состояние (угол закрутки- $90^\circ$ ),  $\Delta\epsilon < 0$ , поляризатор параллелен анализатору и перпендикулярен директору на верхней подложке; *б* — исходное состояние (планарная ориентация),  $\Delta\epsilon < 0$ , поляризатор перпендикулярен директору на верхней подложке и анализатору [13]

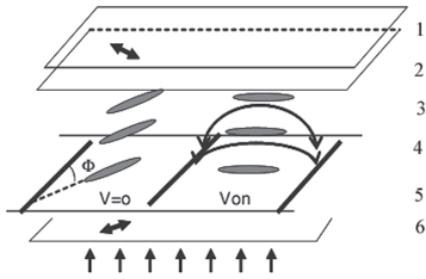


Рис. 4.13. Схема IPS ячейки, работающей в режиме пропускания: слева — напряжение равно нулю; справа — напряжение включено;  $\Phi$  — угол натирания; 1 — анализатор; 2 — верхняя подложка; 3 — ЖК; 4 — нижняя подложка; 5 — поляризатор; 6 — задняя подсветка. Поляризатор и анализатор скрещены [1]

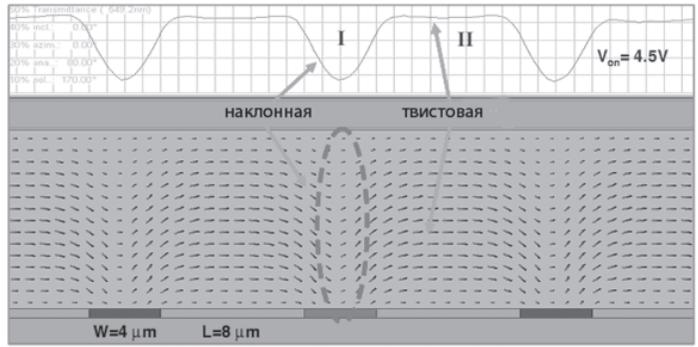


Рис. 4.14. Картина распределения директора НЖК и кривые пропускания для IPS ячейки при подаче напряжения, полученные моделированием. Ширина электродов  $W = 4$  мкм. Расстояние между электродами  $L = 8$  мкм [1].

При использовании НЖК с  $\Delta\epsilon < 0$  пропускание может быть увеличено до 86 % при соответствующем увеличении напряжения. В IPS ячейке, используемой в TFT LCD, управляющее напряжение составляет величину около 5 В. Для увеличения светопропускания IPS ячейки было предложено изготовить зазоры между электродами меньше (до 1 мкм). Такую ячейку называют FFS [1]. В этой ячейке, в отличие от IPS ячейки, величина зазора  $L$  меньше, чем толщина ячейки  $d$ . Это приводит к увеличению области твиста и росту пропускания. При использовании НЖК с  $\Delta\epsilon < 0$  пропускание может достигать 98 % от пропускания TN ячейки, а при  $\Delta\epsilon > 0$  – 90 %. Недостатками FFS ячеек являются необходимость обеспечения малых зазоров между электродами, что повышает требования к фотолитографии, и более высокие управляющие напряжения (около 6,5 В). Углы обзора FFS и IPS ячеек близки и значительно больше, чем в случае TN ячеек [14].

#### ***4.1.4. Эффект бистабильности***

В НЖК ячейках могут быть реализованы два бистабильных состояния ориентации, имеющих различные оптические свойства. При приложении электрического поля молекулы ориентируются в одно из бистабильных состояний и сохраняют его в отсутствии поля. При изменении условий управления реализуется другое бистабильное состояние.

Применение эффекта бистабильности в пассивных матричных дисплеях с высокой мультиплексностью обеспечивает высокое контрастное отношение и большие углы обзора. Однако эти устройства не обеспечивают получение шкалы серого [1].

Известно несколько бистабильных эффектов, применение которых улучшает эксплуатационные характеристики дисплеев: эффект закрутки-раскрутки (twisted-untwisted) — BTN [15–17]; зенитальный (zenithal) и азимутальный [18, 19], индуцированные поверхностью [20–22]; механический; бистабильный супертвист [23, 24].

В эффекте BTN выбор бистабильного состояния осуществляется за счет гидродинамического движения. При одних гидродинамических условиях ЖК переключается в одно бистабильное положение, при других — в другое. Ориентация НЖК в бистабильном BTN эффекте показана на рис. 4.15. Одно стабильное состояние при угле закрутки  $0^\circ$  показано на рис. 4.15,а, а другое стабильное состояние при угле закрутки  $360^\circ$  — на рис. 4.15,в. В общем случае два

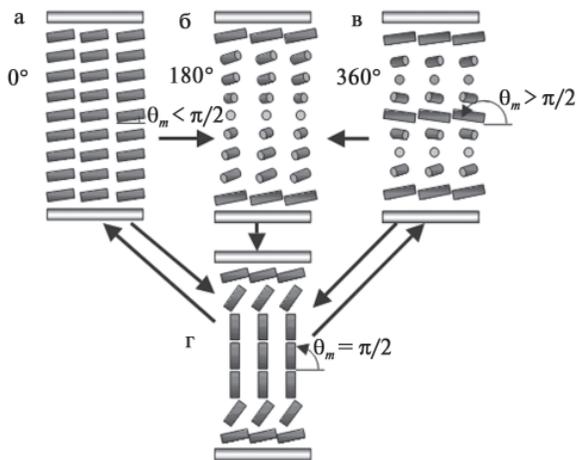


Рис. 4.15. Ориентация НЖК в бистабильном VTN эффекте [1]

бистабильных состояния имеют углы закрутки  $\varphi$  и  $\varphi + 2\pi$ , где  $\varphi$  — угол между направлениями директора на верхней и нижней подложке. Угол  $\varphi$  обычно лежит в диапазоне от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ .

Рассмотрим механизм переключения ячейки в бистабильные состояния. С помощью хиральной добавки обеспечивается такой шаг спирали  $p$ , чтобы отношение  $d/p = 1/2$ . В результате возникает твист структура, закрученная на  $180^\circ$  (рис. 4.15б), имеющая меньшую свободную энергию по сравнению со структурами, показанными на рис. 4.15а, в. Поэтому структура является действительно стабильной (рис. 4.15б), а две другие — метастабильными. Для переключения между бистабильными состояниями используют гидродинамический эффект — вращательное и поступательное движение директора ЖК. Когда  $\Delta\epsilon > 0$  и управляющее напряжение превышает пороговое, происходит переход Фредерикса и ЖК ориентируется гомеотропно в средних слоях ячейки (рис. 4.15г). Вблизи подложек закрутка сохраняется. При снятии напряжения ЖК переходит в состояние с  $\varphi = 0^\circ$ , поскольку оно топологически одинаково с гомеотропным, в то время как состояние с  $\varphi = 180^\circ$  топологически от него отличается.

При подаче поля, превышающего напряжение насыщения, область гомеотропной ориентации увеличивается. При быстром снятии напряжения директор имеет высокую скорость поворота у поверхностей, и малую в середине слоя из-за различий в упругой энергии: она выше у подложек. Это приводит к состоянию с  $\varphi = 360^\circ$ . Режимы управления и оптические свойства VTN ячейки описаны в работе [1].

Были разработаны VTN ячейки с бистабильными состояниями с  $\varphi = 0^\circ$  и  $\varphi = 180^\circ$  [25, 26]. Концентрация хиральной добавки выбиралась так, чтобы оба состояния имели одинаковую энергию. Подаваемое высокое напряжение вызывает переход ЖК в гомеотропное состояние. Скорость выключения управляющего напряжения определяла выбор бистабильного состояния: при малой скорости — в состояние с  $\varphi = 0^\circ$ , а при большой — в состояние с  $\varphi = 180^\circ$ . При использовании наклонной ориентации с большой энергией сцепления на одной подложке и планарной ориентации с малой энергией сцепления на другой подложке время отклика уменьшается до микросекунд.

Эффект бистабильности в НЖК может также реализовываться за счет ориентирующих слоев на поверхности. Различают зенитальный (рис.4.16б) и азимутальный (рис. 4.16а) VTN-эффекты.

Два стабильных положения директора реализуются в разных плоскостях. Азимутальный эффект осуществляется в плоскости под-

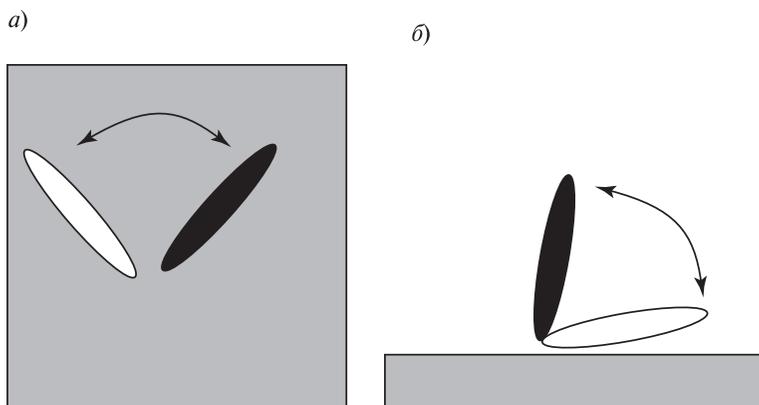


Рис. 4.16. Бистабильность, индуцированная поверхностью:  
а — азимутальная; б — зенитальная

ложек, зенитальный — между подложками. В случае зенитального (Z) эффекта в ячейке одна из подложек плоская, а на другой методами фотолитографии создана периодическая структура в виде канавок (рис. 4.17). Наличие канавок искажает гомеотропную ориентацию в ячейке.

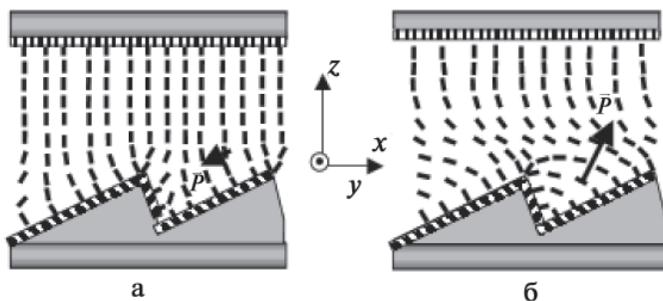


Рис. 4.17. Схема конфигурации директора для двух бистабильных состояний для ZBTN-эффекта.  $P$ —вектор поляризации

Z-ячейка в отсутствие поля имеет два стабильных состояния: рис. 4.16а — состояние с большим углом наклона и рис. 4.16б — с малым углом. Определяющую роль при переключении между двумя стабильными состояниями играет флексоэлектрический эффект. В Z-ячейке вблизи канавок наблюдается преимущественно деформация поперечного изгиба, различная для случаев 4.16а, б. Наличие у НЖК диэлектрической анизотропии приводит к тому, что помимо флексоэлектрического эффекта также имеет место ориентационный (диэлектрический) эффект. При приложении относительно высокого напряжения одной полярности НЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  переориентируется в гомеотропное положение, причем, вблизи канавок создается большой угол наклона. При снятии напряжения возникает состояние с большим углом наклона у канавок. При приложении относительно высокого напряжения противоположной полярности НЖК переориентируется в гомеотропное положение, причем, вблизи канавок создается малый угол наклона. При снятии напряжения возникает состояние с малым углом наклона у канавок.

В ZBTN ячейках на пропускание используются скрещенные поляризаторы, ориентированные под углом  $45^\circ$  к направлению кана-

вок, поэтому направление директора составляет  $45^\circ$  к поляризаторам. Толщина ячейки и двулучепреломление выбираются так, что фазовая задержка при малых углах наклона составляет  $\pi$ , и потому пропускание высокое. Фазовая задержка для состояния с большими углами наклона мала, и потому пропускание мало. ZBTN ячейка управляется импульсами постоянного напряжения со скважностью 10 мс и напряженностью поля 10 В/мкм. Время релаксации к состоянию с малыми углами составляет 20 мс, с большими — 1 мс. Ячейка может быть использована в режиме на отражение. В Z-ячейках могут использоваться и другие ориентации НЖК (гомогенная и гибридная).

Для осуществления азимутального эффекта на поверхности подложки создаются два направления легкой ориентации директора. Для этого на стеклянную подложку дважды напыляют ориентирующие слои (например, SiO) в ортогональных направлениях, причем их профиль можно изменять. В результате создаются два направления ориентации: одно с азимутальным углом  $45^\circ$  и ненулевым углом наклона, другое — с углом  $-45^\circ$  и нулевым углом наклона. При этом возникает продольная деформация директора в двух стабильных положениях, приводящих к появлению разной флексоэлектрической поляризации. С помощью импульсов постоянного электрического тока осуществляется переключение из одного стабильного состояния в другое.

#### **4.1.5. Флексоэлектрический эффект**

Флексоэлектрический эффект наблюдается в НЖК с определенной конфигурацией молекул (клиновидной или бананоподобной) при наличии у них дипольного момента. В отсутствие внешнего поля в недеформированном НЖК распределение диполей цилиндрически симметрично (рис. 4.18а, в). Как показал Р. Мейер [27], полярная ось может возникнуть в НЖК с дипольными молекулами клиновидной формы, если он подвержен деформации поперечного изгиба (рис. 4.18б), или в кристалле с бананоподобными молекулами при деформации продольного изгиба (рис. 4.18г). В этом случае полярная структура соответствует более плотной упаковке молекул. Таким образом, внешняя механическая деформация НЖК приводит к появлению заряда на электродах, перпендикулярных полярной оси.

Вектор поляризации  $P$  для флексоэффекта описывается выражением:

$$P = e_{11} n \operatorname{div} n + e_{33} (n \times \operatorname{rot} n), \quad (4.22)$$

где  $e_{11}$  и  $e_{33}$  — флексоэлектрические модули для  $S$ - и  $B$ -деформаций. Величина модуля  $|e_{33}|$  для МБАА—3,7  $10^{-5}$  дин<sup>1/2</sup>,  $|e_{11}|$  для 5ЦБ—2,5  $10^{-4}$  дин<sup>1/2</sup>.

Флексоэлектрические модули НЖК определяются анизотропией формы молекул (дипольный механизм) и пространственно неоднородным распределением средней ориентации молекул (квадрупольный механизм). Модули могут иметь положительные или отрицательные значения.

При приложении электрического поля к слою НЖК с молекулами клиновидной или бананоподобной формы происходит обратный флексоэлектрический эффект. Плотность свободной энергии  $F_f$ , обусловленная флексоэлектрической поляризацией  $P$ , определяется выражением (4.5), и линейно зависит от напряженности поля  $E$ . Электрическая энергия НЖК вследствие поляризации, прямо пропорциональная его деформации, преобладает при малых деформациях. Электрическая энергия, пропорциональная квадрату деформации, преобладает при больших значениях деформаций. Система достигает равновесия, когда электрический и упругий моменты компенсируют друг друга. В результате в электрическом поле возникают  $S$ - и  $B$ -деформации директора. Рис. 4.19 показывает схему наблюдения флексоэффекта в случае  $B$ -деформации. Подложки задают гомеотропную ориентацию НЖК ( $\Delta\epsilon < 0$ ) и малую энергию сцепления (рис. 4.19а). При приложении электрического поля наблюдается  $B$ -деформация (рис. 4.19б). В случае исходной планарной ориентации НЖК ( $\Delta\epsilon > 0$ ) наблюдается  $S$ -деформация (рис. 4.20).

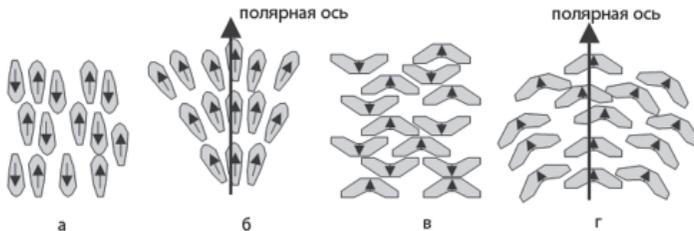


Рис. 4.18. Картина распределения директора и индуцированная спонтанная поляризация

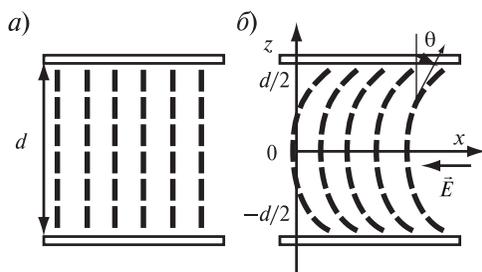


Рис. 4.19. *B*-деформация слоя НЖК в случае флексоэффекта в электрическом поле [1].  $\Delta\epsilon < 0$ ,  $d$  — толщина слоя

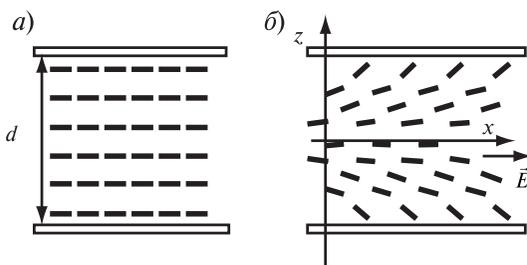


Рис. 4.20. *S*-деформация слоя НЖК в случае флексоэффекта [1]:  $\Delta\epsilon > 0$ ,  $d$  — толщина слоя

В отличие от перехода Фредерикса максимальный угол отклонения директора имеет место на поверхности подложек, а в середине слоя угол отклонения равен нулю. Поэтому условие нежесткого сцепления НЖК с поверхностью необходимо для наблюдения флексоэффекта. Характерные зависимости для флексоэффекта: фазовая задержка  $\Delta\Phi \sim E^2, d^3$ , а также отсутствие порога деформации показаны теоретически и подтверждены экспериментально [1, 3].

Поскольку флексоэлектрическая энергия линейно зависит от поля, а диэлектрическая — квадратична, то диэлектрические эффекты в сильных полях являются преобладающими. Поэтому для наблюдения чистого флексоэффекта необходимо использовать НЖК с очень малым значением диэлектрической анизотропии  $|\Delta\epsilon| \ll 0,75$ .

Флексоэффект играет существенную роль при визуализации дефектов поверхности в электрическом поле [28].

## 4.2. Эффекты проводимости (светорассеивающие)

В разделе рассмотрены электрооптические эффекты, обусловленные наличием электропроводности НЖК и ее анизотропии — электрогидродинамические (ЭГД) эффекты.

В НЖК под действием внешнего электрического поля при напряжении выше порогового возникает периодическое распределение пространственного заряда и потенциала, приводящее к появлению вращающего момента. Нарушение равновесия вращающего момента, с одной стороны, а упругого и диэлектрического — с другой, приводит к возникновению ЭГД неустойчивости в виде периодической картины вращательного движения отдельных участков ЖК (рис. 4.21а).

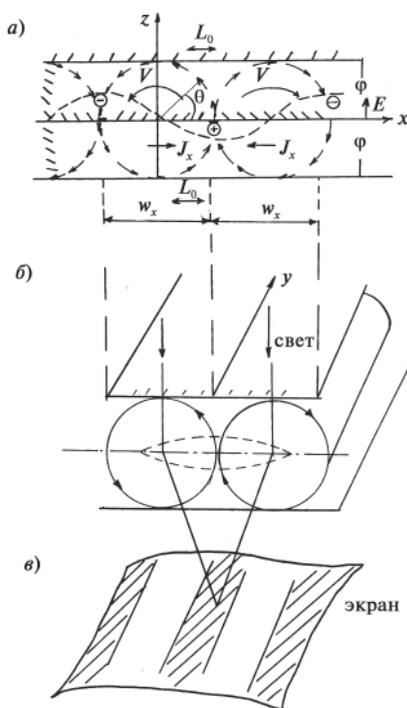


Рис. 4.21. ЭГД неустойчивость в НЖК: а — возникновение неустойчивости; б — вихревое движение НЖК; в — картина черных и белых полос на экране [2]

При этом наблюдается периодическая структура доменов (рис. 4.21б, в). Они наблюдаются на экране как чередующиеся черные и белые полосы, перпендикулярные плоскости деформации. Эти полосы вызваны периодическим изменением коэффициента преломления для необыкновенных лучей в связи с изменением направления директора и были впервые обнаружены Зверевой (Невской) Г.Е. и Капустиным А.П. (рис. 4.22) [29, 30]. Позже они были детально изучены Вильямсом [31] и получили название «домены Капустина – Вильямса». Пороговое напряжение появления доменов 5–10 В и обычно не зависит от толщины ячейки в диапазоне от 10 до 100 мкм. Период доменов всегда немного меньше толщины ячейки и слабо зависит от напряжения. В диапазоне низких частот пороговое напряжение не зависит от частоты. В зависимости от частоты и напряжения приложенного поля, свойств НЖК домены могут иметь различную форму [2]. С увеличением напряжения домены изменяют форму, и при определенном пороговом напряжении в слое НЖК возникает турбулентность, сопровождаемая интенсивным рассеянием света.

Динамическое рассеяние света (ДРС) было обнаружено Фредериксом В.К. и Цветковым В.Н. в 1935 г. [32] и было вновь открыто Хейлмейером и др. в 1968 г. [33]. В НЖК при  $\Delta\epsilon < 0$  и исходной гомеотропной ориентации при приложении напряжения выше порогового ( $U_B$ ) происходит переход Фредерикса (В-эффект), приводя-

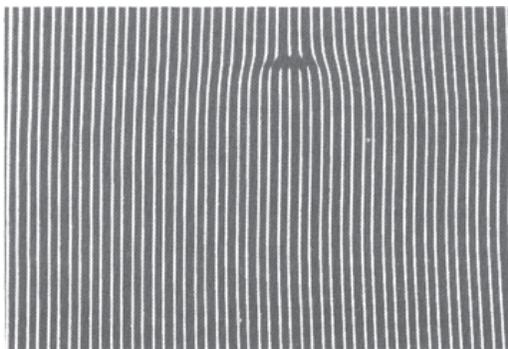


Рис. 4.22. Домены Капустина-Вильямса с периодом 20 мкм в МБА:  $U = 7,5$  В;  $f = 64$  Гц,  $T = 25^\circ\text{C}$ .  
Виден дефект доменной структуры [2]

ший к планарной ориентации, затем при дальнейшем увеличении  $U$  сначала образуются домены Капустина-Вильямса, а затем наблюдается эффект ДРС. Пороговые напряжения эффектов ЭГДН можно понизить, увеличивая анизотропию проводимости  $\Delta\sigma$  добавлением ионных примесей.

При значениях  $\Delta\epsilon$ , близких к нулю, возникает доменная сетка с периодом в 5–10 раз меньшим толщины слоя НЖК при напряжении 80–100 В. Пороговое напряжение этого эффекта можно понизить, увеличивая  $\Delta\sigma$  и уменьшая коэффициенты вязкости и энергию сцепления с подложкой. Из-за большой величины  $U_n$  эффект ДРС в данном случае не наблюдается.

В гомеотропно ориентированном НЖК при  $\Delta\epsilon > 0$  ЭГДН наблюдается в виде коноскопических крестов, возникающих вследствие дестабилизации ориентации директора электроконвективными круговыми потоками нематика, образующимися вблизи электродов. Для наблюдения эффекта ДРС требуются большие напряжения.

Оптические характеристики эффекта ДРС в ЖК404И (разработки НИОПиК) представлены на рис. 4.23. Интенсивность светорассеяния зависит от размеров рассеивающих неоднородностей  $r_0$  и параметров НЖК. С увеличением напряжения происходит уширение индикатрисы светорассеяния (рис. 4.23г) вследствие уменьшения размеров центров рассеяния и увеличения их концентрации. Теоретическая оценка размера рассеивающих неоднородностей определяет  $r_0$  как  $K/E$ , где  $K$  — модуль упругости НЖК. В случае, когда  $d = 20$  мкм,  $U = 20$  В,  $K = 1 \cdot 10^{-6}$  дин,  $r_0 = 0,3$  мкм [34]. Реально в возмущенном слое присутствуют оптические неоднородности разного размера, и с увеличением напряжения среда становится более монодисперсной.

Отношение интенсивности рассеяния по всем направлениям к интенсивности падающего излучения (полное сечение рассеяния  $G$ ) [35]:

$$G = \lambda^4 r_0^6 (\Delta n)^2 \quad (4.23)$$

Из этого выражения следует, что эффективность светорассеяния в эффекте ДРС можно повысить, выбирая НЖК с наибольшими значениями  $\Delta n$  и модуля упругости. Анализ эффекта ДРС приведен в работе [36].

Экспериментальное исследование индикатрис светорассеяния НЖК различных структур в режиме ДРС показало, что при всех условиях управления они имеют остронаправленный характер. Различия в химической структуре оказывают меньшее влия-

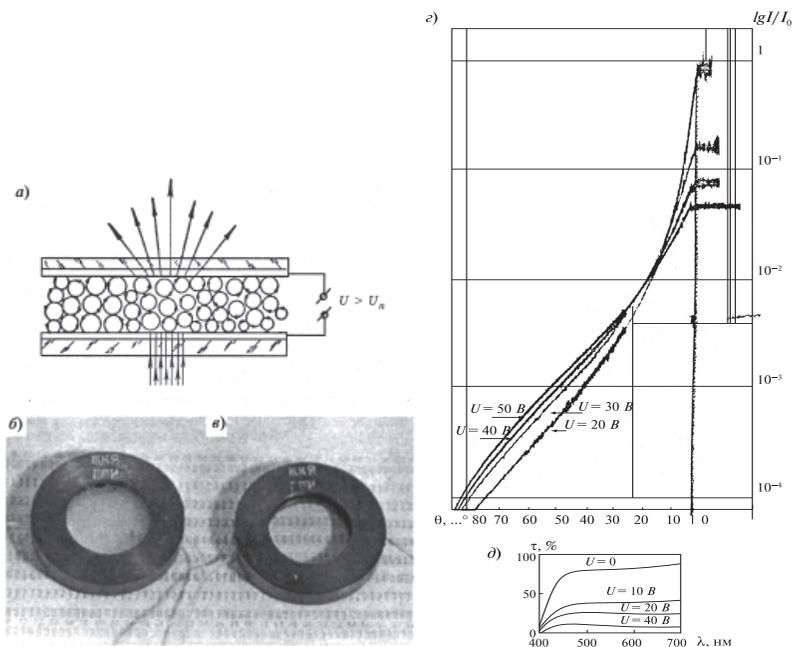


Рис. 4.23. Эффект ДРС: *a* — модель эффекта; *б* — рассеивающее состояние ЖКЯ; *в* — прозрачное состояние ЖКЯ ( $U = 0$ ); *г* — экспериментальные индикатрисы для ЖК 404И толщиной  $d = 20$  мкм при  $\lambda = 633$  нм; *д* — графики спектрального пропускания;  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $f = 50$  Гц.

ние на форму индикатрис, чем проводимость при близких значениях  $\Delta n$ . Индикатрисы гомеотропно ориентированных слоев НЖК осесимметричны, а планарно ориентированных — асимметричны при малых значениях напряжения. Эффективность светорассеяния возрастает с уменьшением толщины слоя НЖК. Закономерности светорассеяния при изменении управляющего напряжения изучены в работах [37, 38]. Было показано, что с изменением напряжения наблюдается чисто масштабное изменение оптических неоднородностей, из чего следует масштабное подобие в семействе индикатрис:

$$I_V(\theta) = \frac{M}{v^2} I\left(\frac{\theta}{v}\right), \quad (4.24)$$

где  $\theta$  — угол рассеяния,  $\nu$  — масштаб оптических неоднородностей,  $M$  — коэффициент пропорциональности.

При выполнении условия масштабности в семействе кривых достаточно экспериментально определить только исходную кривую, тогда как все остальные получатся из исходной масштабным преобразованием. Проведенные эксперименты показали, что в семействе индикатрис, полученных при различных напряжениях, удовлетворительно выполняется условие подобия, свидетельствующее о масштабном изменении размеров оптических неоднородностей. Огибающая этого семейства, исчерпывающе описывая характер их изменения, в логарифмическом масштабе имеет вид прямой. Эта огибающая, по существу, является характеристической кривой любого светорассеивающего эффекта с масштабным изменением размеров оптических неоднородностей.

Сравнение индикатрис разных ЖК смесей при одинаковых значениях напряжения и проводимости показало увеличение эффективности светорассеяния с увеличением  $\Delta n$  и  $\Delta \epsilon$  [39]. Обнаруженные зависимости объясняются тем, что в обоих случаях возрастает градиент показателя преломления оптических неоднородностей, на которых происходит светорассеяние. Эти результаты полезны для оптимизации параметров устройств отображения информации. Эффект ДРС был использован при создании первых информационных дисплеев; в настоящее время он находит применение в качестве световых шторок и оптических модуляторов.

### 4.3. Магнитооптические эффекты в НЖК

Теоретическое описание оптического эффекта в слое НЖК под влиянием однородного магнитного поля и подложек ячейки впервые дал В.К. Фредерикс [5]. Ориентация директора в этом случае обусловлена наличием анизотропии диамагнитной восприимчивости НЖК, равной  $\Delta\chi = (\chi_{\parallel} - \chi_{\perp})$ . Магнитное поле  $H$  существенно влияет на ориентационное поле директора  $n$ , создавая моменты сил, стремящиеся ориентировать его вдоль силовых линий магнитного поля. Этому препятствуют ориентационные упругие деформации, создающие уравновешивающие моменты, пропорциональные второй степени градиента ориентационного поля. Уравнения для описания ориентации директора во однородном магнитном поле аналогичны приведенным ранее выражениям (4.1–4.4) с соответствующей заменой напряженности электрического поля  $E$  и диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon$  на на-

пряженность магнитного поля  $\mathbf{H}$  и диамагнитную анизотропию  $\Delta\chi$ . Из решения уравнения Эйлера-Лагранжа

$$K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \Delta\chi H^2 \sin\theta \cos\theta = 0 \quad (4.25)$$

была определена напряженность порогового поля  $H_n$  для толщины слоя  $d$ :

$$H_n d = \pi \sqrt{K/\Delta\chi} \quad (4.26)$$

В зависимости от граничных условий в магнитном поле наблюдаются различные переходы Фредерика: S-, B- и твист-эффекты.

Теория магнитооптических явлений получила развитие в работах д. ф.-м. н. Э.Л. Аэро, где рассмотрено влияние границ различной формы, содержащих дефекты, на деформацию и двулучепреломление НЖК [40, 41]. Выводы из теории имеют практическое значение и представляют интерес при использовании нематиков в качестве регистрирующих сред.

Рассмотрим теорию локальных деформаций НЖК в неоднородных магнитных полях. Пусть векторы  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{n}$  лежат в одной плоскости  $(x, y)$ . Тогда в этой плоскости возникает лишь деформация изгиба и проекции директора на оси координат определяются выражениями:

$$n_x = \sin\theta, \quad n_y = \cos\theta, \quad n_z = 0, \quad (4.27)$$

где  $\theta$  — угол между направлением директора  $\mathbf{n}(x, y)$  и осью  $y$ .

Деформация кручения не возникает ( $\mathbf{n} \operatorname{rot} \mathbf{n} = 0$ ), и в результате имеем следующее уравнение вращающих моментов:

$$(K_{11} - K_{33})\mathbf{n} \times \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{n} + K_{33} \mathbf{n} \times \Delta^2 \mathbf{n} + \Delta\chi (\mathbf{n} \mathbf{H})(\mathbf{n} \times \mathbf{H}) = 0, \quad (4.28)$$

где  $K_{11}$ ,  $K_{33}$  — модули упругости.

Стационарное магнитное поле в слое НЖК описывается уравнениями Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{j}; \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \quad B_i = H_i + \Delta\chi H_k = H_i, \quad (4.29)$$

где  $\mathbf{j}$  — плотность электрического тока.

Диамагнитная восприимчивость НЖК весьма мала и в гауссовской системе единиц  $[\chi] \approx 1 \cdot 10^{-6}$ , поэтому с большой точностью  $\mathbf{B} = \mathbf{H}$ . Следовательно, уравнения (4.29) могут быть решены независимо от уравнений (4.28), и поле  $\mathbf{H}$  в (4.28) можно рассматривать как чисто внешнее, заданное геометрией и свойствами поверхности.

Уравнение (4.28) можно существенно упростить, если допустить  $K_{11} = K_{33}$ . В действительности существует много НЖК с близкими значениями поперечного ( $K_{11}$ ) и продольного ( $K_{33}$ ) модулей упругости, а оптимизированные смеси полярных и неполярных соединений позволяют получать точное равенство модулей  $K_{11} = K_{33} = K$ . Тогда уравнение (4.28) с учетом условий (4.27) упрощается:

$$\nabla^2 (2\alpha) - (\Delta\chi / KH^2) \sin 2\alpha = -\nabla^2 \psi; \quad \alpha = \theta - \psi, \quad (4.30)$$

где  $\psi$  — угол ориентации вектора напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}$ .

Пусть электрические токи  $j$  отсутствуют и магнитное поле потенциально, т. е.  $\mathbf{H} = -grad \mu$ ,  $\nabla^2 \mu = 0$ . Покажем, что в этом случае  $\nabla^2 \theta = 0$  [42]. Исходим из тождества

$$\nabla^2 \psi \equiv \cos^2 \psi [\nabla^2 (\text{tg} \psi) - 2 \sin \psi \cos \psi (\text{grad} \text{tg} \psi)^2]$$

и учитывая, что  $\text{tg} \psi = H_x / H_y$  и вычисляя правую часть, получим

$$\nabla^2 \psi = 2 H_x H_y [(\partial H_y / \partial y)^2 - (\partial H_x / \partial x)^2] H^{-4} \quad (4.31)$$

Принимая во внимание второе и третье уравнения (4.29), имеем  $H_y / y = -H_x / x$ . Возводя обе части в квадрат и используя полученное равенство (4.31), приходим к окончательному выводу, что  $\nabla^2 \psi = 0$ .

Преобразуем член  $\nabla^2 (2\alpha)$  из уравнения (4.30), перейдя от  $x, y$  к новой системе ортогональных координат  $\mu$  и  $\eta$ , представляющих собой действительный и мнимый потенциалы магнитного поля.

$$\mathbf{H} = -grad \mu; \quad H^2 = [dW/dz]^2; \quad W = \mu + i\eta. \quad (4.32)$$

Условие  $\mu(x, y) = \text{const}$  является уравнением эквипотенциалей, а условие  $\eta(x, y) = \text{const}$  — уравнением векторных линий магнитного поля. При конформном преобразовании плоскости  $z = x + iy$  в плоскость  $W = \mu + i\eta$  оператор Лапласа  $\nabla^2$  преобразуется следующим образом:

$$\nabla^2 = [dW/dz]^2 \nabla_\mu^2 = H^2 \nabla_\mu^2; \quad \nabla_\mu^2 = (\partial^2 / \mu^2) + (\partial^2 / \eta^2) \quad (4.33)$$

Тогда уравнение (4.30) с учетом  $\nabla^2 \psi = 0$  можно записать в виде:

$$\nabla_\mu^2 (2\alpha) - (\chi_\alpha / k) \sin 2\alpha = 0, \quad \alpha = \alpha(\mu, \eta). \quad (4.34)$$

Это уравнение равновесия определяет  $\alpha$  — угол взаимной ориентации векторов  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{H}$  — как функцию магнитных потенциалов

$\mu(x, y)$ ,  $\eta(x, y)$  и материальной константы  $\sqrt{K/\Delta\chi}$  с размерностью магнитного потенциала.

Таким образом, особенность магнитоориентационных эффектов в НЖК с малой изгибной анизотропией состоит в том, что вид функции  $\alpha(\mu, \eta, \chi_{\alpha}/k)$  одинаков для полей  $H$  любой напряженности. Непосредственная связь  $\alpha$  с  $\mu$  и  $\eta$  позволяет рассматривать НЖК как регистрирующие среды, деформации которых локально отображают магнитные поля однозначно в любой точке пространства [42].

Приведенные сведения представляют собой теоретические основы для решения проблемы визуализации и измерения характеристик неоднородных магнитных полей с помощью с ЖК. Оптимальными условиями реализации измерения характеристик магнитного поля при помощи ориентации в нем молекул НЖК являются граничные условия вида  $n \parallel H$  или  $n \perp H$ , а также низкие значения  $\mu$  или порога устойчивости деформаций.

#### 4.4. Термооптические эффекты в НЖК

ЖК материалы при изменении фазового состояния резко изменяют свои оптические свойства: это ярко проявляется при фазовом переходе из изотропной жидкости в жидкокристаллическую фазу, а также при переходах между жидкокристаллическими фазами. Фазовые переходы могут наблюдаться вследствие изменения температуры или изменения химической структуры соединений под действием излучения [43]. Определенный интерес представляет фазовый переход, возникающий в смесях ЖК с немезоморфным веществом, изменяющим свою химическую структуру под действием света и вызывающим вследствие этого изменение фазового состояния смеси. В работе [44] описано воздействие УФ-излучения на смесь НЖК с растворенными в нем оптически активными веществами, способными к фоторацемизации. За счет этого происходил переход из нематической фазы в холестерическую. Последующая рацемизация примеси под действием УФ-излучения приводила к необратимому фазовому переходу ХЖК-НЖК. Такой способ был использован для создания изображений.

Фазовые переходы могут происходить вследствие изомеризации молекул НЖК. Для этого используют материалы, молекулы которых способны существовать в виде двух изомеров: *транс*-формы, обладающей мезофазой, и немезоморфной *цис*-формы. Облучение светом определенной длины волны находящегося в НЖК фазе *транс*-изомера приводит к появлению *цис*-изомера и повышению

его концентрации. При достижении некоторой концентрации *цис*-изомера смесь этих изомеров переходит из ЖК фазы в изотропную, что резко изменяет пропускание поляризованного света на облученных участках.

Термооптические эффекты могут быть реализованы как в реальном времени, так и с памятью.

#### Литература к главе 4

1. *Yang D.-K., Wu S.-T.* Fundamentals of Liquid Crystal Devices. John Wiley & Sons. 2006. 387 p.
2. *Блинов Л.М.* Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
3. *Blinov L.M., Chigrinov V.G.* Electrooptic effects in liquid crystal materials. Springer. 1996. 464.
4. *Khoо I.-C.* Liquid crystals. John Wiley & Sons. 2007. 383 p.
5. *Фредерикс В.К., Золина В.В.* О применении магнитного поля к измерению сил, ориентирующих анизотропные жидкости в тонких однородных слоях // Журн. Рос. физ.-хим. о-ва. Сер. физ. 1930. Т. 62. С. 457.
6. *Сонин А.С.* Дорога длиною в век: из истории науки о жидких кристаллах. М.: Наука. 1988. 223 с.
7. *Komitov L., Petrov A.* Optical method for determination of anchoring energy of tilted nematic layers // Phys. Stat. Sol. 1983. Vol. 76a. P. 137–143.
8. *Bartolino R., Barbero G., Aiello P.* Field induced molecular reorientation in the hibrid nematic cell // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1984. Vol. 113. P. 303–319.
9. *Schadt M.* Dielectric properties of some NLC with strong positive dielectric anisotropy // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 56. № 4. P. 1494–1497.
10. *Barbero G., Bartolino R., Meuti M.* A conjecture on Mada theory for NLC-surface interaction // J. Phys. Lett. (France). 1984. T.45. P. L-449 -L-458.
11. *Heilmair G.H., Zanoni L.A.* Guest-host interaction in NLCs — a new electrooptical effect // Appl. Phys. Lett. 1968. Vol.13. P. 91.
12. *Soref R.A.* Field effect in NLCs obtained with interdigital electrodes // J. Appl. Phys. 1974. Vol.45. P. 5466.
13. *Kiefer R., Weber B., Windscheid F.* and Baur G. In-plane switching of NLCs, Japan Displays. 1992. Vol. 92. P. 547.
14. *Lee K.H., Song S.H., Yang S.M., Park S.H., Kim, J.K., Han J.K., Park I.C.* and Lim Y.J. CRT like characteristics of 32' WXGA TFT-LCD by true vision advanced FFS pixel concept // SID Tech. Dig. 2005. Vol. 36. P. 1742.
15. *Berreman D.W., Heffner W.R.* New bistable cholesteric LCD // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 37. P. 109.
16. *Tanaka T., Sato Y., Obikawa T., Nomura H.* and Iino S. Physical and electro-optical properties of bistable twisted nematic (BTN) LCD // Proceed. of the International Display Research Conference. 1997. M-64.

17. *Qian T.-Z., Xie Z.-L., Kwok H.-S., Sheng P.* Dynamic flow and switching bistability in NLC cells // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 71. P. 596.
18. *Brown G.P.* Ultra low power bistable LCDs // *Proceed. of the International Display Research Conference.* 2000. P. 76.
19. *Bryan-Brown G.P., Brown C.V., Jones J.C., Wood E., Sage L.C. Brett P.* Grating aligned bistable nematic device // *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 1997. 28. P. 37.
20. *Barberi R., Durand G.* Electrically controlled bistable surface switching in NLCs // *Appl. Phys. Lett.* 1991. Vol. 58. P. 2907.
21. *Barberi R, Giocondo M., Li J, and Bartolino R.* Fast bistable nematic display with gray scale // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 71. P. 3495.
22. *Barberi R. and Durand G.* Controlled textural bistability in NLCs // *In Handbook of LC research / ed. P.J. Collings and J.S. Patel. Oxford University Press, New York.* 1997.
23. *Boyd G.D., Cheng J. and Ngo P.D.T.* Liquid-crystal orientational bistability and nematic storage effects // *Appl. Phys. Lett.* 1980. Vol. 36. P. 556.
24. *Thurston R.N., Cheng J. and Boyd G. D.* Mechanically bistable LCD structures // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1980. ED-27. P. 2069.
25. *Dozov I., Nobili M. and Durand G.* Fast bistable nematic display using monostable surface switching // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Vol. 70. P. 1179.
26. *Martinot-Lagrade P., Dozov I., Polossat E., Giocondo M., Lelidis I. and Durand G.* Fast bistable nematic display using monostable surface anchoring switching // *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 1997. Vol. 28. P. 41.
27. *Meyer R.B.* Piezoelectric effects in liquid crystals // *Phys. Rev. Lett.* 1969. Vol. 22. P. 918.
28. *Chigrinov V.G., Nevskaya G.E.* Electro-optic LC methods for non-destructive testing of solid surfaces // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1991. Vol. 209. P. 9–18.
29. *Зверева Г.Е., Капустин А.П.* Поведение жидкокристаллического параазоксифенетол в ультразвуковом и электрическом полях // *Сб. Применение ультразвуки к исследованию вещества. М. Наука. 1961. Вып. 15. С. 69.*
30. *Невская Г.Е., Чигринов В.Г., Дзенис С.Ф., Коркишко Т.В.* Визуализация пространственно неоднородных электрических полей в диэлектрических полях с помощью НЖК // *Опт. и спектр.* 1989. Т.66. Вып.1. С. 145–149.
31. *Williams R.* // *J. Chem. Phys.* 1963. Vol.39. P. 384.
32. *Fredericksz V.K, Tsvetkov V.N/* Orienting effects in of electric field on anisotropic liquids // *Consp. Red. Acad. Scien (USSR).* 1935. № 5. Vol.4. P. 131–139.
33. *Хейлмейер Г.Х., Занони Л.А., Бартон Л.А.* Динамическое светорассеяние: новый электрооптический эффект в некоторых классах НЖК // *Тр. инженеров исслед. ин-та электр. и радиотехн.* 1968. Т. 56. №7. С. 24–34.
34. *Пикин С.А.* Структурные превращения в ЖК. М., Наука. 1982. 336 с.
35. *Ван де Хюлст.* Рассеяние света мелкими частицами. М. Иностран. лит. 1961. 500с.

36. *Bahadur B.* Dynamic scattering. LCs application and uses. Toronto: World Scientific. 1991. Vol. 2a. P. 243–256.
37. *Гитин А.В., Каретников А.А., Томилин М.Г.* Исследование закономерностей электрически управляемого светорассеяния в НЖК // В сб. «Оптика ЖК». Л. ГОИ. 1986. Т. 60. Вып. 194. С. 48–56.
38. *Гитин А.В., Томилин М.Г.* Описание эффекта ДРС в ЖК // Опт. журн. 1993. №7. С. 19–25.
39. *Адоменане О.К., Каретников А.А., Папконене Р.П., Томилин М.Г.* Влияние оптических и диэлектрических свойств НЖК на эффективность ДРС // Опт. и спектр. 1991. Т. 71. Вып. 5. С. 793–797.
40. *Аэро Э.Л.* Электро- и магнитооптические эффекты в криволинейных областях, заполненных НЖК // Опт. и спектр. 1995. Т. 79. Вып. 2. С. 320–328.
41. *Аэро Э.Л., Бессонов Н.М., Веретенникова Т.В.* Магнитоупругие деформации НЖК и задачи визуализации и отображения информации в неоднородных М-полях // Опт. журн. 1998. Т.65. №7. С. 47–50.
42. *Аэро Э.Л., Томилин М.Г.* Применение ЖК для неразрушающего контроля оптических материалов, деталей и изделий // Журнал ОМП. 1987. № 8. С. 50–69.
43. *Ковалев А.А., Некрасов Г.Л., Разин Ю.В.* Оптическая запись информации на ЖК средах // В кн.: Оптические методы обработки информации. Минск: Наука и техника. 1978. С. 21–35.
44. *Mioskowski C., Bourguigon I., Candau S., Solladie G.* Photochemically induced cholesteric-nematic transition in LCs // Chem. Phys. Lett. 1976. Vol. 38. P. 456–459.

## Глава 5

### ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ И СМЕКТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ

При воздействии электрического поля на холестерики и смектики могут наблюдаться как ориентационные эффекты, так и эффекты, обусловленные проводимостью. В полимерных жидкокристаллических композитах наблюдаются ориентационные эффекты.

#### 5.1. Текстурные переходы в ХЖК в электрическом поле

Оптические свойства ХЖК зависят от ориентации оси спирали относительно поверхности ячейки. Возможны четыре вида текстур, показанных на рис. 5.1 [1, 2]. Когда оси спирали перпендикулярны к подложкам текстура называется планарной, при этом наблюдается отражение падающего на ячейку света (рис. 5.1а). При случайной ориентации осей возникает мультидоменная конфокальная текстура, рассеивающая свет (рис. 5.1б). При приложении электрического поля перпендикулярно подложкам в ХЖК возникает текстура *отпечатков пальцев* с направлением осей спиралей параллельно подложкам (рис. 5.1в). При приложении к ячейке более высокого напряжения для ХЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  происходит раскрутка спирали и возникает гомеотропная ориентация молекул (рис. 5.1д). В этом случае ячейка становится прозрачной.

Рассмотрим влияние электрического поля на ХЖК в случае, когда его проводимость пренебрежимо мала. Тогда взаимодействие ХЖК с электрическим полем можно рассматривать как чисто диэ-

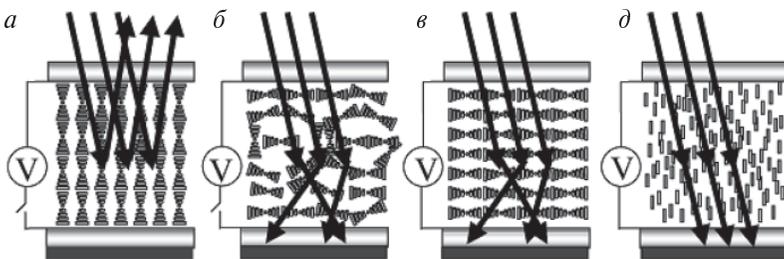


Рис. 5.1. Текстуры ХЖК: *а* — планарная; *б* — конфокальная; *в* — *отпечатков пальцев*; *г* — гомеотропная [2]

лектрическое. Возможны различные варианты в зависимости от знака  $\Delta\epsilon$ , исходной текстуры ХЖК и направления электрического поля. Текстурные изменения в ХЖК аналогичны переходам Фредерикса в НЖК и приводят к существенному изменению оптических свойств слоя. Ориентационные электрооптические эффекты в ХЖК имеют магнитные аналоги.

Ограничимся рассмотрением случаев, представляющих практический интерес, когда прикладываемое электрическое поле перпендикулярно к поверхности подложек и  $\Delta\epsilon > 0$ . В электрическом поле к плотности свободной энергии добавляется величина  $[-\Delta\epsilon(\mathbf{E}\mathbf{n})^2/4\pi]$ . Для планарной текстуры упругая энергия равна нулю, поскольку отсутствует деформация директора, в то время как для конфокальной текстуры она положительна из-за деформации изгиба слоя ХЖК. Для планарной текстуры электрическая энергия равна нулю, потому что директор  $\mathbf{n}$  всюду в ячейке перпендикулярен  $\mathbf{E}$ , в то время как для конфокальной текстуры она отрицательна из-за деформации изгиба слоя ХЖК, потому что  $\mathbf{n}$  параллелен  $\mathbf{E}$  в некоторых областях. Упругая энергия противодействует переходу планарная-конфокальная текстура (П–К), в то время как электрическая энергия способствует переходу. Когда прикладываемое поле достаточно велико, планарная текстура становится нестабильной и переходит в конфокальную. Механизмы перехода П–К рассмотрены в работе [2].

При приложении напряжения к конфокальной текстуре и его увеличении все больше молекул ХЖК ориентируется вдоль по полю, плавно переходя к текстуре *отпечатков пальцев*. При дальнейшем увеличении поля шаг спирали увеличивается, как показано на рис. 5.2. Зависимость шага спирали от величины поля детально рассмотрена в работе [1].

Когда поле превышает пороговое значение  $E_c$ , определяемое выражением

$$E_c = \frac{\pi^2}{P_0} \sqrt{\frac{K_{22}}{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon}}, \quad (5.1)$$

спираль полностью раскручивается, шаг становится равным бесконечности и ХЖК переходит в НЖК с прозрачной гомеотропной структурой. Полная раскрутка спирали приводит к превращению оптически отрицательной ( $\Delta n < 0$ ) и оптически активной планарной текстуры в оптически положительную ( $\Delta n > 0$ ) неактивную текстуру. Для практического применения используют хиральные нематики, в которых при приложении электрического поля происходит раскрутка спирали и возникает гомеотропная ориентация молекул.

При уменьшении приложенного напряжения ХЖК имеет возможность перехода из гомеотропного состояния в одну из двух структур: конфокальную и планарную. В первом случае ХЖК релаксирует в состояние *отпечатков пальцев* и затем в конфокальную структуру, как это рассмотрено выше (рис. 5.2). Переход является относительно медленным (время — порядка 100 мс) и имеет гистерезис. Во втором случае ХЖК релаксирует в планарное состояние (рис. 5.3) [2].

Когда приложенное поле будет незначительно меньше  $E_c$ , происходит переход из гомеотропного состояния в структуру *отпечатков паль-*

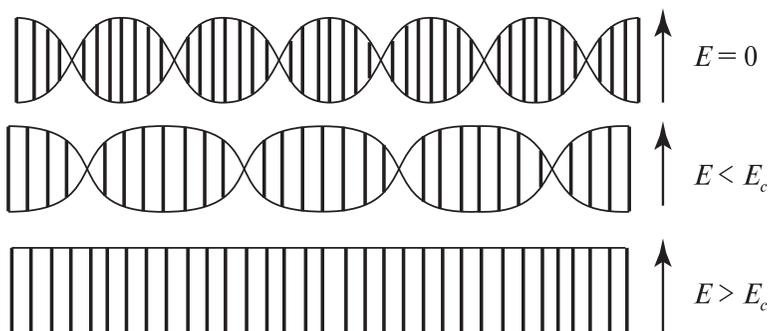


Рис. 5.2. Схема перехода из текстуры *отпечатков пальцев* к гомеотропной текстуре, сопровождаемого раскруткой холестерической спирали.  $E_c$  — порог перехода в гомеотропную текстуру

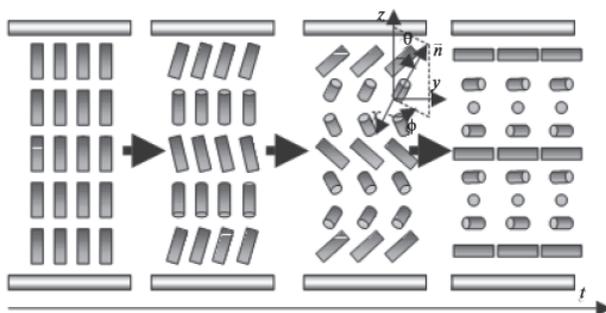


Рис. 5.3. Схема перехода из гомеотропной текстуры к планарной

цев. В поле, значительно меньшем, — происходит переход в планарное состояние. Причем в этом случае ХЖК сначала быстро релаксирует в *переходное* планарное состояние за время примерно 1 мс, а затем более медленно — в *стабильное* планарное состояние (100 мс). В бистабильных дисплеях на ХЖК используются оба перехода: в планарное отражающее состояние и не отражающее конфокальное состояние.

В ХЖК, как и в нематиках, наблюдаются гидродинамические эффекты, обусловленные наличием проводимости. В этом случае знак и величина  $\Delta\epsilon$  не столь важны, поскольку гидродинамические явления объясняются анизотропией электропроводности  $\Delta\sigma$ . Нестабильности вызваны наличием вращающего момента, вызванного проводимостью и действующего против него упругого момента ХЖК. В результате при напряжении выше порогового формируются двумерные периодические картины распределения директора. При дальнейшем увеличении напряжения возникает турбулентное движение жидкости, вызывающее интенсивное рассеяние света и напоминающее эффект ДРС в НЖК. Однако в отличие от НЖК при снятии напряжения рассеяние света сохраняется. Более подробное описание ЭГДН в холестериках приведено в работе [1].

## 5.2. Переходы Фредерикса и ЭГДН в смектиках А и С

В смектике А директор всегда направлен перпендикулярно к плоскости слоев. Поскольку при S-деформации расстояния между слоями не изменяется, поэтому при воздействии электрического поля учитывается только модуль упругости  $K_{11}$ . Плотность свобод-

ной энергии смектической  $A$  фазы при приложении электрического поля описывается уравнением [1]:

$$F = \frac{1}{2} \left[ B \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + K_{11} (\operatorname{div} \vec{n})^2 - \frac{\Delta \epsilon}{4\pi} (\vec{n} \vec{E})^2 \right], \quad (5.2)$$

где  $u$  — сдвиг смектических слоев из состояния равновесия,  $z$  — направление, перпендикулярное слоям,  $B$  — модуль упругости смектической фазы,  $\vec{n}$  — директор.

В случае СЖК с  $\Delta \epsilon > 0$  при приложении напряжения происходит переход Фредерикса. Выражение для порогового напряжения формально такое же, как и для НЖК. Величина деформации  $\theta_m$  при напряжении больше порогового очень мала ( $\theta_m^2 \approx 10^{-5} - 10^{-4}$ ). Столь малый угол отклонения молекул практически трудно зарегистрировать, и потому переход Фредерикса в смектике  $A$  называют призрачным. Реально наблюдаются текстурные переходы, сопровождаемые появлением дефектов. Эти переходы описывает модель Пароди, приведенная в работе [1].

Переход Фредерикса в смектике  $C$  зависит от расположения слоев и директора относительно подложек. Выделяют 4 различные геометрии. Кроме того, для каждой из них существуют, по меньшей мере, три варианта направления поля. Таким образом, получается 12 вариантов, теоретически рассмотренных Рапини [1]. В большинстве из них переход Фредерикса является призрачным, поскольку требует сжатия смектических слоев. Однако в трех случаях поле вызывает лишь поворот директора вокруг нормали к слоям, оставляя слоистую структуру неизменной.

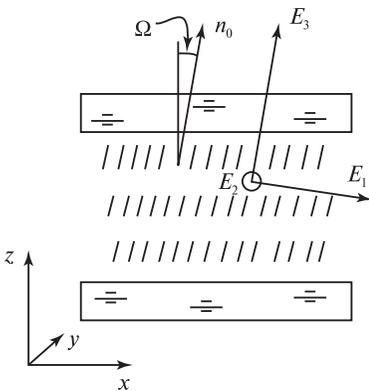


Рис. 5.4. Переходы Фредерикса в смектике  $C$ . Показаны три направления поля, для которых наблюдаются ориентационные деформации ( $E_1, E_2, E_3$ )

Если поле приложено вдоль директора, то переход Фредерикса возможен, когда  $\epsilon_2 > \epsilon_3$  ( $\epsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость вдоль оси  $y$ ;  $\epsilon_3$  — диэлектрическая проницаемость в направлении,

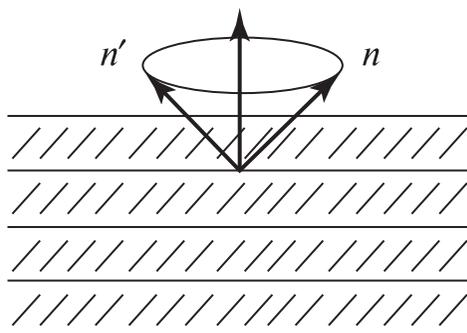


Рис. 5.5. Вращение директора вокруг оси  $z$  при приложении электрического поля [3]

перпендикулярном директору в плоскости  $xz$ ). Директор должен поворачиваться вокруг оси  $z$ , не изменяя при этом угла  $\Omega$ , так чтобы в предельно сильном поле его проекция на смектические плоскости совпала с осью  $y$ .

Если поле направлено перпендикулярно директору и лежит в плоскости  $xz$ , то в случае  $\epsilon_2 > \epsilon_1$ , ( $\epsilon_1$  — диэлектрическая проницаемость вдоль оси  $y$ ) оно вызывает ту же самую деформацию, т. е. поворот директора вокруг оси  $z$ . В случае направления поля вдоль оси  $y$  деформация директора аналогична предыдущим (рис. 5.5). Однако для рассмотренных 3-х случаев пороговые поля различны [1, 3].

Экспериментальные исследования переходов Фредерикса в различных смектиках  $C$  были выполнены группой из Галле [4]. Время отклика в смектике  $C$  больше, чем в нематике в  $\sin^{-2}\Omega$  раз [1].

При рассмотрении ЭГДН в смектике  $A$  надо учитывать большую величину вязкости, чем для нематиков, и отрицательную анизотропию проводимости  $\Delta\sigma$ . При  $\Delta\sigma < 0$  более высокая подвижность носителей зарядов наблюдается вдоль смектических плоскостей. Поэтому при достаточно высокой электропроводности смектик  $A$  в низкочастотном или постоянном поле ориентируется молекулярными осями перпендикулярно к полю независимо от знака  $\Delta\epsilon$ . В смектике  $A$  с  $\Delta\epsilon > 0$  в достаточно сильном поле происходит переход из планарной текстуры в гомеотропную [5, 6]. Такой переход применяют для стирания информации, записанной тепловым воздействием луча лазера на прозрачную гомеотропную текстуру. На-

грев приводит к переходу в нематическую фазу, а последующее охлаждение дает прозрачную конфокальную текстуру. Обратный переход из светорассеивающей текстуры в исходную планарную требует длительного времени, зависящего от температуры. Таким образом, в смектике *A* реализуется электрически индуцированная память, что можно использовать для регистрации оптической информации.

В предпереходной области из нематической фазы в смектическую фазу *A* в электрическом поле наблюдаются домены. Порог возникновения доменной неустойчивости примерно на порядок выше (около 7000 В/см) порога ЭГДН для НЖК вдали от перехода, а период доменов существенно меньше. При повышении напряжения в СЖК наблюдается турбулентное движение, сопровождаемое интенсивным светорассеянием. Может быть выбрана такая частота, на которой с повышением напряжения можно последовательно перейти от конфокальной текстуры через гомеотропную к ЭГДН (рис. 5.6). ЭГДН в смектике в отличие от нематиков сразу приобретает турбулентный характер, и слоистая структура разрушается без кругового течения, обычно наблюдаемого в виде доменов Капустина-Вильямса.

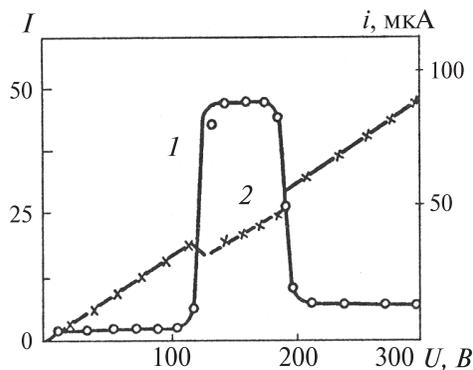


Рис. 5.6. Зависимости интенсивности проходящего света  $I$  (кривая 1) и тока  $i$  (кривая 2) от приложенного напряжения  $U$ . Исходное состояние: конфокальная текстура,  $T = 53$  °С,  $d = 15$  мкм, частота — 200 Гц.; 4'-нитрофенил-4 октилоксибензоат [5]

Другое отличие состоит в зависимости этих процессов от толщины слоя ЖК и наличия эффекта памяти. Изучению светорассеи-

вающих параметров в смектике посвящена работа [7]. Наиболее характерными особенностями наблюдаемых ЭГДН в смектике  $C$  являются слабая зависимость порога от частоты, зависимость порогового напряжения от толщины ячейки, уменьшение ширины доменов с частотой электрического поля. Эти особенности хорошо согласуются с «изотропным» механизмом неустойчивости. Домены Капустина-Вильямса не наблюдаются даже в предпереходных областях СЖК.

### **5.3. Электрооптические эффекты в сегнетоэлектрических смектиках**

В сегнетоэлектрических смектиках ( $C^*$ ЖК) в электрическом поле наблюдается ряд электрооптических эффектов. Практический интерес представляют эффекты с повышенным быстродействием: эффект Кларка-Лагервола, эффект деформации геликоида и электроклинный эффект. В  $C^*$ ЖК обнаружены и другие электрооптические эффекты, такие как раскрутка геликоида, эффект гость-хозяин, электрогидродинамическая неустойчивость и др., которые в настоящее время не нашли практического применения [1].

#### ***5.3.1. Эффект Кларка-Лагервола***

В ЖК устройствах чаще всего требуется однородная ориентация директора. В смектике  $C^*$  директор закручен от слоя к слою. Н. Кларк и С. Лагерволл предложили создать однородную ориентацию директора в смектике  $C^*$  за счет влияния поверхности — поверхностно стабилизированный сегнетоэлектрический ЖК (SSFLC) [8–10]. ЖК расположен между двумя параллельными подложками в зазоре, величина которого меньше шага спирали (рис. 5.7). На внутренние поверхности подложек нанесен ориентирующий слой, обеспечивающий расположение директора параллельно подложкам. Смектические слои перпендикулярны подложкам, в то время как ось геликоида параллельна им. Таким образом, поверхность осуществляет раскрутку спирали. Возможны только два направления  $A_1$  и  $A_2$ , лежащие на поверхности конуса и совпадающие с плоскостью подложек. Угол при вершине конуса  $2\theta$ , и потому тот же угол будет между  $A_1$  и  $A_2$ . Эти два направления ориентации могут быть реализованы при приложении постоянного электрического поля перпендикулярно к подложкам.

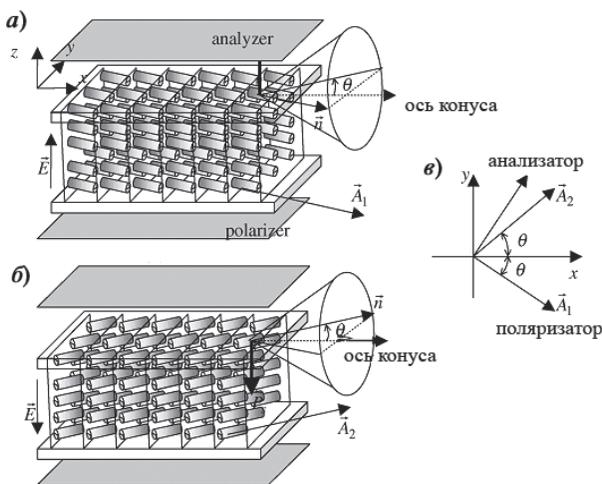


Рис. 5.7. Схема структуры «книжная полка» для дисплея с поверхностно стабилизированным сегнетоэлектрическим ЖК: *a* — директор ориентирован вдоль направления  $\vec{A}_1$ , когда поле направлено вверх; *б* — директор ориентирован вдоль направления  $\vec{A}_2$ , когда поле направлено вниз; *в* — поляризатор и анализатор скрещены, поле дисплея темное

Если поле направлено в сторону  $+z$ , директор ориентируется вдоль  $\vec{A}_1$ , потому что вектор спонтанной поляризации  $\vec{P}_s$  направлен вверх и параллелен полю. Если поле направлено в сторону  $-z$ , директор ориентируется вдоль  $\vec{A}_2$ , потому что вектор спонтанной поляризации  $\vec{P}_s$  направлен вниз. С помощью внешнего поля осуществляется переключение в состояние  $\vec{A}_1$  (или  $\vec{A}_2$ ), которое сохраняется при снятии поля из-за наличия энергетического барьера между этими двумя состояниями. Наличие бистабильности важно для мультиплексного управления дисплеями [2]. На практике возникают трудности в создании бистабильных поверхностно стабилизированных дисплеев большой апертуры, вызванные структурной неоднородностью поверхности.

В SSFLC дисплее поляризатор размещают параллельно одному из стабильных состояний, например,  $\vec{A}_1$ , а анализатор — перпендикулярно. Когда ЖК находится в состоянии  $\vec{A}_1$ , поляризация падающего света параллельна директору и не изменяется при прохождении через ячейку. Когда свет проходит через анализатор, дисплей

темный. Когда ЖК переключается в состояние  $A_2$ , поляризация проходящего света изменяется на угол  $2\theta$  относительно исходного направления директора. Светопропускание дисплея описывается выражением:

$$T = \sin^2(4\theta) \sin^2\left(\frac{1}{2} \frac{2\pi\Delta nd}{\lambda}\right) \quad (5.3)$$

Максимум светопропускания 100% может быть достигнут при  $2\theta = \pi/4$  и  $2\pi\Delta nd/\lambda = \pi$ . Для сегнетоэлектрических ЖК с вектором спонтанной поляризации  $\mathbf{P}_s$  плотность электрической энергии равна  $(\mathbf{E} \cdot \mathbf{P}_s)$ . Характерное значение  $P_s$  составляет  $10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>. При напряженности поля  $10^6$  В/м и направлении  $\mathbf{P}_s$ , параллельном  $\mathbf{E}$ , плотность электрической энергии равна  $10^3$  Дж/м<sup>3</sup>, что значительно выше плотности энергии в электрическом поле для несегнетоэлектрических ЖК. Это является одной из причин уменьшения времени переключения устройств, использующих сегнетоэлектрические ЖК. В случае, если  $P_s = 10^2$  нКл/см<sup>2</sup>,  $E = 1$  В/мкм,  $v = 0,1$  пуаз и  $\theta = 22,5^\circ$ , время переключения примерно равно 10 мкс.

Достоинством устройств на сегнетоэлектрических ЖК является их высокое быстродействие. Наличие бистабильности позволяет обеспечить мультиплексное управление для пассивно-матричных дисплеев. Недостатками устройств, использующих эффект Кларка-Лагерволла, являются сложность обеспечения шкалы серого, однородной ориентации и создания строго определенной толщины зазора.

### 5.3.2. Эффект деформации геликоида

При приложении электрического поля к смектику  $C^*$  может наблюдаться эффект деформации геликоида (DNF) [11, 12]. Для реализации этого эффекта используется ячейка, схема которой приведена на рис. 5.8. Плоскость поляризации света, проходящего через поляризатор P, составляет угол  $\beta$  относительно оси геликоида. Аналитатор и поляризатор скрещены. Слои смектика ориентированы перпендикулярно подложкам и имеют толщину  $d$  существенно большую шага геликоида  $P_0$ . Световой поток с апертурой гораздо большей  $P_0$ , направлен параллельно сегнетоэлектрическим слоям. При приложении электрического поля геликоидальная структура деформируется так, что соответствующая зависимость распределения директора ( $\cos\varphi$ ) от параметра  $2\pi z/P_0$  изменяется симметрично при изменении знака электрического поля  $\pm E$  (рис. 5.9). Это приводит к

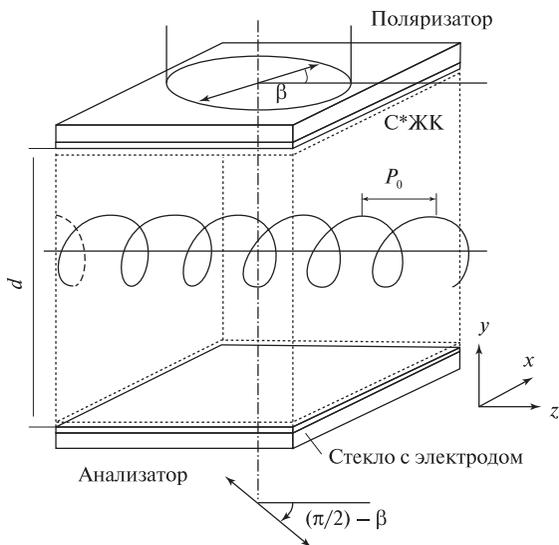


Рис. 5.8. Схема ячейки с эффектом деформации геликоида в СЖК\* (DNF-эффект) [1]

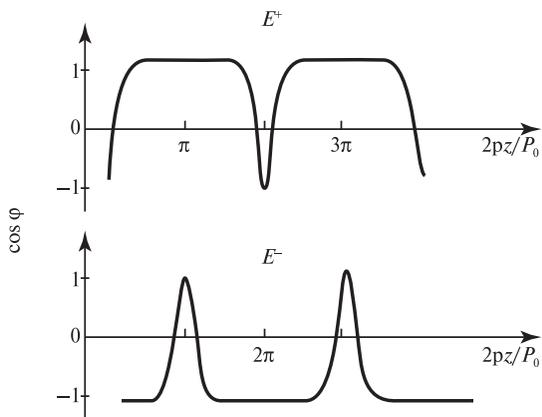


Рис. 5.9. Зависимость распределения директора  $\cos \varphi$  от параметра  $2\pi z/P_0$  при изменении знака электрического поля [1]

изменению эффективного показателя преломления. Эффект наблюдается при увеличении поля вплоть до раскрутки геликоида  $E_u$ :

$$E_u = \frac{\pi^2}{16} \frac{K_{22} q_0^2}{P_s}, \quad (5.4)$$

где  $K_{22}$  — коэффициент упругости при деформации геликоида,  $q_0 = 2\pi z/P_0$ .

Время отклика в эффекте в малых полях  $E/E_u \ll 1$  не зависит от поляризации  $P_s$ , величины поля  $E$  и определяется только вращательной вязкостью  $\nu_\varphi$  и шагом геликоида  $P_0$ .

Эта зависимость действительна для очень малых электрических полей.

Эффект деформации геликоида в СЖК\* был использован в пространственно-временном модуляторе света для обеспечения высокой дифракционной эффективности и высокого пространственного разрешения [13].

### 5.3.3. Электроклиный эффект

Электроклиный эффект (индуцированное изменение угла наклона молекул в смектике  $A$  вблизи фазового перехода в смектик  $C^*$ ) был описан в работах [14, 15]. В отсутствие электрического поля директор перпендикулярен плоскости слоя (рис. 5.10б). Поперечный дипольный момент может ориентировать длинные оси молекул равновероятно в двух направлениях относительно слоя. При уменьшении температуры и ее приближении к фазовому переходу из смектики  $A$  в смектику  $C^*$  возникают нестабильные домены со структурой смектики  $C^*$  [14]. Каждый домен имеет спонтанную поляризацию, однако макроскопическая поляризация равна нулю из-за хаотичного расположения векторов поляризации отдельных доменов.

При приложении электрического поля перпендикулярно ячейке домены стабилизируются, и векторы их поляризации ориентируются параллельно, что отвечает условию минимума энергии. При этом формируется однородная структура смектики  $C^*$  и угол наклона директора становится неравным нулю. Эффект возникновения угла наклона молекул в смектике  $A$ , индуцированного полем, известен как электроклиный эффект. На рис. 5.10а и в показаны ориентации молекул для двух различных направлений электрического поля.

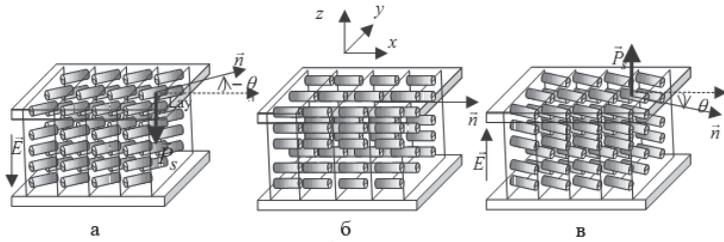


Рис. 5.10. Схема электроклинного эффекта в смектике  $A$

Теория электроклинного эффекта приведена в работах [16, 17]. Плотность свободной энергии в этом случае определяется выражением:

$$F = F_0 + \frac{1}{2}a(T - T_c)\theta^2 + \frac{1}{4}b\theta^3 - cE\theta, \quad (5.5)$$

где  $cE\theta = P_s E$ ,  $T_c$  — температура фазового перехода смектик  $A$ -смектик  $C^*$ .

Угол наклона директора как функция приложенного поля может быть найден из условия минимума свободной энергии:

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = a(T - T_c)\theta + b\theta^3 - cE \equiv 0 \quad (5.6)$$

Когда приложенное поле мало, угол наклона также мал, и членом  $b\theta^3$  в уравнении (5.5) можно пренебречь. Тогда угол наклона будет равен:

$$\theta = \frac{cE}{a(T - T_c)} \quad (5.7)$$

Индукцированный угол  $\theta$  линейно зависит от приложенного поля. Он может достигать величины более  $10^\circ$  при напряженности поля 10 В/мкм для некоторых ЖК. Время отклика для электроклинного эффекта определяется выражением:

$$\tau = \nu/a(T - T_c) \quad (5.8)$$

Экспериментально были достигнуты времена отклика порядка нескольких микросекунд, что является большим достоинством электроклинного эффекта. Это позволило успешно использовать его в быстродействующих электрооптических модуляторах (до частоты 2 МГц), цветных фильтрах для ТВ камер, быстрых затворах

с высоким пространственным разрешением. Для примера, оптически адресуемые пространственно-временные модуляторы света, основанные на электроклинном эффекте, имеют быстродействие в 10–100 раз большее, чем эффект Кларка-Лагерволла. Электроклинный эффект позволяет создать широкий ряд модуляторов света с линейной шкалой серого. Недостатками этого эффекта являются сильная температурная зависимость и малая глубина модуляции [1].

#### **5.4. Эффекты в полимерных жидкокристаллических композитах**

В гребнеобразных полимерных ЖК в электрическом поле наблюдаются переходы Фредерикса [1] и управляемое светорассеяние [18]. Из-за наличия более высокой величины вязкости по сравнению с низкомолекулярными ЖК эти электрооптические эффекты не находят применения в модуляторах. Полимерные ЖК используются как регистрирующие среды с эффектом памяти для отображения статической информации [19].

Более широкое применение находят полимерные жидкокристаллические композиты, используемые в дисплеях, световых затворах, устройствах телекоммуникации, волоконно-оптических линиях связи, различных модуляторах и в качестве регистрирующих сред [2, 20–25]. Они содержат низкомолекулярные ЖК и полимеры, разделенные по фазе. В зависимости от структуры различают ЖК, диспергированные в полимере (PDLCs), и ЖК, стабилизированные полимером (PSLCs). В PDLC ЖК образует капли микронного и субмикронного размера, диспергированные в полимерной матрице. Полимер представляет собой непрерывную среду, а капли ЖК изолированы друг от друга (рис. 5.11а). В PSLC полимер имеет структуру, подобную губке, а ЖК является непрерывной средой. Концентрация ЖК в этом случае значительно выше, чем полимера (рис. 5.11б).

В этих материалах наблюдаются два типа электрооптических эффектов: управляемое полем светорассеяние, вызываемое формированием полидоменной структуры ЖК, размер доменов которой сопоставим с длиной волны света, и управляемое светорассеяние ориентированной в одном направлении структуры ЖК.

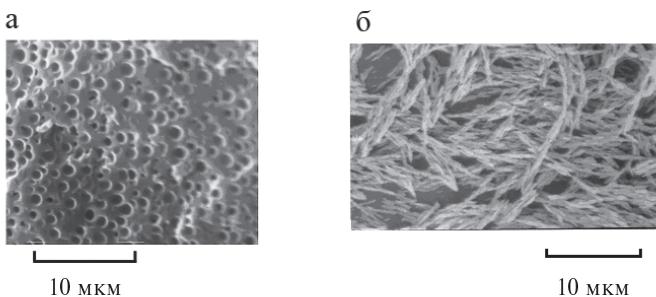


Рис. 5.11. Изображение структур, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа после удаления ЖК: а — PDLC, темные кружки соответствуют каплям ЖК; б — PSLC [2]

#### 5.4.1. Жидкие кристаллы, диспергированные в полимере

В PDLC могут быть диспергированы различные типы ЖК: нематики, холестерики, смектики *A* и *C* [23]. Чаще всего используют диспергированные НЖК. Конфигурация директора внутри капли нематика определяется ее размером, формой, энергией сцепления с поверхностью, величиной приложенного поля и упругими константами ЖК. Различают четыре типа капель нематика с различной ориентацией директора (рис. 5.12). Когда условия сцепления таковы, что ориентация молекул осуществляется по касательной к поверхности капли, то формируются или биполярные (рис. 5.12а), или тороидальные (рис. 5.12б) капли [20]. Когда ориентация перпендикулярна к поверхности капли, то формируются или радиальные (рис. 5.12в), или аксиальные (рис. 5.12г) капли [26].

В устройствах на основе PDLC используются два случая ориентации ЖК в каплях. В отсутствие поля директор в каждой из капель ориентирован случайным образом, при этом достигается минимум суммы упругой и поверхностной энергии. При приложении поля директор в капле ориентирован однородно вдоль поля для всех ранее рассмотренных капель. Управляющее напряжение зависит от размера капель ( $D$ ). Плотность свободной упругой энергии пропорционально  $K(1/D)^2$ , а полная упругая энергия пропорциональна  $KD$ , где  $K$  — коэффициент упругости. Плотность поверхностной энергии пропорциональна энергии сцепления  $W$ . Полная свободная по-

верхностная энергия пропорциональна  $(D/d_e)DK$ , где экстраполяционная длина равна  $d_e = K/W$ . Общая электрическая энергия капли пропорциональна произведению  $\Delta\epsilon E^2 D^3$ . В зависимости от размера капли и энергии сцепления возможны три случая [2].

$D \gg d_e$ , что соответствует большой капле или большой энергии сцепления. В этом случае пороговое поле определяется выражением:

$$E_c = \left( \frac{a_{\text{упр}}}{a_{\text{элект}} \Delta\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{D} \propto \frac{1}{D}, \quad (5.9)$$

где  $a_{\text{упр}}$  и  $a_{\text{элект}}$  — константы.

$D \ll d_e$ , что соответствует малой капле или малой энергии сцепления.

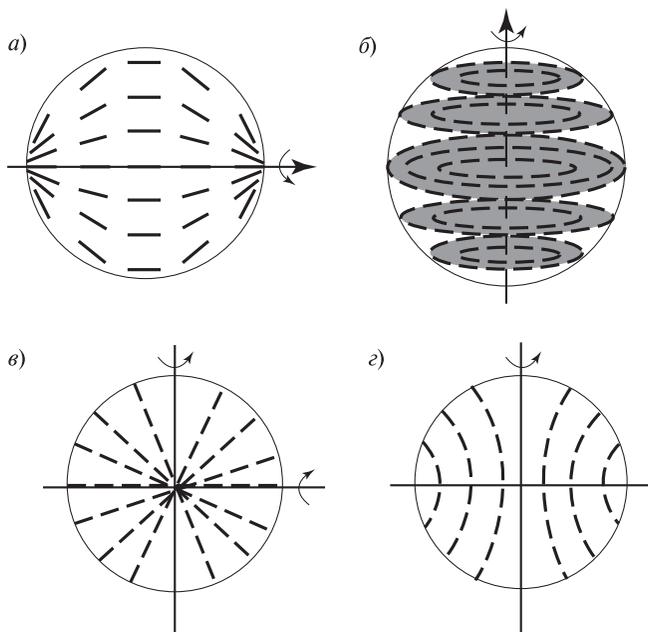


Рис. 5.12. Расположение директора ЖК в каплях в PDLCs:  
 а — биполярные; б — тороидальные; в — радиальные;  
 г — аксиальные капли

$$E_c = \left( \frac{a_{\text{пов}} W}{a_{\text{элект}} \Delta \varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{D}} \propto \frac{1}{D}, \quad (5.10)$$

где  $a_{\text{пов}}$  — константа.

$D \sim d_e$  что соответствует каплям среднего размера и средней энергии сцепления.

$$E_c = \left( \frac{a_{\text{упр}}}{a_{\text{элект}} \Delta \varepsilon} \frac{1}{D^2} + \frac{a_{\text{пов}} W}{a_{\text{элект}} \Delta \varepsilon} \frac{1}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.11)$$

Выражения (5.9–5.11) позволяют по величине порогового поля определять размеры капель и энергию сцепления. На рис. 5.13. показаны зависимости управляющего напряжения от размера капель для PDLC с большой энергией сцепления (а) и с малой энергией сцепления (б). Для PDLC с большой энергией сцепления управляющие напряжения обычно выше, чем в случае меньшей энергии сцепления.

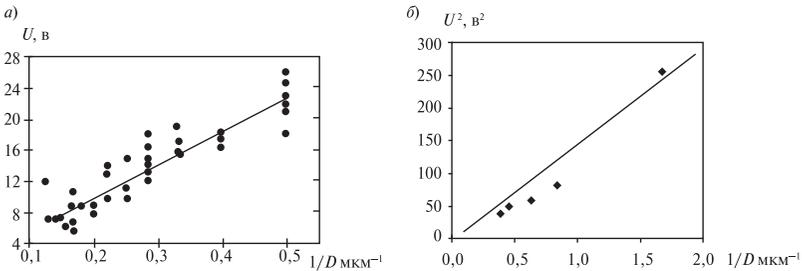


Рис. 5.13. Зависимость управляющего напряжения для PDLC с большой энергией сцепления от размера капель (толщина ячейки 13 мкм, ЖК—ZL12061 фирмы Merck) — а; зависимость квадрата управляющего напряжения для PDLC с малой энергией сцепления от размера капель (толщина ячейки 12 мкм, ЖК—E7 фирмы Merck) — б [2]

Рассмотрим характер прохождения света через PDLC. В отсутствии поля направления ориентации директора в разных каплях различны (рис. 5.14а). В случае нормального падения линейно поляризованного света для биполярных капель, в которых направление директора составляет угол  $\theta$  с нормалью к ячейке, показатель преломления ЖК примерно равен:

$$n(\theta) = \frac{n_{\parallel} n_{\perp}}{(n_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + n_{\perp}^2 \sin^2 \theta)^{1/2}} \quad (5.12)$$

Изотропный полимер выбирается с коэффициентом преломления  $n_p$ , совпадающим с  $n_{\perp}$  ЖК. Для проходящего света полимер и ЖК имеют разные показатели преломления, вследствие чего он интенсивно рассеивается. При приложении достаточно высокого поля, перпендикулярного к слою PDLC, в случае  $\Delta\epsilon > 0$  происходит ориентация директора вдоль поля, и угол  $\theta$  для всех капель становится равным нулю (рис. 5.14б).

Тогда показатель преломления ЖК становится равным  $n_{\parallel}$  и совпадает с показателем преломления полимера, и среда становится прозрачной. Типичная кривая пропускания PDLC показана на рис. 5.15 [27].

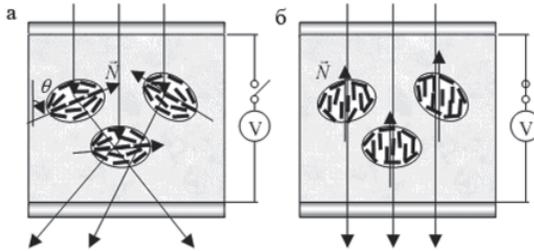


Рис. 5.14. Ориентация ЖК в капле PDLC в отсутствие поля (а) и при приложении (б) [27]

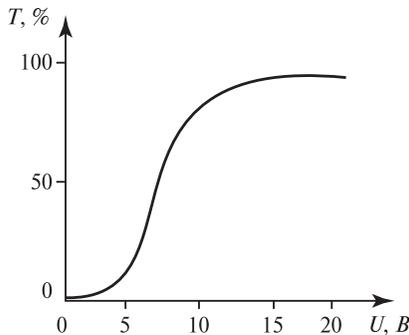


Рис. 5.15. Типичная зависимость светопропускания PDLC от приложенного напряжения [27]

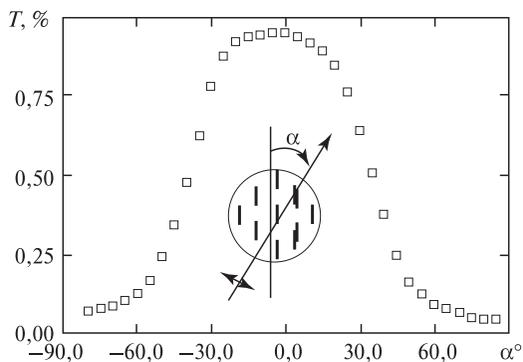
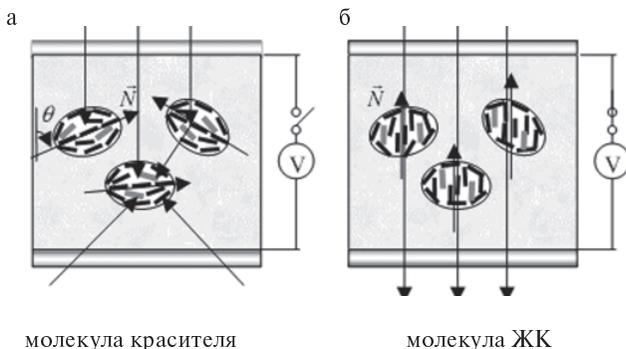


Рис. 5.16. Зависимость пропускания поляризованного света от угла падения

В случае наклонного падения поляризованного света показатель преломления ЖК отличается от  $n_{\perp}$  и не равен показателю преломления полимера, что вызывает рассеяние света. С увеличением угла наклона падающего света интенсивность светорассеяния возрастает. Зависимость пропускания поляризованного света от угла падения  $\alpha$  показана на рис. 5.16. При угле падения  $30^{\circ}$  пропускание света уменьшается вдвое.

В PDLC могут быть внедрены молекулы дихроичных красителей. Они должны иметь вытянутую форму и хорошую растворимость в ЖК.



молекула красителя

молекула ЖК

Рис. 5.17. PDLC с молекулами дихроичного красителя: *a* — режим поглощения; *b* — прозрачное состояние

Молекулы красителя находятся внутри капель, и могут переориентироваться вместе с ЖК. Используемые красители должны иметь поглощающий диполь, расположенный параллельно длинной оси молекул. Когда поляризация падающего света параллельна длинной оси молекул, происходит поглощение света. При поляризации перпендикулярной длинной оси, поглощение отсутствует. В отсутствие поля молекулы ориентированы хаотично внутри капель, как показано на рис. 5.17а и капли ориентированы во всех направлениях, падающий неполяризованный свет будет поглощаться. В электрическом поле молекулы красителя и ЖК ориентированы вдоль нормали к ячейке, как показано на рис. 5.17б. Они всегда перпендикулярны к поляризации нормально падающего света. Поэтому в идеале свет проходит через ячейку без поглощения. На практике имеется некоторое поглощение, вызываемое тепловыми флуктуациями молекул красителя и влиянием сцепления с искривленной поверхностью капли.

Поскольку дисплеи на основе PDLC не нуждаются в использовании поляризаторов, то получаемое изображение имеет высокую яркость, особенно при использовании объективов с большим относительным отверстием. В случае объективов с малым относительным отверстием достигается высокий контраст в изображении. Для практики необходим компромисс между яркостью и контрастом, который обеспечивается при высокой эффективности светорассеяния. Он достигается при оптимальных размерах рассеивающих центров и существенном различии главных показателей преломления ЖКМ и полимера. Если на низкомолекулярных ЖКМ дисплеи работают при напряжениях до 5В, то PDLC требуют напряжения до 10 В. Гистерезис в PDLC не должен превышать 0,1 В, чтобы тот же уровень серого достигался независимо от предшествующего значения напряжения на элементе.

#### ***5.4.2. ЖК, стабилизированные полимером***

Структура, свойства, методы изготовления и области применения жидких кристаллов, стабилизированных полимером, подробно изложены в обзоре [28]. В PSLC концентрация полимера обычно менее 10%. В качестве мономера используется мезоген с жесткими фрагментами, сходными с молекулами низкомолекулярного ЖК [21]. Перед полимеризацией смесь мономера и ЖК находится в жидкокристаллическом состоянии. Полимерная среда является анизотроп-

ной благодаря ориентирующему действию ЖК на мономер и анизотропной диффузии мономера в ЖК. Обычно в процессе полимеризации формируются анизотропные, подобные нитям, полимерные сети. В однородной смеси ЖК и мономера в жидкокристаллической фазе в процессе полимеризации при воздействии внешних полей и задании различной ориентации на поверхности получают разнообразные структуры полимерных сетей. После полимеризации полимерные сети стремятся стабилизировать состояние, в котором они сформированы. В PSLC вблизи полимерных сетей ЖК ориентированы вдоль них. Взаимодействие ЖК с полимерной сетью пропорционально площади поверхности полимерной сети, которая может быть увеличена повышением концентрации полимера или уменьшением размеров латеральных фрагментов полимерной сети. PSLC могут содержать как нематические, так и холестерические жидкие кристаллы.

При создании PSLC используются НЖК с планарной и гомеотропной ориентацией. Для получения PSLC с планарной ориентацией в ячейку, обеспечивающую гомогенную ориентацию НЖК, помещают смесь ЖК мономера и НЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  и подвергают ее фотополимеризации. В результате процесса фазового разделения в ячейке формируются полимерные нити, параллельные поверхностям ячейки. На рис. 5.18 приведена схема PSLC с планарной ориентацией нематика, в котором использован диакриловый ЖК мономер [21, 29]. В отсутствие поля свет проходит через PSLC без рассеяния, поскольку показатели преломления полимера и НЖК равны (рис. 5.18а).

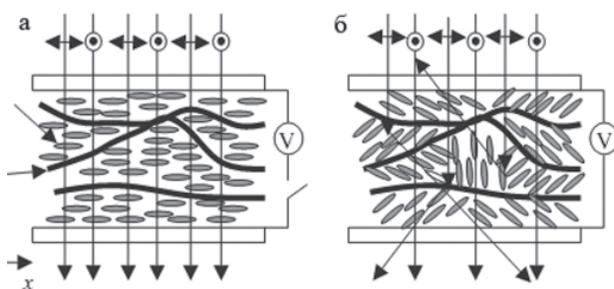


Рис. 5.18. Схема работы стабилизированного полимером гомогенно ориентированного нематика: а — без поля, структура прозрачна; б — поле включено, структура рассеивает свет

При приложении поля молекулы НЖК стремятся ориентироваться вдоль оси  $z$ , в то время как полимерные нити сохраняют направление вдоль оси  $x$ . В результате противоборства этих факторов возникает мультимоменная структура, вызывающая интенсивное рассеяние света, поляризованного вдоль оси  $x$  (рис. 5.18б). Свет, поляризованный вдоль оси  $y$ , проходит без рассеяния.

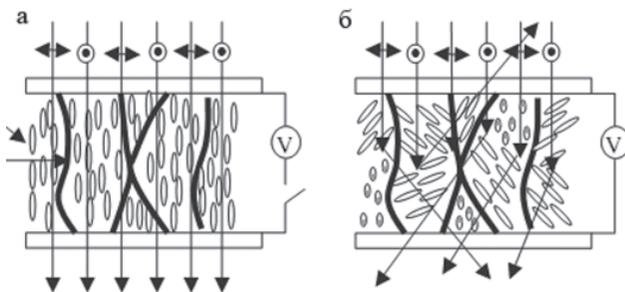


Рис. 5.19. Схема работы стабилизированного полимером гомеотропно ориентированного нематика: а — без поля, структура прозрачна; б — поле включено, структура рассеивает свет

PSLC с гомеотропной ориентацией нематика рассмотрен в работе [30]. Смесь содержит НЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией и малое количество диакрилового ЖК мономера. Ячейка освещалась УФ светом для фотополимеризации в гомеотропно ориентированном состоянии. В результате сформированные полимерные нити ориентировались перпендикулярно поверхности подложек ячейки. В отсутствии поля НЖК в ячейке однородно ориентирован гомеотропно (рис. 5.19а), и свет проходит через ячейку без рассеяния. При приложении поля молекулы НЖК стремятся ориентироваться горизонтально, поскольку  $\Delta\epsilon < 0$ , в то время как полимерные нити сохраняют направление вдоль оси  $z$ . В результате возникает мультимоменная структура, вызывающая интенсивное рассеяние двух компонент поляризованного света (рис. 5.19б) в отличие от PSLC с планарной ориентацией нематика.

Стабилизированные полимером холестерические текстуры (PSCT) представляют собой смесь ХЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  и малого количества мономера [21, 31]. Далее рассматриваются две различные исходные структуры PSCT. На рис. 5.20 приведена структура, называемая нормальной модой [2]. Шаг холестерика составляет несколько микрон (от 0,5 до 5 мкм); специальной обработки поверхностей ячейки не

требуется. Смесь полимеризуется во внешнем электрическом поле, и полимерные нити выстраиваются по нормали к поверхностям ячейки (рис. 5.20а). В отсутствие электрического поля холестерик стремится сохранить геликоидальную текстуру, а полимерные нити ориентируют директор вдоль по нормали к поверхностям ячейки. В результате формируется конфокальная текстура (рис. 5.20а), интенсивно рассеивающая свет. При приложении электрического поля геликоидальная текстура раскручивается, молекулы ориентируются гомеотропно, и ячейка становится прозрачной (рис. 5.20б).

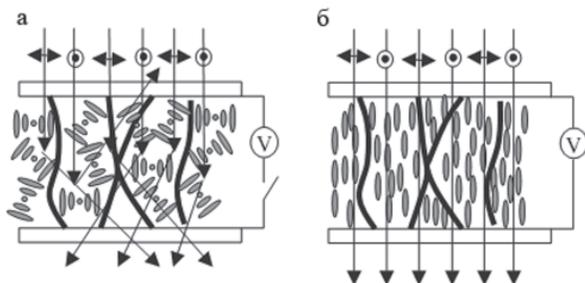


Рис. 5.20. Схема работы стабилизированного полимером холестерика (PSCТ, нормальная мода): а — без поля, структура рассеивает свет; б — поле включено, структура прозрачна

На рис. 5.21 приведена планарная структура [2]. Шаг холестерика составляет несколько микрон (от 3 до 15 мкм),  $\Delta\epsilon > 0$ . В результате полимеризации мономер приобретает планарную текстуру, в которой полимерные нити параллельны поверхности ячейки [21, 31]. В отсутствие поля планарная структура прозрачна (рис. 5.21а).

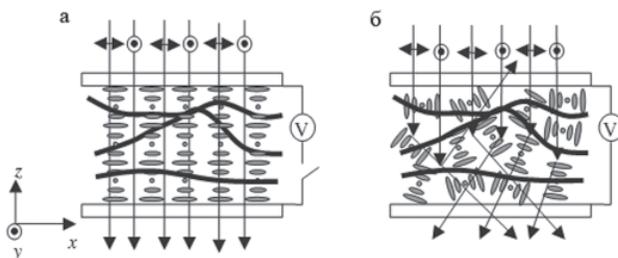


Рис. 5.21. Схема работы стабилизированного полимером холестерика (PSCТ, планарная структура): а — без поля, структура прозрачна; б — поле включено, структура рассеивает свет

При приложении поля за счет противоборства влияния поля и полимерных нитей возникает полидоменная конфокальная структура, которая интенсивно рассеивает свет (рис. 5.21б).

Рассмотренные электрооптические эффекты в полимерных ЖК композитах находят применение в дисплеях, световых модуляторах, шторках, адаптивных линзах и перестраиваемых голографических решетках [2, 28].

### Литература к главе 5

1. *Blinov L.M., Chigrinov V.G.* Electrooptic effects in liquid crystal materials. Springer. 1996. 464 p.
2. *Yang D.-K., Wu S.-T.* Fundamentals of Liquid Crystal Devices. John Wiley & Sons. 2006. 387 p.
3. *Khoо I.-C.* Liquid crystals. John Wiley & Sons. 2007. 383 p.
4. *Pelzl G., Schiller P., Demus D.* // *Liq.Cryst.* 1987. Vol. 2. P. 131.
5. *Чирков В.Н., Алиев Д.Ф., Раджабов Г.М., Зейналлы А.Х.* ЭГДН и анизотропия электропроводности в смектической А фазе ЖК // ЖЭТФ. 1978. Т.74. Вып. 5. С. 1822–1828.
6. *Чирков В.Н., Алиев Д.Ф., Зейналлы А.Х.* Электрически обратимый эффект «памяти» в СЖК // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т.3. № 19. С. 1016–1019.
7. *Каретников А.А., Томилин М.Г., Чирков В.Н.* Индикатрисы электрически управляемого светорассеяния в смектической А фазе ЖК // ЖТФ. 1985. № 55. Вып. 11. С. 2253–2255.
8. *Clark N. A., Lagerwall S.T.* Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals // *Appl. Phys. Lett.* 1980. Vol. 36, P. 899.
9. *Lagerwall S.T.* Ferroelectric and antiferroelectric LCs. Wiley-VCH. 1999. 445 p.
10. *Musevich I., Blink R., Zek B.* The physics of ferroelectric and antiferroelectric LCs. World Scientific. 2000. 680 p.
11. *Береснев Л.А., Блинов Л.М., Дергачев Д.И., Кондратьев С.Б.* Электрооптический эффект в С\*ЖК с малым шагом геликоида и высокой величиной спонтанной поляризации // Письма в ЖЭТФ. 1987. №46. С. 328–330.
12. *Beresnev L.A., Chigrinov V.G., Dergachev D.I., Pozhidaev E.P., Fuenschilling J., Schadt M.* Deformed helix FLC: a new electrooptic mode in FChLCs // *Liquid Crystals.* 1989. Vol. 5. P. 1171–1177
13. *Wick D.V., Martines T., Wood M.V., Wilkes J.M., Gruneisen M.T., Berenberg V.A., Vasil'ev M.V., Onokhov A.P., Beresnev L.A.* Deformed-helix FLC spatial light modulator that demonstrates high diffraction efficiency and 370-line pairs/mm resolution // *Appl. Opt.* 1999. Vol. 38. No 17/10. P. 3798–03.

14. *Garoff S., Meyer R. F.* Electroclinic effect at the A-C phase change of a chiral smectic liquid crystal // *Phys. Rev. Lett.*, 1977. Vol.38. P. 848; *Phys. Rev. A.*, 1979. Vol. 19. P. 388.
15. *Andersen G., Dahl I., Komitov L., Lagerwall S.T., Skarp K., Stebler W.* Device physics of soft mode (electroclinic) effect // *Journ. Appl. Phys.* 1989. Vol. 66. P. 4983.
16. *Goodby J. W., Blinc R., Clark N. A., Lagerwall S. T., Osipov M. A., Pikin S. A., Sakurai T., Yoshino K., Zeksv B.* Ferroelectric liquid crystals: principles, properties and applications. Ferroelectricity and related phenomena. Gordon and Breach, Amsterdam. 1991. Vol. 7.
17. *Pikin S.A.* Structural transformations in LCs. Gordon and Breach, New York. 1991.
18. *Томилини М.Г.* Взаимодействие ЖК с поверхностью. СПб. Политехника. 2001. 325 с.
19. *Шубаев В.П., Бобровский А.Ю., Бойко Н.И.* Светоуправляемые многофункциональные ЖК полимеры // *Высокомолекулярные соединения*. Сер. С. 2000. Т. 42. № 12. С. 2205–2234.
20. *Drzaic P.S.* Liquid crystal dispersions. World Scientific. Singapore. 1995. 400 p.
21. *Crawford G.P., Zumer S.* Liquid crystals in complex geometries. London. Taylor & Francis. 1996.
22. *Doane J.W.* Polymer dispersed liquid crystal displays // in *Liquid crystals applications and uses*. 1990. Vol. 1. Chapter 14. Ed. B. Bahadur. World Scientific, Singapore.
23. *Kitzerow H.-S.* Polymer-dispersed liquid crystals, from the nematic curvilinear aligned phase to ferroelectric films. *Liq. Cryst.* 1994. Vol. 16. P. 1.
24. *Crawford G. P., Doane J.W., Zumer S.* Polymer dispersed liquid crystals: nematic droplets and related systems // in *Handbook of liquid crystal research*. Chapter 9. Ed. P.J. Collings and J.S. Patel. Oxford University Press. N.- Y. 1997.
25. *Жаркова Г.М., Сонин А.С.* Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: ВО Наука. 1994. 214 с.
26. *Erdmann J.H., Zumer S., Doane J.W.* Configuration transition in a nematic liquid crystal confined to a small cavity // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Vol. 64. P. 1907.
27. *Doane J.W., Vaz N.A, Wu B. -G., Zumer S.* Field controlled light scattering from nematic microdroplets // *Appl. Phys. Lett.* 1996. № 48. P. 269.
28. *Sonin A.S., Churochkina N.A.* Liquid crystals stabilized by polymer networks // *Polymer Sci. Ser. A.* 2010. Vol. 52. № 5. P. 463–482.
29. *Himket R.A.M., Boots H.M.J.* Domain structure and switching behavior of anisotropic gels // *Phys. Rev. E.* 1995. Vol. 51. P. 5824.
30. *Himket R.A.M.* Electrically induced light scattering from anisotropic gels with negative dielectric anisotropy // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1992. Vol. 213. P. 117.
31. *Yang D.-K., Chien L.C., J.W. Doane.* Cholesteric liquid crystal/polymer gel dispersion for haze-free light shutter // *Appl. Phys. Lett.* 1992. Vol. 60. P. 3102.

## Глава 6

### НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Оптическая нелинейность возникает при большой интенсивности излучения в веществах, физические свойства которых изменяются под действием этого излучения. К оптиически нелинейным материалам, физические свойства которых существенно изменяются под воздействием оптического поля, относятся и жидкие кристаллы [1–4]. Поляризованный свет от лазерного источника может вызывать ориентацию или упорядоченность в изотропной фазе, а также переориентацию молекул в упорядоченной фазе. Это приводит к изменению показателя преломления. При воздействии лазерного излучения изменения показателя преломления могут также вызываться изменением температуры ( $\Delta T$ ) и плотности ( $\Delta \rho$ ). Большие изменения плотности и температуры могут вызывать переориентацию директора [5, 6]. Поскольку  $\Delta \epsilon$  ЖК существует и в диапазоне оптических частот, эффект переориентации молекул ЖК наблюдается и в поле достаточно слабой световой волны, что было подтверждено во многих работах, начиная с [7, 8]. Указанный эффект проявляет себя при плотности мощности излучения (интенсивности) порядка долей или единиц Вт/см<sup>2</sup>, и величина его растет линейно пропорционально интенсивности возбуждающего излучения. Время установления эффекта составляет доли секунды или секунды. Он представляет собой типичный кубический нелинейно-оптический эффект, во многом сходный с уже известным ко времени его открытия эффектом ориентационной нелинейности. Эффект наблюдается в жидкостях с анизотропными молекулами, например, в CS<sub>2</sub> [9] или в изотропной фазе ЖК.

## 6.1. Гигантская оптическая нелинейность в жидких кристаллах

Оптическая нелинейность может возникать как в нематиках [10], так и в холестериках [11] и смектиках [12]. До сих пор основные исследования этого эффекта и возможностей его применения проводились в основном в нематиках. В обзорах [13, 14] дано развернутое изложение теории эффекта и экспериментальных результатов. Сам эффект получил название гигантской оптической нелинейности ЖК, т. к. на момент его обнаружения величина соответствующей нелинейности на 8–9 порядков превосходила все известные до того величины оптической нелинейности.

В нематической фазе переориентация директора, индуцированная полем, является следствием минимизации свободной энергии. Общее выражение для свободной энергии системы включает упругую энергию  $F_d$  и энергию ЖК в электрическом поле  $F_{op}$ , которые соответственно равны:

$$F_d = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\vec{n} \times \nabla \times \vec{n}), \quad (6.1)$$

$$F_{op} = -\frac{1}{4\pi} \int \vec{D} \cdot d\vec{E} = -\frac{\varepsilon_{\perp}}{8\pi} E^2 - \frac{\Delta\varepsilon \langle (\vec{n} \vec{E})^2 \rangle}{8\pi}, \quad (6.2)$$

где скобки  $\langle \rangle$  означают усреднение по времени.

Если оптическое поле является плоской волной ( $\vec{E}_{op} = p|E|\cos(\omega t - kz)$ , где  $p$  — единичный вектор вдоль направления поляризации),

тогда  $\langle E_{op}^2 \rangle = \frac{|E|^2}{2}$ . Первый член правой части уравнения (6.2) не за-

висит от ориентации директора, и потому его можно не учитывать при рассмотрении процессов переориентации. Второй член при условии  $\Delta\varepsilon > 0$  означает, что директор ориентируется вдоль поляризации оптического поля. По аналогии с порогом упругости оптический порог определяется выражением:

$$m_{op} = \Delta\varepsilon/4\pi \langle (\vec{n} \cdot \vec{E})(\vec{n} \times \vec{E}) \rangle \quad (6.3)$$

Рассмотрим случай, когда линейно поляризованный свет от лазера падает на гомеотропно ориентированный слой НЖК (рис. 6.1). Волновой вектор  $\mathbf{K}$  составляет угол  $(\beta + \theta)$  с измененным направлением директора, где  $\theta$  — угол переориентации. Если угол  $\theta$  мал, то

учитывается только один модуль упругости  $K_{11}$ . Из условия минимума свободной энергии в случае жесткого сцепления НЖК с поверхностями ячейки находят угол  $\theta$  [3]:

$$\theta = (1/4\xi^2) \sin 2\beta(dz - z^2), \quad (6.4)$$

где  $\xi^2 = 4\pi K_{11} / [\Delta\epsilon \langle E_{\text{оп}}^2 \rangle]$ .

Распределение директора НЖК при воздействии лазерного излучения показано на рис. 6.2.

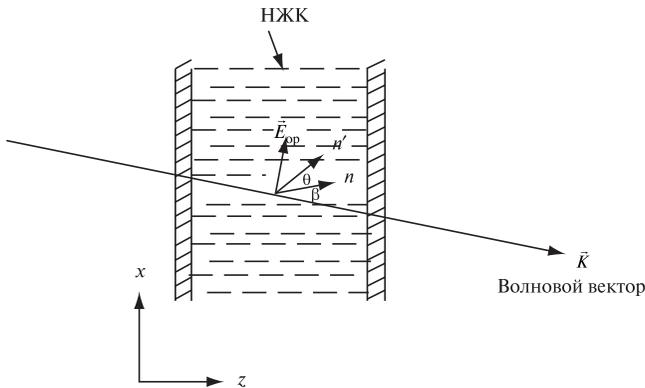


Рис. 6.1. Взаимодействие линейно поляризованного света (необыкновенный луч) с гомеотропно ориентированным НЖК

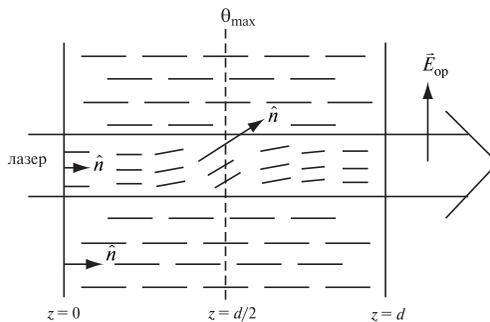


Рис. 6.2. Переориентация директора в слое жидкого кристалла под действием лазерного излучения

В результате переориентации директора при прохождении лазерного излучения показатель преломления необыкновенного луча в направлении  $z$  изменяется на величину  $\Delta n$ :

$$\Delta n = n_e(\beta + \theta) - n_e(\beta), \quad (6.5)$$

где

$$n_e(\beta + \theta) = \frac{n_{\parallel} n_{\perp}}{\left[ n_{\parallel}^2 \cos^2(\beta + \theta) + n_{\perp}^2 \sin^2(\beta + \theta) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (6.6)$$

Для малых  $\theta$  изменение показателя преломления  $\Delta n$  пропорционально квадрату напряженности оптического электрического поля:

$$\Delta n = n_2(z) \langle E_{\text{оп}}^2 \rangle \quad (6.7)$$

или

$$\Delta n = \alpha_2(z) I, \quad (6.8)$$

где

$$\alpha_2(z) = \frac{(\Delta \epsilon)^2 \sin^2(2\beta)}{4Kc} (dz - z^2) \quad (6.9)$$

При усреднении по толщине образца ( $dz - z^2$ ) равен  $d^2/6$ . Для слоя толщиной 100 мкм,  $\Delta \epsilon \sim 0,6$ ,  $K = 10^{-6}$  и  $\beta = 45^\circ$ , величина оптической нелинейности  $\alpha_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{Вт}$ . Этот нелинейный коэффициент примерно на восемь порядков больше, чем для  $\text{CS}_2$ .

Введение красителей в НЖК существенно увеличивает величину оптической нелинейности (до  $6 \text{ см}^2/\text{Вт}$ ) [3, 15–18]. При добавлении в нематик красителя метилового нелинейный отклик может быть увеличен при приложении низкочастотного электрического поля. С другой стороны высокочастотное поле ослабляет эффекты переориентации. Использование полей с частотами 300 Гц и 30 кГц и напряжении 20 В позволило получить времена включения и выключения соответственно 12 мс и 17 мс.

Авторы работ [18, 19] наблюдали при воздействии излучения *транс-цис*-изоморфизм в красителях и органических материалах, например, в азобензине. В невозбужденном состоянии молекулы, содержащие азо-группу, обладают *транс*-формой, а в возбужденном — *цис*-формой. *Цис-транс*-переходы в НЖК, содержащем компоненты азобензина, изменяют показатель преломления нематика,

что является эффективным механизмом создания большой оптической нелинейности. *Транс-цис*-переход осуществляется за наносекунды, и оптическая нелинейность возникает также быстро [19].

Нелинейный эффект, создаваемый оптическим излучением, можно усилить приложением к слою НЖК низкочастотного или постоянного электрического поля. Постоянное поле вызывает гидродинамическую неустойчивость, обусловленную анизотропией проводимости и приводящую к переориентации директора. Два когерентных луча, интерферирующих друг с другом, создают дифракционную решетку и благодаря светоиндуцированной анизотропии проводимости создают распределение плотности пространственных зарядов. Поле этих зарядов совместно с приложенным постоянным полем вызывают изменение показателя преломления. Процесс фотоиндуцированной генерации зарядов, создание областей пространственных зарядов и изменения показателя преломления аналогичен фоторефрактивному эффекту, наблюдаемому в электрооптических материалах. В этих материалах  $\Delta n$  имеет линейную зависимость от суммарного электрического поля [20], а в НЖК имеет место квадратичная зависимость. Совместное воздействие постоянного поля и поля пространственных зарядов увеличивает эффект переориентации директора.

Преимуществом НЖК как фоторефрактивного материала является малая величина напряженности поля ( $\sim 100$  В/см) по сравнению с полимерными и неорганическими кристаллами (несколько тысяч В/см) и большие значения коэффициента оптической нелинейности ( $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/Вт в зависимости от добавки) [21].

Основные физические процессы, индуцированные лазерным излучением в ХЖК и СЖК, определяющие переориентацию молекул, аналогичны процессам в нематической фазе. Наблюдаемые отличия вызваны различием их структуры и физических характеристик [3, 22, 23].

Далее рассматриваются основные нелинейные эффекты в жидких кристаллах.

## 6.2. Самофокусировка света

В случае распространения световой волны в НЖК показатель преломления среды изменяется в том месте, где напряженность электромагнитного поля достаточно велика. Если показатель преломления возрастает, то может произойти самозахват световой волны. При

самофокусировке увеличение показателя преломления в центре светового пучка ведет к линзовому эффекту и подавляет дифракционную расходимость. Изменение показателя преломления  $n_e$  ЖК при воздействии лазерного излучения приводит при определенной геометрии эксперимента к самофокусировке излучения, что позволяет управлять интенсивностью проходящего света. Это явление приводит к оптическому ограничению (фазовой самомодуляции, самовоздействию), которое может быть использовано для защиты глаз наблюдателя или светоприемника от слепящих источников. На рис. 6.3 приведена схема установки для получения оптического ограничения лазерного излучения, основанного на эффекте самодефокусировки. Линейно поляризованный лазерный луч фокусируется линзой с фокусным расстоянием 15 см в точку диаметром 0,1 мм на слой НЖК толщиной 25 мкм. Слой НЖК наклонен для увеличения изменения показателя преломления необыкновенного луча. Диафрагма диаметром 5 мм расположена на расстоянии 40 см за ЖК ячейкой. При мощности падающего излучения порядка 70 нВт в центре пучка наблюдается резкое ослабление интенсивности (а); при увеличении интенсивности до 100 нВт распределение интенсивности прошедшего излучения изменяется (б). Лазерное излучение с гауссовым профилем интенсивности вызывает соответствующий гауссовый профиль ориентации директора, что приводит к фазовой задержке

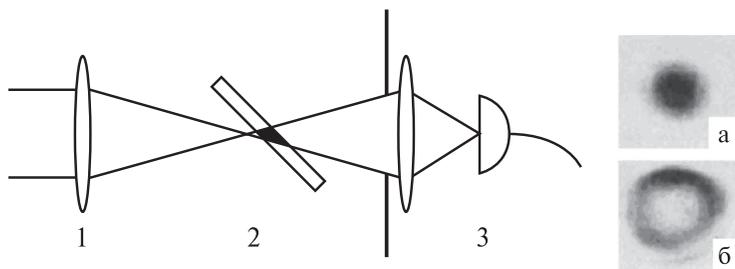


Рис. 6.3. Экспериментальная установка для получения оптического ограничения лазерного излучения на эффекте самодефокусировки в ЖК: 1 — линза; 2 — ЖКЯ; 3 — приемник. Распределение интенсивности прошедшего излучения, регистрируемого приемником, показано на фотографиях при различной мощности падающего излучения: а — менее 70 нВт; б — выше 100 нВт [3]

(как в линзе) фронта волны лазерного излучения. В результате наблюдается эффект дефокусировки, приводящий к оптическому ограничению. В дальней зоне дифракции вследствие дефокусировки возникает кольцевая структура, состоящая из светлых и темных колец.

В работе [24] показана возможность улучшения динамики оптического ограничения при использовании твистовой ячейки, содержащей НЖК с красителем, помещенной между двумя поляризаторами. Достигнуты времена оптического ограничения порядка микросекунд и уменьшение интенсивности в 3000 раз. Явление оптического ограничения может использоваться для защиты от других слепящих источников: Солнца, сварочной дуги и лазерного излучения.

### 6.3. Распространение солитонов в НЖК

Световой импульс является примером уединенной волны. В среде, обладающей дисперсией, наблюдается дисперсионное уширение этого импульса. В нелинейной среде уединенные волны не испытывают дисперсионного уширения и упруго взаимодействуют, то есть сохраняют свою форму после столкновения и прохождения друг сквозь друга. Такая уединенная волна получила название солитон.

На рис. 6.4 показана экспериментальная установка, позволившая впервые получить пространственный солитон в ориентированном нематике при нелинейной переориентации директора [25]. Ячейка содержит планарно ориентированный НЖК (E7), заключенный между двумя прозрачными электродами, к которым приложено постоянное напряжение. Когда поле превышает порог Фредерикса, директор поворачивается на угол  $\theta_0$ , облегчая дальнейшую переориентацию директора на угол  $\theta$  при воздействии светового поля. Поляризованное излучение от лазера падает параллельно подложкам.

Для данного случая переориентация директора в неоднородной среде при воздействии световой волны описывается уравнением, подобным уравнению Шредингера:

$$2ik \frac{\partial A}{\partial z} + \left[ \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right] + k_0^2 \Delta \epsilon (\sin^2 \theta - \sin^2 \theta_0) A = 0, \quad (6.10)$$

где  $A$  — электрическая составляющая световой волны,  $k \approx k_0 \sqrt{n_{\perp}^2 + \Delta \epsilon \sin^2 \theta_0}$  — волновой вектор,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ .

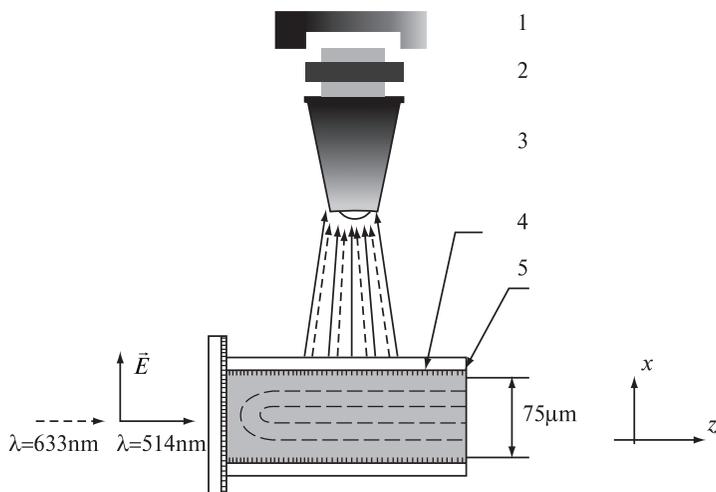


Рис. 6.4. Экспериментальная установка для получения пространственного солитона в ориентированном слое НЖК: 1 — ССД камера; 2 — фильтр; 3 — микроскоп; 4 — слой ИТО; 5 — слой окиси кремния

С другой стороны, переориентация директора определяется равенством вращающих моментов для данной геометрии. На рис. 6.5 показаны результаты численного моделирования для входящего луча аргонового лазера ( $\lambda = 514,5$  нм) с мощностью 3.9 мВт и диаметром 3 мкм. В отсутствии исходного наклона директора  $\theta_0 = 0$ , линейно поляризованное электрическое поле падающего света перпендикулярно директору. Поскольку интенсивность ниже оптического порога Фредерикса, переориентации директора не происходит и самовоздействие отсутствует. Дифракция сфокусированного луча в направлении  $x$  и  $y$ , определяет его прохождение вдоль оси  $z$  (рис. 6.5а). При приложении напряжения выше порога Фредерикса происходит переориентация директора (при моделировании он принят равным  $45^\circ$ ). Тогда световое поле вызывает беспороговую переориентацию директора, осуществляя процесс самораспространения, приводящий к формированию пространственного солитона (рис. 6.5б).

Результаты моделирования были подтверждены экспериментально в работах [25, 26], где также показана возможность их практического использования в информационных технологиях.

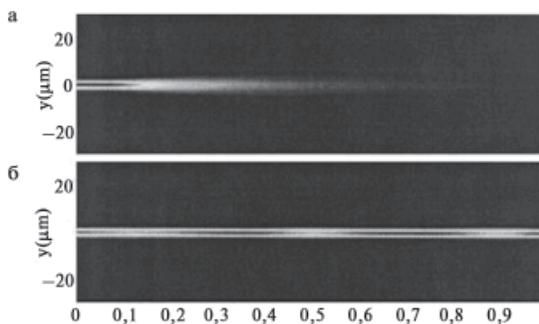


Рис. 6.5. Результаты компьютерного моделирования распространения луча в плоскости  $y-z$ : а — в отсутствии поля; б — распространение одиночной волны (солитона) при приложении напряжения

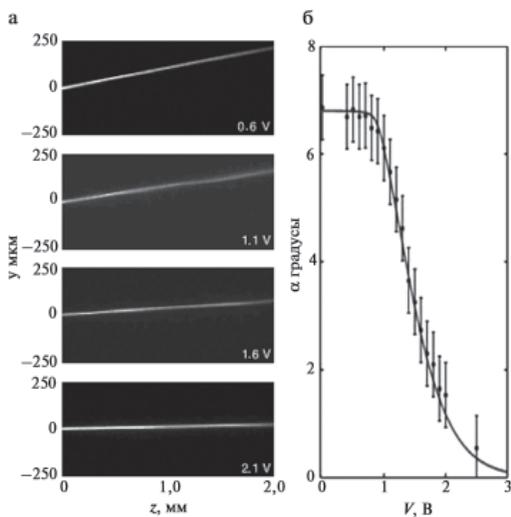


Рис. 6.6. Траектории солитона: а — изображения солитонов (5 мВт) при распространении вдоль оси  $z$ ; б — график зависимости углов отклонения солитона от напряжения (сплошная линия — теоретическая зависимость, точки — экспериментальные результаты). ЖК—Е7,  $\lambda = 1,064$  мкм

В работах [27–32] теоретически и экспериментально было показано, что НЖК позволяют изменять углы, под которыми происходит распространение солитонов в зависимости от величины приложенного напряжения (рис. 6.6).

Такое управление может найти применение в перестраиваемых оптических переключателях и оптических ножницах в медицине.

#### 6.4. Оптическое волновое смещение

ЖК позволяют осуществлять волновое смещение с высокой эффективностью в видимом и ИК диапазоне. Наибольший практический интерес представляют следующие процессы волнового смещения: стимулированное ориентационное рассеяние и четырехволновое смещение, частным случаем которого является обращение волнового фронта.

Экспериментальная установка для осуществления стимулированного ориентационного рассеяния показана на рис. 6.7.

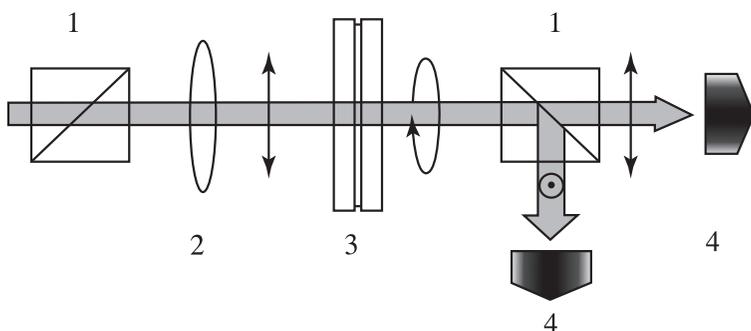


Рис. 6.7. Установка для осуществления стимулированного ориентационного рассеяния в НЖК: 1 — поляризаторы; 2 — линза; 3 — ЖКЯ; 4 — фотоприемник [33]

Линейно поляризованный свет от лазера ( $\lambda = 1,55$  мкм) фокусируется перпендикулярно на планарно ориентированный слой НЖК толщиной 400 мкм. На выходе расщепитель осуществляет разделение луча на необыкновенный ( $e$ ) и обыкновенный ( $o$ ). Поглощение НЖК E7 на этой длине волны пренебрежимо мало. Было обнаружено, что между  $o$  и  $e$  лучами происходит обмен энергией (рис. 6.8).

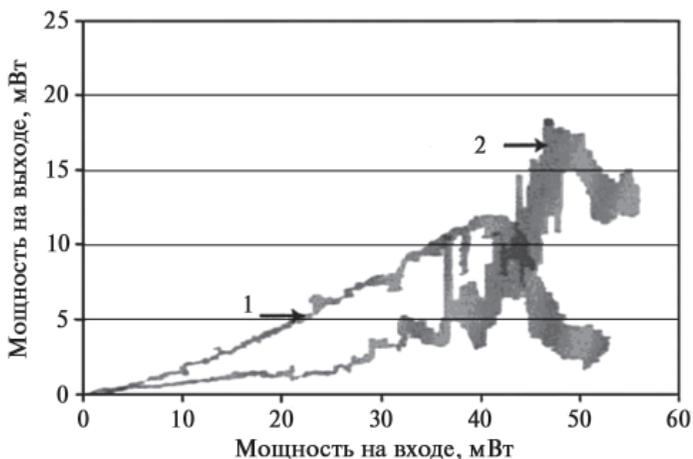


Рис. 6.8. Зависимость мощности прошедших  $e$  и  $o$  лучей от мощности входного луча лазера: 1 — прошедшая  $e$ -волна; 2 — генерируемая  $o$ -волна

При мощности входного луча около 48 мВт резко возрастает мощность  $o$  луча и ослабляется  $e$  луч. Этот нелинейный оптический процесс является результатом смещения входного сигнала и рассеянных волн на флуктуациях директора и ориентационной решетке. Подробно стимулированное ориентационное рассеяние рассмотрено в работе [3].

Представляет интерес случай четырехволнового смещения (рис. 6.9). Два лазерных луча  $E_1$  и  $E_2$  одинаковой частоты падают на слой НЖК, угол между ними равен  $\theta$ . В результате пространственного смещения этих волн генерируются новые волны  $E_3$  и  $E_4$  с той же частотой. Процесс генерации связан с возникновением дифракционной решетки за счет интерференции падающих лучей, которые дифрагируют на образовавшейся решетке. При этом изменяются интенсивность и фаза лучей  $E_1$  и  $E_2$ , то есть происходит самодифракция света. Детальное рассмотрение этого явления приведено в работе [3].

На рис. 6.10 показан процесс четырехволнового смещения, приводящий к обращению волнового фронта. На нелинейную среду с противоположных сторон падают две встречные волны накачки  $E_1$  и  $E_2$ , а под некоторым углом к ним в ту же область среды направляется сигнальная волна от объекта  $E_3$ . Тогда в результате нелинейного взаимодействия возникает четвертая волна  $E_4$ , распространяю-

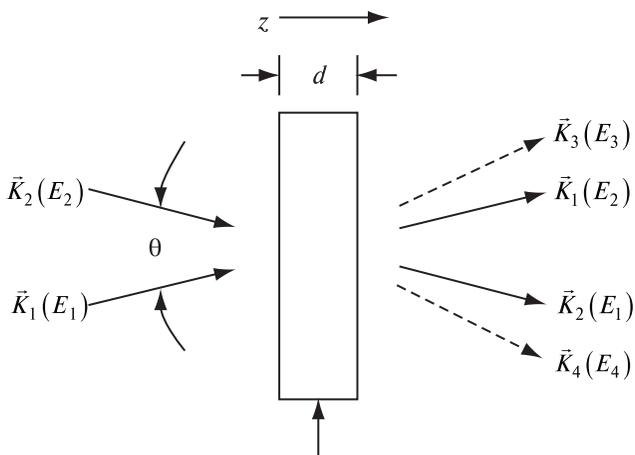


Рис. 6.9. Схема четырехволнового смешения лучей

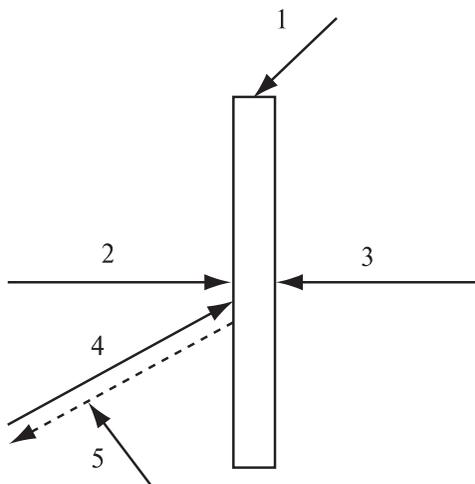


Рис. 6.10. Схема эксперимента по обращению волнового фронта: 1 — нелинейный оптический материал; 2 — опорный луч  $E_1$ ; 3 — считывающий луч  $E_2$ ; 4 — объектный луч  $E_3$ ; 5 — луч  $E_4$ , восстанавливающий изображение объекта [3]

шаяся в противоположную по отношению к  $E_3$  сторону. Волна  $E_4$  возникает вследствие дифракции на решетке, создаваемой при интерференции волн  $E_1$  и  $E_3$ . Волна  $E_4$  может формироваться при различных комбинациях трех входящих волн. Особенностью волны  $E_4$  является ее комплексное сопряжение с волной  $E_3$ , т. е. она является обращенной, причем это свойство сохраняется и для волн со сложным фронтом. Таким образом, оказывается возможной динамическая коррекция волновых фронтов [1].

Результатом волнового смешивания световых волн с различными частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  является генерация волны другой частоты  $\omega_4$ , являющейся комбинацией исходных частот [34–37].

В работе [38] экспериментально получена высокоэффективная генерация на разностных частотах при взаимодействии излучения оптического диапазона с нематиком. Источником служил аргоновый лазер непрерывного действия, излучающий на нескольких линиях с суммарной мощностью 0,08–1,5 Вт. Максимальная эффективность преобразования составляла примерно 1%, коэффициент квадратичной восприимчивости был равен примерно  $2 \cdot 10^{-6}$  м/В. Коэффициент эффективной нелинейности при учете только квадратичного механизма намного превысил аналогичную величину для твердых кристаллов.

### 6.5. Светоиндуцированные эффекты в смесях ХЖК со светочувствительным НЖК

Изучение светоиндуцированных эффектов в ХЖК выявило три возможных механизма изменения параметров материала: термический, ориентационный и конформационный [15, 39–42]. Большинство светопоглощающих ЖК содержат конформационно активные молекулы, проявляющие *транс-цис*-изомеризацию. В этом случае удлинённые палочкообразные молекулы (*транс*-изомер) видоизменяются под действием УФ-излучения, приобретая изогнутую форму (*цис*-изомер). ЖК пленки на основе азосоединений в нематической фазе имеют форму (*транс*-изомера) и утрачивают мезофазу при переходе в (*цис*-изомер). *Транс-цис*-фотоизомеризация ЖК на основе азобензинов под действием лазерного импульсного излучения сопровождается фазовым переходом нематик-изотропная фаза с коротким оптическим откликом (200 мкс) [43, 44].

Световое воздействие на ХЖК сопровождается изменением шага спирали и, как следствие, сдвигом полосы селективного рассеяния

света. Цветовой сдвиг наблюдается в случае, когда в ХЖК вводится конформационно активный краситель или когда хиральный компонент, способный к фотоизомеризации, вводится в холестерическую смесь. Фоточувствительные добавки успешно использовались в ЖК и ЖК полимерах [45]. В конечном счете, обратимые и необратимые изменения цветов, холестерико-нематический и холестерико-изотропный фазовые переходы и конформационные переходы были осуществлены в ЖК смесях. Исследование светочувствительных нематических компонентов, введенных в холестерические смеси, было проведено в работе [46]. Авторы разделили происходящие изменения на два типа: первый — изменение шага холестерической спирали, сопровождаемое изменением цвета селективно отраженного света; второй — изменение показателя преломления. Как известно, шаг холестерической смеси зависит как от параметров нематической компоненты, так и от хиральной добавки. Ранее было показано, что гигантская оптическая нелинейность в нематике объясняется изменением поляризуемости молекул и параметра порядка. Уменьшение параметра порядка изменяет величину показателей преломления и понижает температуру фазового перехода. Для температур значительно ниже фазовых переходов вклад обоих механизмов в нелинейность равнозначен. Однако при приближении к температуре фазового перехода вклад от изменения параметра порядка возрастает, что сопровождается увеличением показателя преломления для обыкновенного луча и уменьшением показателя преломления для необыкновенного луча. Отсюда изменение шага под действием излучения в ХЖК также происходит вследствие изменения поляризуемости и параметра порядка. Увеличение длины волны селективного отражения ( $\lambda_0$ ) под действием излучения объясняется уменьшением силы закрученной спирали, вызванной конформационными изменениями в красителе или хиральной добавке. Было замечено, что увеличение шага связано с уменьшением концентрации хиральных изомеров. Рассмотренные эффекты открывают интересные возможности для создания цветных фильтров, УФ сенсоров, записи УФ изображений и оптических систем обработки изображений.

Завершая рассмотрение наиболее интересных с прикладной точки зрения нелинейных оптических эффектов в ЖК, следует отметить, что это направление продолжает интенсивно развиваться, что позволяет ожидать обнаружения новых эффектов.

## 6.6. Использование нелинейных эффектов в ЖК для локального ограничения излучения

В последние годы для модуляции излучения используются композиционные материалы на основе ЖК, содержащие в качестве нелинейных поглощающих добавок примеси фуллеренов и красителей [47, 48]. Упрощенная диаграмма энергетических уровней таких примесей приведена на рис. 6.11. Для этих сред характерны: малое время жизни состояния  $S_1$ ; высокая скорость интерконверсии; наличие триплетного состояния (переходы  $S_1-T_1$ ) и его большое время жизни; высокие значения сечений поглощения из возбужденных состояний  $S_1-S_2$  и  $T_1-T_{II}$ , превышающие сечения поглощения

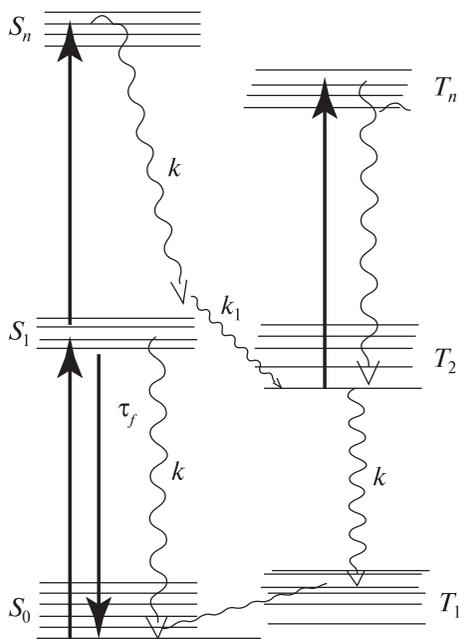


Рис. 6.11. Упрощенная диаграмма электронных состояний примесных центров. Прямые стрелки — переходы при поглощении и излучении света. Волнистыми стрелками обозначены безызлучательные переходы

из основного состояния  $S_0$ . Это значит, что поглощение света возрастает с ростом воздействующего излучения и увеличением заселенности возбужденных состояний, т. е. наступает процесс так называемого «обратного насыщаемого поглощения». Эти качества нелинейно поглощающих добавок могут быть реализованы при использовании других растворителей. Преимущества ЖК обусловлены наличием в них нескольких типов нелинейности: светоиндуцированной модуляции показателя преломления (нелинейная оптическая восприимчивость в ЖК достигает  $10^{-10}$  ед. СГС [49]), термической нелинейности в диапазоне времен от  $10^{-9}$  до  $10^{-7}$ , флуктуации плотности, обусловленной линейным или нелинейным поглощением, приводящим к электрострикционным эффектам или бриллюэновскому рассеянию.

Вызванное этими эффектами дополнительное светорассеяние приводит к усилению ограничения. Так, раствор  $C_{60}$  в нематике показывает практически то же снижение порога оптического ограничения, что и в  $\alpha$ -хлорнафталине. В НЖК с красителем метиловый красный излучение мощностью 140 мВт ослабляется до 5 мВт. Чем выше интенсивность излучения, тем меньше времена переключения.

Отдельно следует выделить двухфотонное поглощение, сочетающего высокую исходную прозрачность среды с возможностью создания высоких концентраций поглощающих центров. Вероятность двухфотонного поглощения зависит от квадрата мощности падающего излучения, поэтому его эффективность при мощных излучениях не вызывает сомнений [50, 51]. Сообщается о двухфотонном поглощении в ЖК, диспергированном в полимере с добавкой фуллерена, вызывающем ослабление оптического сигнала примерно на порядок [52]. Того же порядка величина ослабления при нелинейном рассеянии в ЖК, диспергированном в полимерной матрице [53]. Проблему достижения порога ограничения  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup> не удается решить прямым использованием известных эффектов. Для большинства физических механизмов порог не опускается ниже  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup>. Реализации низкорогового ограничения посвящены работы [49, 54, 55]. В качестве ограничителя использовалась микроканальная шайба, заполненная ЖК в изотропной фазе и помещенная фокальной плоскости телескопической системы (рис. 6.12).

Известно два способа, обеспечивающие требуемые пороги ограничения. В первом ячейка с ограничителем располагается вблизи сопряженного фокуса телескопа [56]. В этой схеме используется оптическое ограничение при непрерывных и квазинепрерывных

наносекундных и более длинных световых воздействиях пико- и фемтосекундных лазеров, когда ограничение возрастает за счет светорассеяния на центрах, образованных благодаря большой термической нелинейности ЖК.

В растворе фуллерена  $C_{60}$  и нигрозина реализуется обратное насыщаемое поглощение и термическая дефокусировка, обеспечивая на выходе энергию  $0,36 \text{ мкДж/см}^2$ .

Схема другого устройства низкопорогового ограничения, основанного на преобразовании изображения, приведена на рис. 6.13 [57]. Используемая телескопическая система уменьшает лучевую нагрузку не на орган зрения, а на светочувствительный слой транспаранта. Ограничитель выполнен в виде волоконной шайбы, заполненной смесью ЖК с красителем. Использование в ограничителях линзовых систем громоздко и дорого [58]. В работе [59] для уменьшения габарита предложено в качестве фокусирующих элементов использовать растры жидкокристаллических микролинз.

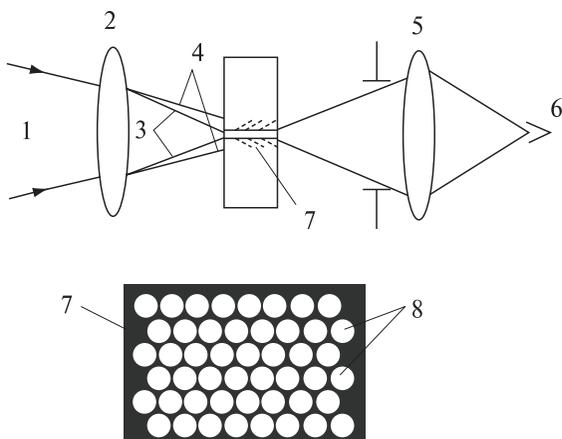


Рис. 6.12. Нелинейный оптический ограничитель:

- 1 — входное излучение от лазера и объектов наблюдения;
- 2 — входная линза;
- 3 — излучение от лазера;
- 4 — излучение от объектов наблюдения;
- 5 — коллективная линза;
- 6 — приемник излучения;
- 7 — непрозрачный корпус;
- 8 — микроканалы, заполненные ЖК

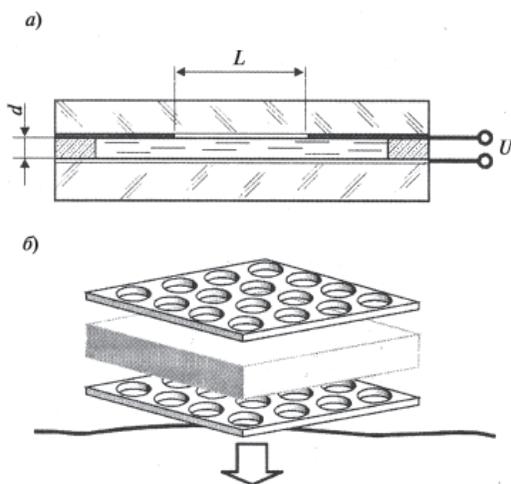


Рис. 6.13. Схема микролинзовой системы ограничителя на основе ЖК: а — единичная микролинза; б — телескопическая система из растров микролинз

В работе [60] для низкопорогового ограничения использована быстрая керровая нелинейность в поглощающих хиральных ЖК средах, реализуемая в борманской ячейке с эффектом аномального усиления коэффициента ИК поглощения низкочастотных молекулярных колебаний ЖК (рис. 6.14). Ячейка заполнялась хиральным нематиком с примесью молекул, поглощение которых резонансно с частотой падающего лазерного излучения, и имела край полосы селективного отражения вблизи частоты воздействующего излучения. При поглощении происходило фотоиндуцированное изменение показателя преломления ЖК системы, и условие Вульфа-Брэгга выполнялось для другой волны:  $\Delta n p = \Delta \lambda = \lambda_{\text{ЖК из}}$ , и область селективного отражения смещалась на длину волны падающего света. При этом весь падающий свет отражался. Эти условия впервые были реализованы при использовании примеси молекул красителей кеточианинов и фуллерена  $C_{70}$  [60]. Эти вещества входили в состав немато-хиральной композиции с полосой селективного отражения при  $\lambda_{\text{max}} = 540$  нм. Планарно ориентированный ЖК помещался в плоскую кварцевую кювету с зазором 1–5 мкм и освещался

шался импульсным линейно поляризованным излучением второй гармоники лазера на калий-гадолиниевом вольфрамите ( $\lambda = 532$  нм). Во всех случаях излучение попадало в область перекрытия полос поглощения примеси и отражения холестерика. Особенностью предложенных систем является низкий порог проявления эффекта. Для кетоцианина порог составил примерно  $250 \text{ мкДж/см}^2$  [60], для фуллерена  $C_{70}$  он оказался ниже —  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Дж/см $^2$  [61]. Это наиболее низкие из известных значений порога оптического ограничения.

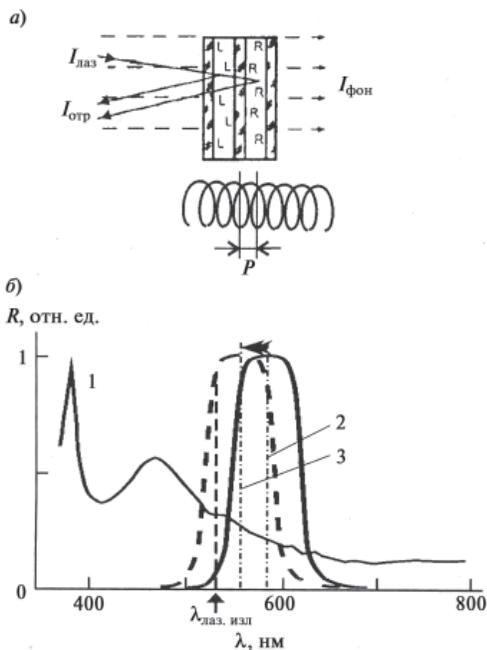


Рис. 6.14. Механизм низкопорогового ограничения в немато-хиральной ЖК системе: а — схема ячейки Бормана;  $P$  — шаг холестерической спирали;  $I_{\text{лаз}}$  — луч лазера;  $I_{\text{отр}}$  — селективное отражение;  $I_{\text{фон}}$  — прошедшее фоновое излучение; б — спектральное положение полос поглощения и селективное отражение в ячейке Бормана; спектр  $C_{70}$  (1), несмещенный (2) и смещенный (3) центры полосы селективного отражения

Рассмотренные устройства могут применяться в различных наблюдательных и регистрирующих приборах с использованием ОА ПМС. Они могут оказаться полезными альпинистам, пациентам с дефектами зрения, в эргономических исследованиях для сохранения уровня освещенности на сетчатке глаза при изменяющихся условиях и при изучении функций бокового зрения. На ОА ПМС такого типа можно создать зеркала заднего обзора со светоблокировкой для транспортных средств.

### Литература к главе 6

1. *Аракелян С.М., Чилингарян Ю.С.* Нелинейная оптика жидких кристаллов. М.: Наука. 1984. 360 с.; Аракелян С.М., Ляхов Г.А., Чилингарян Ю.С. Нелинейная оптика жидких кристаллов // УФН. 1980. Т. 131. С. 3–44.
2. *Simony F.* Nonlinear optical properties of LCs and PDLC. World Scientific. Singapore. 1997. 310 p.
3. *Khoо I.C.* Liquid crystals. Wiley Interscience publication. Hoboken, New Jersey. 2007. 367 p.
4. *Khoо I.C.* Optically induced molecular reorientation and third order nonlinear optical process in NLC // Phys. Rev. A. 1981. Vol. 23. P. 2077.
5. *Khoо I.C., Linguist R.G., Michel R.R., Mansfield R.J., Lopresti P.G.* Dynamics of picosecond laser-induced density, temperature, and flow-reorientation effects in the mesophases of LC // Appl. Phys. 1991. Vol. 69. P. 3853.
6. *Eichler H.J., Macdonald R.* Flow alignment and inertial effects in picosecond laser-induced reorientation phenomena of NLCs // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 67. P. 2666.
7. *Зельдович Б.Я., Табирян Н.В.* Вынужденное рассеяние света в мезофазе нематического жидкого кристалла. Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. № 8. С. 510–513.
8. *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Сухов А.В., Табирян Н.В.* Гигантская оптическая нелинейность в мезофазе НЖК. Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. № 5. С. 287–292.
9. *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В.* Обращение волнового фронта. М. Наука. 1985. 247 с.
10. *Tabiryаn N. V.; Zel'dovich B. Ya.* The orientational optical non-linearity of LCs. I. Nematics // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1980. Vol. 62. P. 237–250.
11. *Tabiryаn N. V.; Zel'dovich B. Ya.* The orientational optical non-linearity of LCs. II. Cholesterics // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. Vol. 69. P. 19–29.
12. *Tabiryаn N. V.; Zel'dovich B. Ya.* The orientational optical non-linearity of LCs. III. Smectics // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. Vol. 69. P. 31–46.

13. Зельдович Б. Я., Табириян Н. В. Ориентационная оптическая нелинейность ЖК // УФН. 1985. Т.147. №4. С. 633–674.
14. *Tabirian N.V., Sukhov A.V., Zeldovich B. Ya.* Orientational optical nonlinearity of LCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1986. Vol.136. P. 1–139.
15. *Khoo I.C., Li H., Liang Yu.* Optically induced extraordinary large negative orientational nonlinearity in dye-doped LC // *IEEE J., Quantum Electron.* 1993. QE-29. P. 1444.
16. *Khoo I.C., Slusarenko S., Guenter B.D., Wood W.V.* Optically induced space charge fields, dc voltage, and extraordinarily large nonlinearity in dye-doped NLCs // *Opt. Lett.* 1998. Vol. 23. P. 253–255.
17. *Khoo I.C., Chen P.H., Shih M.Y., Shishido A, Slusarenko S.* Supra optical nonlinearities of methyl-red and azobenzene liquid crystal-doped NLCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2001. Vol. 358. P. 1–13; Vol. 364. P. 141–149.
18. *Lucchetti L., Gentili M., Simony F.* Colossal optical nonlinearity by a low frequency external electric field in dye-doped LCs // *Opt. Express.* 2006. Vol. 14. № 6. P. 2236–2241.
19. *Shishido A.T., Tsutsumi O., Kabazawa A., Shiono T., Ikeda T., Tamai N.* Rapid optical switching by means of photoinduced change in refractive index of azobenzene LCs detected by reflection-mode analysis // *J. Am. Chem. Soc.* 1997. Vol. 119. P. 7791–7796.
20. *Gunter P., Huignard J.P.* eds. Photorefractive materials and their application. Berlin. Springer-Verlag. 1989. Vols. I–II.
21. *Khoo I.C., Williams Y.Z., Lewis B., Mallouk T.* Photorefractive CdSe and gold nanowire-doped LC and PDLC photonic crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2005. Vol. 446. P. 233–244.
22. *Macdonald R., Schwartz J., Eichler H.J.* Laser-induced optical switching of ferroelectric liquid crystal // *Int. J. Nonlinear Opt. Phys.* 1992. Vol.1. P. 119.
23. *Galstyan T.V., Sukhov A.V., Timashev R.V.* Energy exchange between optical waves counterpropagation in a ChLC // *Sov. Phys. JETP.* 1989. Vol. 68(5). P. 1001.
24. *Khoo I.C., Wood M.V., Shih M.Y., Chen P.H.* Extremely nonlinear photo-sensitive LCs for image sensing and sensor protection // *Opt. Express.* 1990. Vol. 4 (11). P. 431–442.
25. *Peccianti M., De Rossi A., Assanto G., De Luca A., Umerton C., Khoo I.C.* Electrically assisted self-confinement and waveguiding in planar NLC cells // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 77, № 1. P. 7–9.
26. *Conti C., Peccianti M., Assanto G.* Spatial solitons and modulation instability in the presence of large birefringence: the case of highly nonlocal LC // *Phys. Rev.* 2005. Vol. E. 72: 066614.

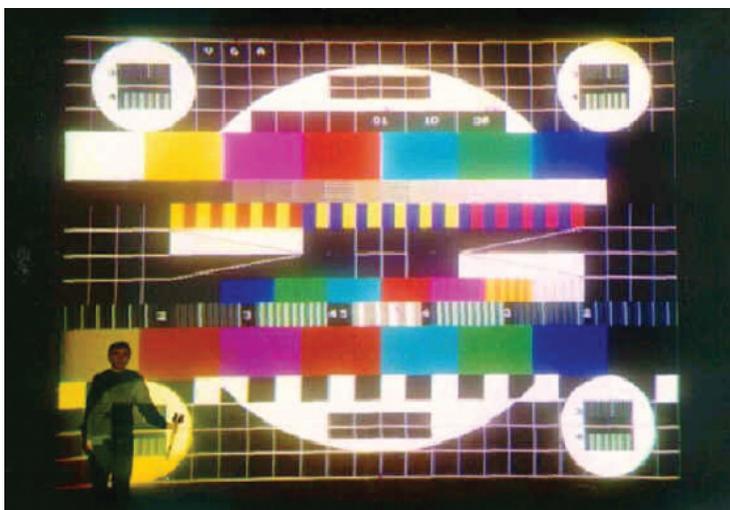
27. *Peccianti M., Conti C., Assanto G., De Luca A., Umetsu C.* All-optical switching and logic gating with spatial solitons in LCs // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 81. № 18. P. 3335–3337.
28. *Peccianti M., Conti C., Assanto G., De Luca A., Umetsu C.* Routing of anisotropic spatial solitons and modulation instability in LCs // *Nature*. 2004. Vol. 432, №9. P. 733–736.
29. *Assano G., Minzioni A.A., Peccianti M., Smyth N.F.* Optical solitary waves escaping a wide trapping potential in NLC: modulation theory // *Phys. Rev.* 2009. Vol. A 79. P. 033837-1-5.
30. *Fratalocchi A., Assano G., Brzdakiewicz K.A., Karpierz M.A.* Discrete propagation and spatial solitons in NLCs // *Opt. Lett.* 2004. Vol. 29. № 13. P. 1530–1532.
31. *Peccianti M., Conti C., Assano G.* Interplay between nonlocality and nonlinearity in NLCs // *Opt. Lett.* 2005. Vol. 30. № 4. P. 415–417.
32. *Peccianti M., Brzdakiewicz K.A., Assano G.* Nonlocal spatial soliton interactions in NLCs // *Opt. Lett.* 2002. Vol. 27. № 16. P. 1460–1462.
33. *Khoo I.C., Ding J.* All-optical cw laser polarization conversion at 1.55 micron by two beam coupling in NLC film // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 81. P. 2496–2498.
34. *Saha S.K., Wong G.K.* Phase-matched electric-field-induced second-harmonic generation in NLC // *Opt. Commun.* 1979. Vol. 30. P. 119.
35. *Ou-Yang Z.-C., Xie Y.-Z.* Theory of second-harmonic generation in LCs // *Phys. Rev.* 1986. A. 32 P. 1189.
36. *Gu S.-J., Saha S.K., Wong G.K.* Flexoelectric induced second-harmonic generation in NLC // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1986. Vol. 69. P. 287.
37. *Барник М.И., Блинов Л.М., Дорожкин А.М., Сухов Н.М.* Генерация второй оптической гармоники, индуцированной электрическим полем в НЖК и СЖК // *ЖЭТФ*. 1981. Т. 54. С. 935.
38. *Трашкев С.И., Клементьев В.М., Поздняков Г.А.* Высокоэффективная генерация разностных частот нематическими ЖК // *Квант. электр.* 2008. Т. 38. № 4. С. 373–376.
39. *Palfy-Muhoray P.* The nonlinear optical response of LCs // In: *Liquid Crystals Application and uses*, Bahadur B. (Ed). World scientific. Singapore. Vol. 1. P. 403.
40. *Blinov L.M.* Photoinduced molecular reorientation in polymers, Langmuir-Blodgett films and liquid crystals // *J. Nonlinear Optical Physics and Materials*. 1996. Vol. 5. P. 165.
41. *Chilaya G.* Cholesteric LCs: Optics, Electrooptics and Photooptics / Chapter 6 in *Chirality in LCs*, Bahr. Ch. & Kitzerov H. (Eds), series Partially oriented systems. Springer Verlag: New York.
42. *Chilaya G.S.* Effect of various external factors and pretransitional phenomena on structural transformations in ChLCs // *Cryst.* 2000. Vol. 45. P. 9440–960.
43. *Ikeda T, Tsutsumi O.* Optical switching and image storage by means of azobenzene LC films // *Science*. 1995. Vol. 268. P. 1873–1875.

44. *Shishido A., Kanazawa A., Shionio T., Ikeda T., Tamai N.* Enhancement of stability in optical switching of photosensitive LCs by means of reflection mode analysis // *J. Mater. Chem.* 1999. Vol. 9. P. 2211–2213.
45. *Bobrowski A.Yu., Boiko N.I., Shibaev V.P.* New chiral photochromatic menthone-containing homopolymers and copolymers-synthesis, phase behavior and photo-optical properties // *Liquid Crystals.* 1999. Vol. 26. P. 1749–1765.
46. *Chanishvili A., Chilaya G., Petrashvili G., Sikharulidze D.* Light induced effects in cholesteric mixtures with photosensitive nematic host // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2004. Vol. 409. P. 209–218.
47. *Deschenaux R.* Liquid-crystalline fullerenes: design, synthesis and properties // *Book of Abstr. 19 ILCC. Edinburgh.* 2002. 1.16.
48. *Грязнова М.В., Данилов В.В., Рыльков В.В.* и др. Межмолекулярные взаимодействия в системе ЖК-фуллерен C<sub>70</sub> // *Опт. и спектр.* 2000. Т. 89. № 2. С. 257–260.
49. *Danilov V.V., Sosnov E.N., Chistyakova O.V.* et al. // *Nonlinear Optics.* 2001. Vol. 27. P. 279–285.
50. *Belousova I.M., Belousov V.P., Danilov O.B.* et al. Photodynamic of optical limiting of power laser radiation // *Nonlinear Optics.* 2001. Vol. 27. P. 233–248.
51. *Subramaniam G., Andras J., Brodhead J.* et al. Synthesis of two-photon LC materials // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2002. Vol. 365. № 8. P. 33–42.
52. *Kamanina N.V., Kaporskii L.N.* Fullerene-doped PDLC films as effective optical limiting material // *Nonlinear Optics.* 2001. Vol. 27. P. 339–346.
53. *Sebbah P., Sixou P., Vanneste C., Guillard H.* Nonlinear scattering and optical power limitation in direct and inverse PDLCs // *Nonlinear Optics.* 2001. Vol. 27. P. 377–383.
54. *Khoo I.C., Li H., Liang Y.* et al. Nonlinear optical phenomena in fullerene-doped LC films and fibers // *Proc. SPIE.* 1995. Vol. 2530. P. 134.
55. *Khoo I.C., Wood M.V., Chen P.* et al. Self-defocusing and optical limiting of nanowatt cw laser and image processing at Watt/cm<sup>2</sup> // *Proc. SPIE.* 1998. Vol. 3475. P. 143.
56. *Justus B.L.* US patent № 5,491,579 issued 2. 1966.
57. *Wu S.-T., Wu C.S.* Liquid-crystal-based switchable polarizers for sensor protection // *Appl. Opt.* 1995. Vol. 34. № 31. P. 7221–7227.
58. *Khoo C., Wood M.V., Gunther B.D.* Nonlinear liquid crystal fiber structures for passive optical limiting of short laser pulses // *Opt. Lett.* 1996. Vol. 21. P. 1625.
59. *Грязнова М.В., Данилов В.В., Рыльков В.В.* и др. Микролинзы в системе оптического ограничения // *Письма в ЖЭТФ.* 2001. Т. 27. Вып. 2. С. 24–29.
60. *Danilov V.V., Smirnov V.A., Fedorov S.V.* The doped chiral LCs as photolimiters // *Proc. SPIE.* 1998. Vol. 3488. P. 6.
61. *Gryaznova M.V., Danilov V.V., Kamanina N.V.* Borrmann cells as optical switchers // *Opt. and spectr.* 1998. Vol. 85. P. 938.

## Часть III

### ДИСПЛЕИ

Жизнь коротка, наука бесконечна.  
Гиппократ



Квантоскоп: изображение мира,  
полученное лазерным проектором  
на экране размером 30 м<sup>2</sup> [7.19].

## *Глава 7*

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСПЛЕЯХ И РАЗВИТИИ ДИСПЛЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Дисплеи являются основной областью применения ЖК материалов. Они широко используются в повседневной жизни в качестве мониторов персональных компьютеров, телевизионных экранов, систем отображения информации в мобильных телефонах, цифровых камерах, электронных записных книжках, системах навигации и т. д. Развитие дисплейных технологий оказывает существенное влияние на теорию и экспериментальные исследования ЖК, определяет разработку новых материалов и технологий. Конкуренция с дисплеями, основанными на других принципах, способствовала совершенствованию эксплуатационных характеристик ЖК дисплеев (ЖКД). Развитие шло по пути формирования изображений, все более приближающихся к отображению реальных объектов: от черно-белых и монохромных, далее к многоцветным, полноцветным и, наконец, объемным дисплеям. Описанию их развития посвящен ряд монографий [1–18] и множество статей.

Современное общество живет в постоянно изменяющемся информационном поле, характеризуемом объемом и пространственно-временным распределением накопленной информации. На протяжении всей эволюции человечества средства связи, накопление и обмен информацией во многом определяли этапы развития цивилизации. На рис. 7.1 показано расширение сферы общения от взаимодействия отдельных людей в эпоху земледельческо-общинного строя до массовой сферы общения в наше время [19–21].

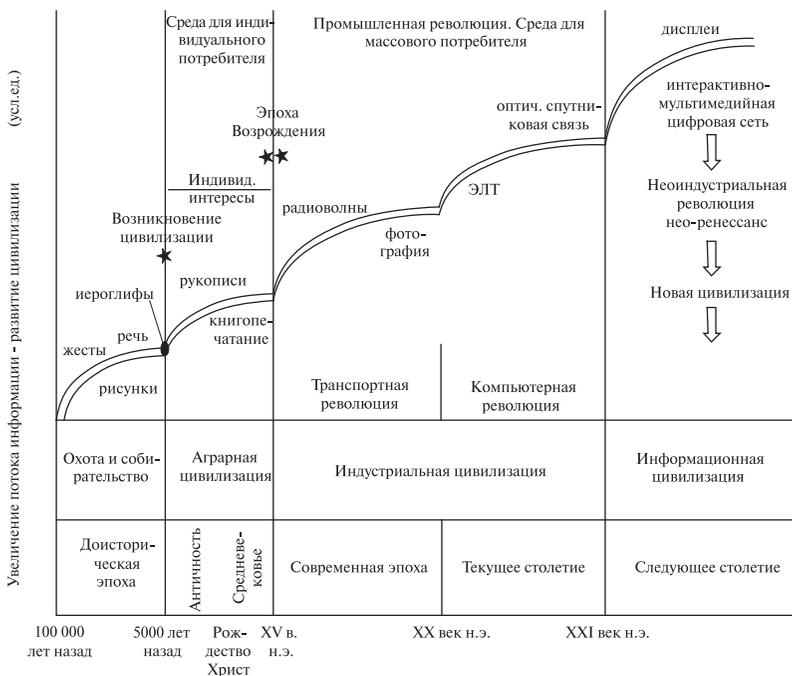


Рис. 7.1. Схема, иллюстрирующая увеличение потока обмена информацией в процессе развития общества [20]

Информация производится, хранится, преобразовывается, кодируется, умножается, воссоздается и воплощается в материальные ценности и предметы культуры. Научно-техническая революция, породившая системы компьютерного управления сложными объектами и обработки больших массивов информации, привела к созданию комплексов «оператор-компьютер». Их основу составляют визуальные системы отображения информации (СОИ), поскольку до 90 % внешней информации человек воспринимает в виде зрительных образов. Обязательным элементом СОИ являются средства индикации — информационные дисплеи со схемами управления, ввода-вывода, преобразования и хранения. Дисплей — это принципиально новый носитель, оперативно синтезирующий изобразительную и текстовую информацию. Дисплей стал частью повсед-

невной жизни, заменяя газеты, журналы, каталоги, рекламные листки и др. Как показано на рис. 7.1, он является одной из вершин развития информационных технологий. Сегодня это экран телевизора и мобильного телефона, монитор компьютера, медицинского прибора, циферблат электронных часов и информационное табло коллективного пользования. Мало кого интересует носитель, нужна сама информация.

Современный дисплей — это оптическое устройство, преобразующее входной (обычно электрический) сигнал в видимое изображение.

### **7.1. Современные дисплейные технологии**

Появлению информационных дисплеев предшествовал длительный период развития индикаторов. Одними из первых были стрелочные индикаторы — элементы измерительных приборов. Они не предназначались для отображения больших массивов информации в форме, удобной для оператора [22]. Изобретение ЭЛТ позволило объединить в едином корпусе источник электронов, устройства их фокусировки, отклонения и люминесцентный экран [23, 24]. Широкое применение ЭЛТ началось в послевоенный период прошлого столетия в телевидении, персональных компьютерах (ПК), радиолокаторах, бортовом оборудовании самолетов, электроизмерительных приборах, видеоиграх и др. С этого фактически началось развитие СОИ, предоставляющих оператору большие массивы информации в удобной для него форме. Это диктовалось нуждами компьютерных технологий и военной техники.

Наиболее острую потребность в компактных дисплеях испытывала авионика — бортовая аппаратура летательных аппаратов, эксплуатируемая в жестких климатических условиях и требующая оперативного отображения информации при ограниченном весе, габаритах оборудования и малой потребляемой энергии. Первыми были разработаны механические и электромеханические устройства. Так, в 1903 г. Wright Flyer имел на борту 3 прибора: измеритель силы и направления ветра, скорости вращения пропеллера и секундомер. В период с 1930 по 1980 гг. все устройства отображения строились на использовании ЭЛТ. Однако ЭЛТ не смогли удовлетворить вновь возникшим потребностям в информационных устройствах, что способствовало интенсивному развитию дисплеев, базирующихся на других принципах.

### **7.1.1. Основные требования, предъявляемые к дисплеям**

Состояние развития дисплеев определяется уровнем фундаментальных исследований, разработкой элементной базы и технологией их изготовления. Независимо от физических принципов, используемых при разработке дисплеев, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к ним:

1. Высокий контраст, позволяющий воспринимать отображаемую информацию в широком диапазоне освещенности и углов обзора.
2. Высокое пространственное и временное разрешение, позволяющее отображать высокие пространственные частоты движущихся объектов.
3. Широкий диапазон отображаемых цветовых параметров и уровней (шкалы) серого, позволяющий получать изображения максимально соответствующие воспроизводимым визуальным данным.
4. Широкий диапазон размеров экранов в зависимости от назначения дисплея (малые — для автономных переносных устройств индивидуального пользования; большие — для стационарных устройств коллективного пользования).
5. Возможность создания гибкого экрана.
6. Широкий интервал условий эксплуатации, включая раггедизацию устройств (подогрев при отрицательных температурах).
7. Низкая потребляемая энергия, позволяющая использовать малогабаритные маломощные автономные источники питания.
8. Долговечность.
9. Высокая технологичность, обеспечивающая возможность выпуска изделия массовым тиражом и являющаяся экологически безопасной.
10. Низкая стоимость.

### **7.1.2. Классификация дисплеев**

Существует много классификационных признаков, по которым подразделяют современные дисплеи.

1. По размерности изображения объекта различают двумерные (плоские) и трехмерные (объемные) дисплеи.
2. С функциональной точки зрения различают дисплеи стационарные, коллективного пользования и индивидуальные, автономные

(переносные). Стационарные дисплеи — это большие телевизионные экраны или информационные табло, дисплеи для отображения чрезвычайных ситуаций с использованием спутниковой связи, диспетчерские пульта и др. Общая тенденция их развития — максимально реалистичное отображение информации (увеличение размера и разрешающей способности экранов и создание терминалов широкого функционального назначения). К автономным дисплеям можно отнести микродисплеи телевизионного назначения, мониторинга состояния здоровья, устройств управления и контроля, виртуального мира развлечений. К ним же относят ноутбуки, дисплеи для мобильных телефонов и цифровых видео- и фотокамер.

3. Ключевым параметром дисплея является размер экрана, определяющей его назначение и выбор физического принципа. Назначение дисплеев в зависимости от размера экрана и разрешения показаны на рис. 7.2. По этим признакам различают дисплеи прямого наблюдения и проекционные дисплеи. Размеры дисплеев прямого наблюдения ограничены технологическими возможностями и составляют по диагонали от нескольких дюймов (микродисплеи) до 40"–50". За последние годы в связи с развитием телевидения высокой четкости размеры экрана возрастают до величины более 100".

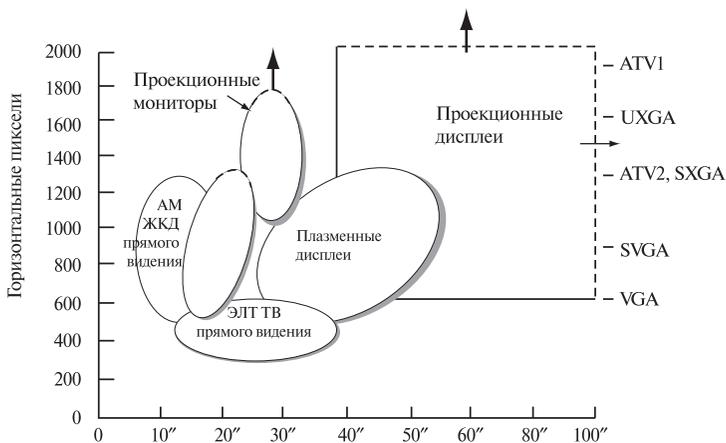


Рис. 7.2. Принципы построения и назначение дисплеев в зависимости от размера экрана (в дюймах) и горизонтального числа пикселей

Плазменные панели по размеру занимают промежуточное положение между проекционными устройствами и дисплеями прямого наблюдения. Возможно также увеличение размера за счет создания блочных (наборных) экранов, собираемых из нескольких экранов прямого наблюдения. Отображение информации на экране еще большего размера проще осуществлять средствами проекции изображений.

4. По размещению различают дисплеи для авиации и космической электроники (авионика); для наземных транспортных средств; для морского флота; для индивидуальных мобильных средств; для командных средств управления и др.

5. По режимам управления дисплеи разделяют на матричные и мультиплексные.

6. По оптическим свойствам различают активные (генерирующие излучение) и пассивные дисплеи, работающие на просвет или на отражение.

В следующем разделе основное внимание будет уделено принципам построения дисплеев, определяющим их важнейшие эксплуатационные характеристики.

### ***7.1.3. Краткий анализ современных систем отображения информации***

Современные дисплеи основаны на различных физических принципах: дисплеи на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ), на плазменных панелях (ПП), на светодиодах (СД), вакуумные люминесцентные, полевые эмиссионные дисплеи и ЖКД. Рассмотрим различные дисплеи с точки зрения предъявляемых к ним требованиям, и проанализируем их достоинства и недостатки.

#### *Дисплеи на электронно-лучевых трубках*

Важным достижением с момента создания ЭЛТ была замена черно-белого экрана цветным. Кроме того, происходило постоянное изменение размера экрана по диагонали. Для современных ТВ экранов он находится в диапазоне от 2 см до 1 м. Увеличение размера экрана неизбежно связано с увеличением объема ЭЛТ. Одновременно росла разрешающая способность, что привело к созданию телевидения высокой четкости (1280×720). Жесткая конкуренция дисплеев на ЭЛТ и ЖК в борьбе за рынок персональных компьютеров завершилась победой последних после 1990 г. Разрешение ЖКД характеризуется соотношением числа строк и столбцов в соответствии

со следующим стандартом форматов: VGA(640×480), SVGA(800×600), XGA(1024×768), SXGA(1280×1024), UXGA(1600×1200), QSXGA(2560×2048). Ожидается, что размеры пикселей высокоинформативных моделей А-НІС-LCD составят 126 мкм с промежутком 42 мкм. Это будут более быстродействующие пиксели, работающие от малых напряжений и обладающие эффектами памяти. Конкуренция со стороны ЖКД заставляет разработчиков дисплеев на ЭЛТ искать пути их совершенствования. Одним из таких путей является разработка проекционного сканирующего устройства, названного квантоскопом (рис. 7.3а, б) [25]. Он использует в качестве источника излучения полупроводниковый лазер на основе материалов группы А<sub>II</sub>В<sub>IV</sub> (CdSe, CdS, NdSSe, ZnSe, ZnSSe) с электронной накачкой. Достоинство квантоскопа состоит в достижении высоких эксплуатационных характеристик (табл. 7.1).

Таблица 7.1

### Основные эксплуатационные характеристики квантоскопа

Световой поток для белого излучения — 5000 лм	Потребляемая мощность — 4 кВт
Яркость на экране площадью 30м <sup>2</sup> — 100кд/м <sup>2</sup>	Катодное напряжение — 60 кВ
Контраст — 80	Охлаждение — 120 К
Разрешающая способность — 1000 пиксель/лин.	Долговечность — 10000 ч

Недостатками являются низкая долговечность, высокая потребляемая мощность, высокое катодное напряжение и необходимость охлаждения до температуры 120 К. За последнее время долговечность увеличена до 10.000 часов. Несмотря на достигнутые характеристики, на пути реализации стоит много проблем, в частности, избавление от системы охлаждения.

Другим направлением является создание устройства с плоским экраном матричного типа без отклонения пучка электронов. Работы по созданию плоского экрана, альтернативного традиционной ЭЛТ заставили разработчиков обратиться к созданию самосветящегося катодолюминесцентного дисплея.

Катодолюминесцентные технологии, реализующие наиболее эффективные способы преобразования электрической энергии в световую в видимом диапазоне, основаны на вакуумных флуоресцентных (ВФД) и полевых эмиссионных дисплеях (ПЭД). ВФД исполь-

а



б

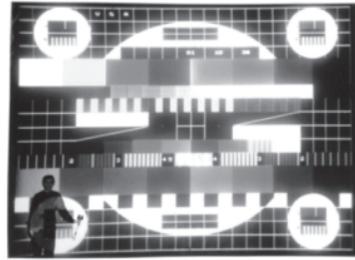


Рис. 7.3. Квантоскоп: а — внешний вид; б — цветное изображение мира, спроецированное на экран размером  $30 \text{ м}^2$

зуют эффект катодolumинесценции при низком (40–100 В) или среднем напряжении (100–500 В), состоящий в испускании фотонов экраном под воздействием пучка электронов с энергией в несколько эВ. Достижения разработчиков ВФД опираются на технологию изготовления вакуумных элементов и электронных ламп. Первый прототип такого дисплея был продемонстрирован французской компанией LETI в 1991 г., показавший повышение яркости изображений, отсутствие инерционности и независимость от внешней температуры. Двигаясь от массива эмиссионных катодов, выполненных в форме молибденовых конусов, электроны ударяются о слой люминофора на катоде. Фокусировка обеспечивает размеры пикселя менее 100 мкм [26]. Недостатком конструкции явились конусообразные катоды, форма которых притуплялась, что приводило к падению тока автоэлектронной эмиссии. Были разработаны различные модификации устройства. В НИИ «Волга» (Саратов) был создан большой мультимодульный экран с яркостью  $5000 \text{ кд/м}^2$  и размером  $50\text{--}100 \text{ м}^2$ , а также прототипы монохромных и цветных ТВ экранов с размерами диагонали 8" и 14", разрешением VGA и QVGA и напряжением от 35 В. Они создавали яркость 200 (G), 100 (R) 50 (B)  $\text{кд/м}^2$  для соответствующих длин волн светового излучения, что позволяло использовать их при освещенности 200–300 лк в расширенном интервале температур  $-40\text{...}+85^\circ\text{C}$ . Поле зрения составляет  $\pm 45\text{--}70^\circ$ , долговечность 20–30 тыс. часов. Характеристики дисплеев с термокатодом приведены в работе [27].

ПЭД, как и ВФД, состоит из двух частей: матрицы микроскопических электронных пушек (катодов), изготовленных с высокой

плотностью, и катодолюминесцентных экранов, работающих при низких или средних величинах напряжения. Отличие ПЭД от ВФД состоит в том, что электроны испускаются не нагретой нитью, а холодным катодом, что экономит до половины расходуемой ВФД энергии. Другое достоинство ПЭД состоит в возможности выполнения катода в виде матрицы. Для увеличения напряженности поля при работе с низкими напряжениями электроды, выполненные в виде острия, должны при эксплуатации сохранять свою конфигурацию. Различия в устройствах ПЭД объясняются различиями в технологии изготовления электродов.

В 2000 г. была создана технология формирования планарно-торцевых эмиттеров из тонких пленок алмазоподобного углерода. Результаты исследования свойств полученных структур приведены в работе [27] и свидетельствуют о высоких характеристиках и долговечности прибора. Вместо традиционных молибденовых катодов были также использованы кремниевые электроды [28]. При напряжении 300–500 В матрица размером 786×192 пикселей с размером острия 0,27×0,27 мм и напряжением смещения 30–50 В обеспечила яркость 300 кд/м<sup>2</sup> (рис. 7.4а). ПЭД с кремниевыми остриями и алмазным покрытием разработки института кристаллографии РАН при напряжении 3 кВ и мощности 0,5 Вт обеспечили яркость 2000 кд/м<sup>2</sup> (рис. 7.4б).

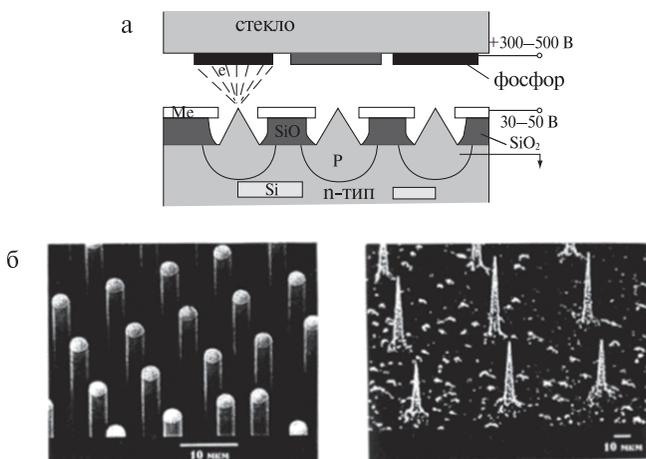


Рис. 7.4. Схемы полевых эмиссионных дисплеев: а — с кремниевыми катодами; б — с кремниевыми катодами, покрытыми алмазной пленкой

Основные эксплуатационные характеристики полевых эмиссионных дисплеев приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2

**Основные эксплуатационные характеристики ПЭД  
на основе кремния**

С кремниевыми катодами	С кремниевыми катодами, покрытыми алмазной пленкой
Напряжение — 300–500 В, напряжение смещения — 30–50 В Матрица 786×192, размер острия 0,27×0,27 мм. Яркость — 300 кд/м <sup>2</sup>	Напряжение — 3 кВ Мощность — 0,5 Вт Яркость — 2000 кд/м <sup>2</sup>

Ряд зарубежных фирм выпускает ПЭД средних размеров: 5.3" QVGA, 13.2" SVGA (Канденсент); 5.2" QVGA для монохромных дисплеев со шкалой серого и 5.6" QVGA для цветных (Пикстех); 7.2" QVGA and VGA для монохромных дисплеев (Futaba). Поле зрения ПЭД составляет 160°, диапазон рабочих температур от –40 до 70 °С. В этом они превосходят ЖКД (поле зрения 120°, диапазон рабочих температур от 5 до 35 °С). ПЭД применяют в авионике, медицине и на передней панели автомобилей. Достоинствами этих дисплеев являются высокая эффективность в видимом диапазоне, времена переключения ( $\approx 1$  мс), большие углы обзора и обеспечение широкого диапазона шкалы серого и цветовой гаммы. Для изготовления холодных катодов была предложена печатная технология, существенно снижающая стоимость панели размером 20–40" [29]. Анализ зарубежных достижений по разработке ПЭД приведен в работах [30, 31].

*Плазменные панели*

Работа плазменных дисплейных панелей (ПДП) основана на излучении света при разряде в инертном газе. Их достоинством является высокая яркость (до 350 кд/м<sup>2</sup>), широкий угол обзора (до 160°), большая информационная емкость (от 800×1300 до 2048×2048 пикселей) и высокая надежность работы при отрицательных температурах. ПДП заняли область экранов большого размера. Фирмы LG, Самсунг и Пласмако изготовили панели с размером 1,5 м по диагонали и разрешением SXGA. Они используются как информационные табло в местах большого скопления людей, как экраны домашних кинотеатров или как элементы диспетчерских служб МЧС, экологических служб и систем управления производствен-

ными процессами. В панелях фирмы Пласмако достигнута яркость более  $450 \text{ кд/м}^2$  и долговечность около 10000 часов.

В России разработаны ПДП с диагональю 102 см и созданы большие экраны, собираемые из отдельных модулей. Размеры модуля  $19 \times 19$  см или  $40 \times 40$  см, шаг пикселя от 3 до 12 мм. Управление от переменного сигнала (200 В) позволяет повысить яркость в 2–3 раза по сравнению с питанием от постоянного напряжения (360 В). Рабочее значение яркости — около  $400 \text{ кд/м}^2$ , а пиковое —  $700\text{--}800 \text{ кд/м}^2$ ; угол обзора  $\pm 80^\circ$  [32]. По разрешению плазменные панели занимают промежуточное положение между ЖКД и светоизлучательными дисплеями. Различные цветовые характеристики обеспечиваются типом инертного газа и характеристиками люминофора. Недостатком многомодульной панели является ограниченный диапазон градаций яркости (64 ступени), большие потери света при отражении от передней поверхности, наличие прямоугольной сетки на стыке модулей и невысокая степень однородности светотехнических характеристик отдельных модулей в составе экрана. Эти недостатки устраняются за счет использования голографических диффузоров и отражателей, изменения формы торцевого шва и его заполнения специальным стеклоцементом. Нерешенной проблемой остается большая потребляемая мощность из-за низкой световой эффективности ( $0,3\text{--}0,4 \text{ лм/Вт}$  для панелей постоянного тока). Характеристики ПДП приведены в работах [33–35].

#### *Светодиодные дисплеи*

Развитие полупроводниковых светодиодов (СД) на соединениях  $A_{III}B_V$  привело к их применению в светосигнальных и осветительных приборах, а также информационных экранах большого размера и системах подсветки ЖК панелей [36, 37]. Светодиодные экраны позволяют обеспечивать яркости не ниже  $6200 \text{ кд/м}^2$ , необходимые для безошибочного считывания информации с экрана при ярком солнечном свете ( $40\ 000 \text{ лк}$ ), что отличает их от других технологий. Применяя различные полупроводники, получают излучение СД зеленого, синего и красного цветов. Максимальной эффективностью преобразования обладают красные СД, минимальной — синие диоды. Сочетанием СД с тремя основными цветами получают белый СД, хотя большей эффективностью обладают монохромные СД с дополнительными люминесцентными слоями, преобразующие монохромное излучение в белое.

Для обеспечения требуемых углов обзора используют микро структурированные пленки в виде линз Френеля, размещаемые перед из-

лучающим элементом. Изменяя профиль микрорельефа линз Френеля, получают различные углы вывода излучения. Использование полупроводникового стабилитрона и размещение InGaN-эпитаксиальной структуры на проводящей подложке карбида кремния позволили повысить порог пробоя до 1000 В. Остается задача повышения долговечности этих устройств и осуществления теплоотвода от системы преобразования СД, снижающего яркость излучения до 50 %, вызывающего деградацию материала и сдвиг максимума длины волны излучения в длинноволновую область, ухудшающему цветопередачу системы.

В настоящее время работы по созданию светодиодных дисплеев развиваются в двух направлениях: с использованием люминесцирующих низкомолекулярных органических соединений (OLED) и полимерных светоизлучательных материалов (PLED) [38]. Первое сообщение о создании OLED появилось в 1987 г. С тех пор во многих лабораториях создаются материалы и устройства этого типа. Физические принципы построения устройств на OLED подробно изложены в работе [39, 40]. Яркость OLED определяется силой тока. Такая гетероструктура излучает на длине волны 570 нм с яркостью от 2000 до 13000 кд/м<sup>2</sup>, хорошей эффективностью выхода (56–66 кд/А; 8,96–18,3 лм/Вт) и высокой квантовой эффективностью (14,8–16,2%). Тонкие твердые пленки, обладающие светоизлучением, не нуждаются в задней подсветке; спектральный состав излучения можно изменять подбором красителей; требуемое напряжение составляет несколько вольт; обеспечивается высокая яркость, контраст, большие углы наблюдения (160°) и малые времена переключения (доли мкс). Привлекательным является возможность использования гибких подложек. Их преимущества по сравнению со стеклянными подложками состоят в большей прочности, компактности, легкости и дешевизне. Это способствует развитию эластичных дисплеев. Изготовление гибких подложек ограничено низкими допустимыми температурами (не более 200°С), усадочными деформациями, низкой герметичностью и химической стойкостью, двулучепреломлением, малым светопропусканием и шероховатостью поверхности. 1/4 VGA цветной OLED дисплей был впервые изготовлен фирмой Pioneer в 1999 г. Разработкой таких дисплеев занимаются фирмы Seiko-Epson, Kodak, Sanyo и ряд других.

В России производят полимерные светодиодные панели с размером рабочего поля 100×100 мм, разрешением 388×268 пиксел, яркостью 1900 кд/м<sup>2</sup> при напряжении 5 В и токе 2,6 мА.

Недостатком OLED является малая долговечность (10000 ч. для зеленого, 4000 ч. для красного, 700 ч. — для синего), малая стабильность

характеристик и относительно высокая стоимость. Предполагается создание микрополимерных OLED и полимерных OLED по технологии комплементарного полупроводника на основе окиси металла.

Краткий анализ рассмотренных типов дисплеев показал, что они имеют достоинства и недостатки, и не в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к современным дисплеям. В большей степени, как это будет показано ниже, этим требованиям отвечают ЖКД.

## 7.2. Основные этапы развития жидкокристаллических дисплеев

Первый жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) был разработан сотрудниками фирмы RCA Г. Хейлмейром и Л. Занони в 1967 г. [41]. Хотя индикатор требовал для работы высокой температуры ( $80^{\circ}\text{C}$ ), тем не менее, он произвел сильное впечатление на участников II международной конференции по ЖК 1968 г. в университете Кента, США. Именно тогда родилась идея создания плоского телевизионного экрана, который можно было бы повесить на стену как картину. На рис. 7.5а. показан прототип сегментного индикатора на эффекте ДРС, изготовленный по проекту Г. Хейлмейера на фирме Мерск в 1971 г. [42]. В 1973 г. фирма «Шарп» использовала ЖК экран для микрокалькуляторов. Несмотря на то, что этот индикатор имел низкие контрастные характеристики, малую долговечность и узкий температурный интервал эксплуатации, он вскоре сумел заменить

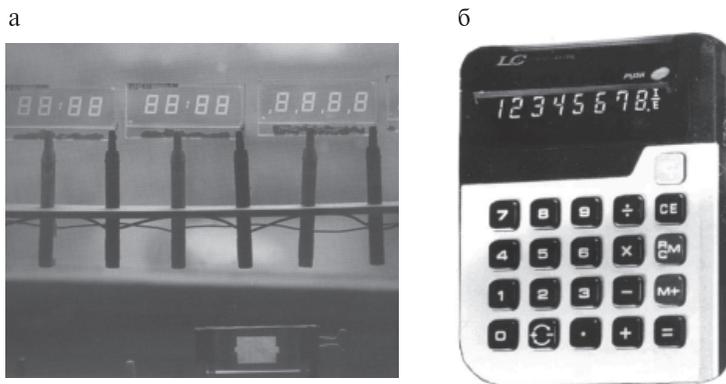


Рис. 7.5 Прототип сегментного индикатора на эффекте ДРС, изготовленный по проекту Г. Хейлмейера на фирме Мерск (а); отечественный калькулятор 1980-х годов с ЖКИ на эффекте ДРС (б)



Рис. 7.6. Первый прототип твистового ЖКД, 1972 г



Рис. 7.7. Наручные электронные часы с ЖКИ на основе твист-эффекта

светодиодную индикацию в наручных электронных часах и калькуляторах (рис. 7.5б). Однако такие ЖКИ не смогли составить конкуренции дисплеям на основе ЭЛТ, занимавшим доминирующее положение в СОИ [43].

Разработка плоских дисплейных панелей началась в США в лаборатории авионики в 1969 г., и была во многом связана с развитием физики ЖК. Примерно в то же время начались работы группы Дж. Фергасона по использованию ХЖК на фирме «Вестинггауз» [44].

Мощный импульс дальнейшему развитию ЖК-дисплеев (ЖКД) дала твистовая технология, разработанная сотрудниками фирмы «Хофман Ля Рош» М. Шадтом и В. Хелфрихом [45] (рис. 7.6). Оставалось синтезировать материал, который мог бы существовать в широком интервале температур, включая комнатную температуру, быть бесцветным и обладать химической стабильностью. Такой материал на основе цианобифенилов был разработан в 1972 г. Дж. Греем с сотрудниками в университете Хала, Великобритания [46]. Синтезированный материал был использован в индикаторах миллионов наручных электронных часов и калькуляторов, обеспечивая надежную эксплуатацию в интервале температур от  $-10$  до  $+60$  °С (рис. 7.7).

В простейших индикаторных устройствах, работающих в режиме «да–нет», или буквенно-цифровых индикаторах использовалась индивидуальная адресация к каждому элементу (сегменту) изображения. Для отображения большего объема информации поначалу использовалась мозаичная адресация с индивидуальной выборкой

каждого элемента изображения (пикселя). Однако с увеличением объема информации число контактных выводов недопустимо возрастает и предпочтительнее становится матричная схема адресации. Так, например, для информационной панели, состоящей из  $480 \times 640$  элементов, мозаичная схема адресации требует  $2 \times 480 \times 640 = 614400$  проводов, в то время как матричная схема адресации только  $480 \times 640 = 307200$ . Она представляет собой ортогонально размещенные токопроводящие строчки и столбцы, пересечения которых формировали отдельные пиксели (рис. 7.8а, б).

Широко распространенная схема выборки показана на рис. 7.9. На строчки матрицы за время формирования кадра одновременно подаются сигналы в виде импульсов с амплитудой  $S$  и длительностью  $\Delta t$ . После подачи сигнала на последнюю строчку процесс повторяется с верхней строчки для формирования следующего кадра развертки. В ряде случаев знак сигналов при формировании кадра изменяют на противоположный, чтобы исключить вредные электрохимические эффекты, вызываемые постоянным током [21]. Длительность импульса  $\Delta t$  равна периоду формирования кадра, деленного на число строк, т. е.  $\Delta t = T/N$ .

При обычной мультиплексированной адресации сигналы строк независимы от отображаемой информации и служат для того, чтобы различать строки во времени. Сигналы столбцов, напротив, зависят от отображаемой информации. Они генерируются видеосигналом.

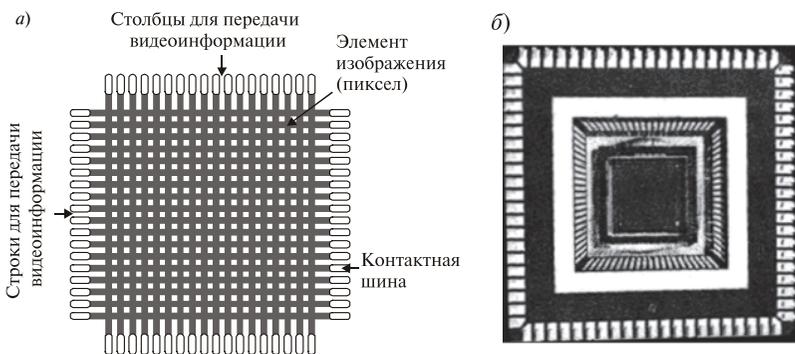


Рис. 7.8. а — схема матричного дисплея (слева); б — реальная матричная панель с 84 контактными выводами

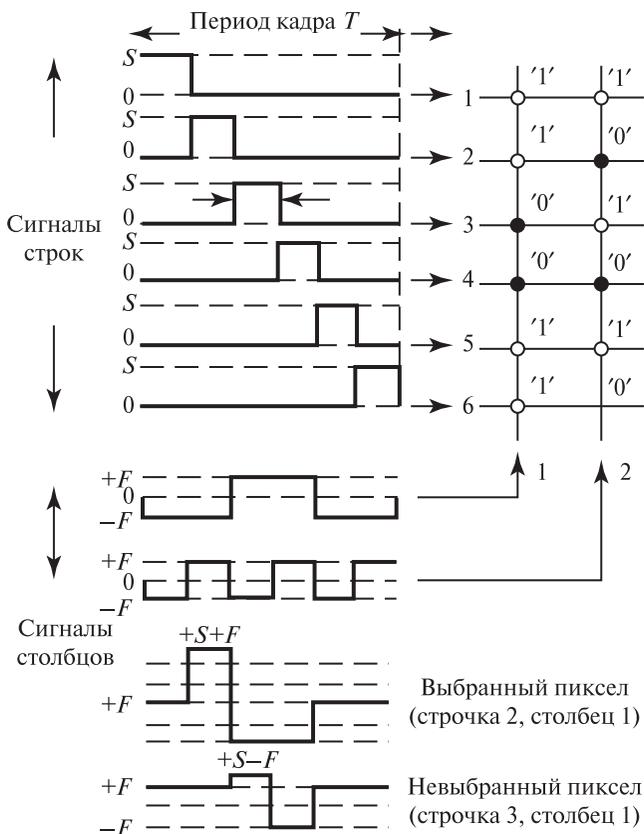


Рис. 7.9. Схема пассивной адресации в матричном дисплее

формацией или задаются блоком памяти: на столбец подается сигнал  $-F$ , если информационный элемент 1, или сигнал  $+F$ , если информационный элемент 0. В результате сигнал амплитуды  $S + F$  означает включение (выборку) пикселя на время выборки строки, а сигнал  $S - F$  означает выключение пикселя. Такая схема адресации в сочетании с определенным типом дисплея обеспечивает формирование изображения. Режимы адресации существенно зависят от электрических свойств дисплея. Зависимость яркости пикселей дисплея от напряжения приведены на рис. 7.10.

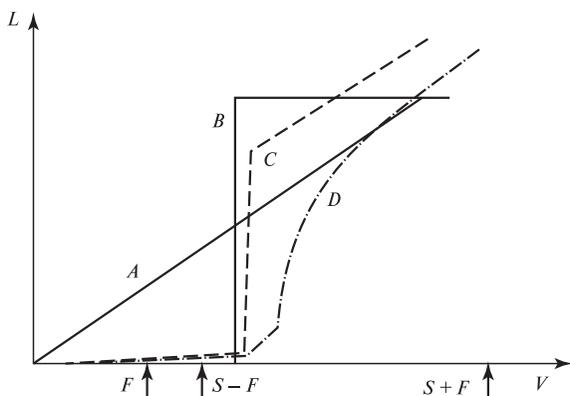


Рис. 7.10. Зависимость яркости пикселей от управляющего напряжения

Контраст между выключенным пикселем (напряжение выборки  $S-F$  или  $F$ ) и включенным (напряжение адресации  $S+F$ ) окажется низким, если электрооптическая кривая будет линейной (кривая А). Контраст будет существенно выше для кривых В, С и D с более крутым изменением электрооптической характеристики. Формула для оценки оптимального соотношения  $S/F$  была получена в работе [47].

$$(S/F)_{\text{опт}} = \sqrt{N} \quad (7.1)$$

где  $N$  — число строк. Те же авторы определили и оптимальное соотношение напряжений на выбранном ( $E_{\text{on}}$ ) и невыбранном ( $E_{\text{off}}$ ) пикселях:

$$(E_{\text{on}}/E_{\text{off}}) = \sqrt{(\sqrt{N} + D\sqrt{N} - 1)} \quad (7.2)$$

Уравнения (7.1) и (7.2) накладывают жесткие ограничения на режимы управления матричных дисплеев при увеличении числа строк. Если яркость включенного и выключенного пикселей обозначить соответственно  $L_{\text{on}}$  и  $L_{\text{off}}$ , то контрастное отношение, обеспечиваемое дисплеем, равно:

$$K = (L_{\text{on}}/L_{\text{off}}) N^{-1} \quad (7.3)$$

Осуществление режима пассивной адресации является наиболее дешевым, но он имеет ограничения по контрасту, разрешению адре-

суемых линий и не исключает возможности возникновения паразитного кросс-эффекта, состоящего в срабатывании полувыбранных пикселей. Этот недостаток был устранен путем индивидуального включения пикселей с помощью тонкопленочных транзисторов (ТПТ). При таком режиме каждый пиксель имеет электронный коммутатор, работающий от дополнительного порогового напряжения, что позволяет записывать видеоинформацию на конденсаторах и устранить кросс-эффект. Наибольшее применение нашли коммутаторы, выполненные в виде ТПТ. Эквивалентная схема активно-матричной адресации на основе ТПТ приведена на рис. 7.11.

Все ТПТ в строке при подаче положительного импульса на затвор становятся проводящими, что позволяет подать видеоинформацию в форме импульса на ЖК пиксель (ЖК конденсатор) или, если это необходимо, на дополнительный тонкопленочный накопительный конденсатор. Видеоинформация подается на все пиксели в строке одновременно по  $n$  столбцам. В невыбранных линиях затворы заземлены, транзисторы закрыты, и емкости не заряжаются. В действительности приходится учитывать и компенсировать появ-

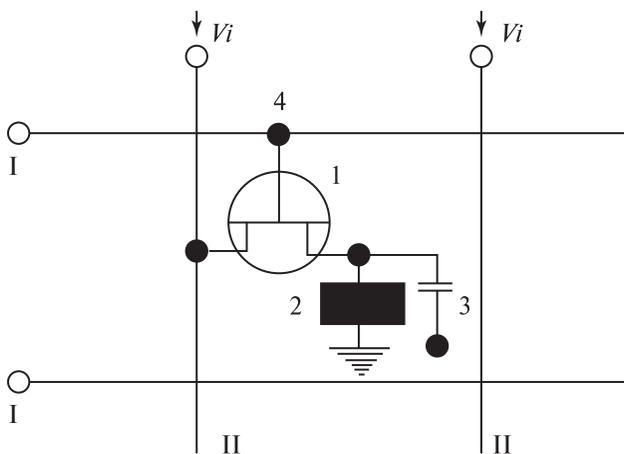


Рис. 7.11. Эквивалентная схема активно-матричной адресации на основе тонкопленочных транзисторов: 1 — ТПТ; 2 — ЖК ячейка; 3 — накопительный конденсатор; 4 — затвор; I — строки; II — столбцы;  $V_i$  — видеоинформация

ление от видеосигнала паразитных зарядов на пикселе и накопительном конденсаторе.

Первый активно-матричный ЖКД (АМЖКД) был изготовлен П.Броди в 1972 г., в США [23]. Основы управления ЖКД и в частности АМЖКД изложены в работах [48–50].

Электронная коммутация при активно-матричной адресации может осуществляться помимо ТПТ и другими средствами: тонкопленочными диодами и или структурой «металл-диэлектрик-металл». ТПТ изготавливают на основе аморфного кремния, насыщенного водородом ( $\alpha$ -SiH), поликристаллического кремния, поликристаллического CdSe или органических полупроводников. Фишер с коллегами (фирма «Вестингхаус», США) в 1972 г. разработал первый ЖКД с ТПТ на подложке из CdSe. Создание в 1979 г. ТПТ на аморфном кремнии усилиями Спиа с коллегами в университете Данди способствовало тому, что с начала 1980-х годов начался массовый выпуск полноцветных дисплеев для мониторов компьютеров. Этому способствовал синтез стабильных ЖК материалов, использование полимеров в качестве ориентирующих слоев, материалов для цветных фильтров и создание пленочных поляризаторов на основе комплексов поливинилалкилиодина. Транзисторы на CdSe используются редко, поскольку их изготовление остается сложным, хотя они характеризуются максимальной подвижностью электронов до  $400 \text{ см}^2/\text{Вс}$  при температуре  $380^\circ\text{C}$ . Органические полупроводники имеют меньшую стабильность и подвижность.

Несмотря на большую стоимость, схемы активно-матричной адресации получили наиболее широкое распространение в ЖКД благодаря высокому разрешению и быстродействию. Для активно-матричной адресации наиболее приемлемыми оказались электрооптические характеристики твистовых нематических структур и ЖК, диспергированных в полимерную матрицу.

Следующим шагом явилось улучшение оптических характеристик дисплеев, в частности увеличение углов обзора при сохранении контраста. В 1982 г. Ватерс и Рейнс из Деры (Великобритания) предложили для этой цели использовать супертвистовую структуру. Закрытие структуры на  $240\text{--}270^\circ$  вместо  $90^\circ$  обеспечила большие углы обзора и адресацию к сотням строк. В начале 1990-х годов цветные супертвистовые дисплеи нашли применение в качестве экранов компактных записных книжек и для персональных компьютеров [51].

К 1992 г. активно-матричные ЖКД превзошли дисплеи на ЭЛТ по их использованию в кабинах военных и гражданских самолетов. Несмотря на то, что их стоимость еще превышала дисплеи на ЭЛТ на 25%, надежность оказалась выше в 30 раз. Лучше оказались и другие параметры, включая угол обзора [52]. ЖКД применяются не только для отображения информации в кабине самолета, но и в тренажерах для обучения летного состава в космонавтике, авиации, наземном и морском транспорте (рис. 7.12а) [53]. Особое развитие получили нашлемные дисплеи в авионике [54–77]. Они представляют собой особый вид микродисплеев индивидуального пользования, размещаемых вместе с их оптической схемой и схемой управления в непосредственной близости от глаз наблюдателя с помощью специального шлема. Пример нашлемного дисплея (НД) показан на рис. 7.12б. Расположение шлема на голове наблюдателя предъявляет жесткие требования к габаритам и массе всей системы, удобству наблюдения и обращения и, особенно, к тому, что называют человеческим фактором. НД должны обеспечивать получение полноцветных объемных изображений.

Дисплеи для тренажеров и НД основаны на разных технологиях, но основное распространение получили ЖКД различных типов. Тренажеры предоставляют оператору визуальную информацию при широком угле обзора в пределе полной сферы. Решение этой зада-



Рис. 7.12. Применение дисплеев в авионике: а — тренажер для обучения летного состава (слева); б — нашлемный дисплей системы «Стракер» (справа) [3]

чи может быть осуществлено только за счет использования нескольких оптико-проекционных систем высокого качества. Как следствие этого возникает необходимость решения нескольких проблем: получение неискаженного изображения при его проекции на неплоский экран; получение слитного (бесшовного) изображения при его формировании несколькими проекционными системами, а также сохранение правильной цветопередачи в изображении. При этом каждое решение зависит от конкретной задачи, в которой необходимо учитывать угловые характеристики поля зрения, число операторов, которым представляется визуальная информация, а также характеристики создаваемых изображений: пространственное разрешение, контраст, количество световых градаций или градаций шкалы серого. Возможность удовлетворения этих требований определяется существующей элементной базой и специальными устройствами, устраняющими дисторсию проецируемых изображений и обеспечивающими их бесшовную сшивку. В зависимости от угла обзора и требования максимальной реалистичности существует два пути решения задачи: использование оптико-проекционных систем для отображения двумерных и трехмерных изображений.

Первые НД были разработаны для космонавтов, летчиков и пилотов вертолетов, однако удачно найденные технические решения оказались пригодными для защитных шлемов пехотинцев [77].

НД широко применяются для создания виртуальной реальности, требующей согласования аккомодации и конвергенции зрения. Непроизвольное проявление конвергенции, состоящее в повороте глазных осей на объект, находящийся на некотором расстоянии от наблюдателя, связано с аккомодацией, заключающейся в фокусировании глаза на объект, который может быть расположен как вблизи наблюдателя, так и на бесконечности. При работе с плоскими информационными дисплеями эта связь нарушается, поскольку 3-мерное пространство отображается на 2-мерном экране без точной передачи глубины пространства. Это приводит к дискомфорту в восприятии, вызывающему зрительное утомление, особенно с повышением качества формируемых изображений. Для согласования этих факторов было предложено несколько технических решений.

В работах [78, 79] описана система с компенсацией аккомодации за счет перемещения в реальном времени вперед-назад экранов, на которых формируются два изображения с учетом бинокулярного параллакса. Если методом траекторий определить

направление визирования, то компенсацию аккомодации можно осуществить перемещением в реальном времени оптической системы. Эту же задачу можно решить, используя зеркальную систему переменного фокусного расстояния. Недостатком этих решений остается механический принцип перемещения подвижных элементов. Поэтому была предложена оптическая система на основе электрически управляемого ЖК элемента [80]. Для повышения его быстродействия было использовано двухчастотное управление. Эксперименты подтвердили возможность получения объемных изображений большого размера при удовлетворительном бинокулярном согласовании конвергенции, аккомодации и параллакса смещения.

Самостоятельной проблемой, связанной с разработкой НД, явилось совершенствование приборов ночного видения. Не вдаваясь в анализ этого направления, отметим лишь одно новшество, связанное с существенным увеличением поля зрения этих устройств. Особенность существующих приборов ночного видения состоит в том, что увеличение поля зрения достигается за счет ухудшения разрешающей способности. Для устранения этого противоречия было предложено заменить систему из 2-х электрооптических преобразователей на систему из 4-х элементов, позволивших увеличить горизонтальное поле зрения до  $100^\circ$  при вертикальном поле зрения порядка  $40^\circ$ . Достигнутое увеличение поле зрения до  $160^\circ$  осуществлено за счет того, что два канала обеспечили бинокулярное поле  $30^\circ \times 40^\circ$ , а два других канала создали монокулярный обзор для левого и правого глаза с полем  $35^\circ \times 40^\circ$ .

В 1998 г. сформировался рынок настольных мониторов для ПК. Особое распространение получили дисплеи отражательного типа, однако в связи с невысоким контрастом трудно рассчитывать на их конкурентоспособность. В настоящее время производится большое количество настольных ЖКД, характеризующихся широким углом обзора. Разработаны модули на основе твистовых нематиков со специальными пленками, мультисегментные ЖК экраны с вертикальной ориентацией и дисплеи с управлением на ТПТ и переключением в горизонтальной плоскости. Последний из упомянутых типов был впервые предложен немецкой группой Бауэра в 1992 г. [81], а в 1998 г. на фирме «Мерк» для этой цели был разработан фторированный ЖК материал. С 2000 г. начался массовый выпуск таких дисплеев фирмой «Хитачи».

Новым в военном применении явилось появление панорамных дисплейных панелей; систем, расположенных над головой или на голове; командных систем в виде информационных стен или адаптивных панелей. Около 80% от всех используемых в военных целях дисплеев составляют раггедизированные дисплеи. Это означает создание возможностей использования дисплеев гражданского назначения в более жестких условиях военного применения, включая климатические и механические воздействия. До недавнего времени в командных центрах каждый оператор был оснащен 19" полноцветными дисплеями с разрешением (R) 1,3 мегапиксель. Ожидается использование 10 мегапиксельных панелей и информационных стен с R = 100 мегапикселей.

Современной задачей является создание быстродействующих дисплеев для многофункциональных ПК и цифрового телевидения [80-83], а также совершенствование микродисплеев индивидуального пользования для навигационных устройств, мобильных телефонов, цифровых видео- и фотокамер. В 1992 г. фирмой Sharp был выпущен первый компактный ЖК экран для видеокамер (LCD ViewCam), который стал обязательным элементом для приборов среднего и высокого класса. Значительно увеличился объем выпуска микродисплеев для мобильных компактных телефонов и цифровых видео- и фотокамер. 2002 год ознаменовался появлением цифровой фотокамеры фирмы Хьюлетт Паккард с первым экраном на сегнетоэлектрическом С\*ЖК промышленного производства (рис. 7.13).

Ожидается существенное увеличение размеров ТВ экранов с сохранением высокого качества изображения. В наши дни идет непрерывный процесс совершенствования и внедрения в повседневную жизнь объемных дисплеев и объемного телевидения, а также общего улучшения качества отображаемой информации за счет развития передовых дисплейных технологий. Наилучшими характеристиками на сегодня обладают технологии, основанные на эффектах переключения в плоскости (IPS)

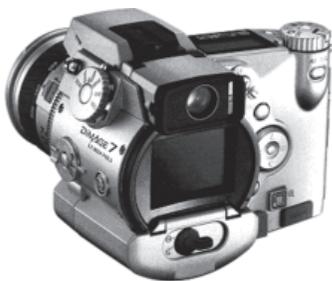


Рис. 7.13. Цифровая фотокамера фирмы «Hewlett Packard» с первым экраном на С\*ЖК промышленного производства

и с вертикальной ориентацией молекул (VA). Анализ оптимизированных для них жидкокристаллических смесей приведен в обзоре [84]. Разработанные фторсодержащие смеси обеспечивают высокий контраст, широкий угол обзора и времена переключения порядка 16 мс (и даже 8 мс) при качественном цветном отображении информации. Это открывает перспективы создания ТВ экранов с диагональю более 100" в ближайшие годы. Актуальной является совершенствование технологии изготовления ЖКД [85–87].

Массовое производство дисплеев крупнейшими корпорациями перешагнуло национальные границы и сформировало три мировых информационных центра: европейский, азиатский и североамериканский с неким разделением функций. Европа является основным генератором новых идей. Тысячелетние традиции первых университетов, заложивших основы научного метода и фундаментальных исследований, превратили ее в инкубатор эвристических принципов. При университетах созданы мелкие предприятия, достоинством которых является новаторский дух, воплощаемый в научные идеи, защищаемые патентным приоритетом. Слабая сторона — отсутствие инфраструктуры для массового производства продукции. Задача — продажа патентов на технологии производителю. Юго-Восточная Азия (Япония, Южная Корея, Тайвань и свободные экономические зоны Китая) со времени окончания II мировой войны превратилась в основного производителя дисплеев. Уникальное сочетание национальных особенностей с выбранным путем экономического развития превратило этот регион в центр массового производства с недостижимым в других зонах балансом цен и качества продукции.

### Литература к главе 7

1. *Bahadur D.* Liquid crystal displays. N.-Y.: Gordon and Breach. 1984; Liquid crystals — applications and uses / Edited by B. Bahadur. Toronto, Canada. 1990. Vol. 1. 604 p.; 1991. Vol. 2. 448 p.; 1992. Vol. 3. 424 p.
2. *O'Mara W.C.* Liquid crystal flat panel displays: manufacturing science and technology. N.-Y.: VNR. 1993. 223 p.
3. Display systems / Ed. L.W. MacDonald and A.C. Lowe // J. Wiley, 1997. Chichester. 418 p.
4. *Stupp E.H., Brennesholtz M.S.* Projection displays. Wiley. SID Series in Display Technology. 1999. 418 p.
5. *Robinson M.G., Chen J., Sharp G.D.* Polarization engineering for LCD projection. John Wiley & Sons Ltd. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 2005. 290 p.

6. *Yen P., Gu C.* Optics of Liquid crystal displays. John Wiley & Sons, Ltd. 1999. 452 p.
7. *Chigrinov V.G.* Liquid crystals devices. Physics and application. Artech House optoelectronics library. Boston, London. 1999. 357 p.
8. *Burden A.P.* Materials on displays // Materials World. 2000. P. 22–25.
9. *Luder E.* Liquid crystal displays. Addressing schemes and electro-optic effects. JOHN WILEY & SONS, LTD. Series in Display Technology. Chichester. 2001. 352 p.
10. *Wu S.-T., Yang D.-K.* Reflective LC displays. JOHN WILEY & SONS, LTD. Series in Display Technology. Chichester. 2001. 335 p.
11. *Yang D.-K., Wu S.-T.* Fundamentals of Liquid Crystal Devices. John Wiley & Sons. 2006. 387 p.
12. *Kelly S.* Materials science of liquid crystals. Taylor & Francis. 2003.
13. *Fisch M.R.* Liquid crystals, laptops and life. World scientific series in contemporary chemical physics. 2004. Vol. 23. 367 p.
14. *Sarma K.R.* Liquid Crystal Displays / In book Electrical Measurement, Signal Processing and Displays. 2004. CRC Press LLC. P. 32-1–32-21.
15. *Cristaldi D.J.R.* et al. Liquid crystal displays. Materials, operating modes and applications / In book Liquid crystal display drivers. 2009. Springer Science + Business media. P. 33–73.
16. *Jang Y.-K., Bos Ph.J.* Optics of mono-domain liquid crystal displays // Saarbrücken: VDM, Verl. Dr. Muller. 2008. 363 S.
17. *Ge Z., Wu Sh-T.* Transflective liquid crystal displays // Wiley-SID series in display technology. Chichester: Wiley. 2010. 230 S.
18. *Yeh P., Gu C.* Optics of liquid crystal display // Wiley series in pure and applied optics. Hoboken, NJ : Wiley, 2010. 770 S.
19. *Томилини М.Г.* Передовые дисплейные технологии // Опт. журн. 2003. Т. 70. № 7. С. 4–17.
20. *Tani C.* Display big-bang and hyperrealistic display for next era // Proc. ASID'00. Xi'an. 2000. P. 5–10.
21. *Томилини М.Г.* Информационные дисплеи на ЖК // Опт. журн. 1998. Т. 65. № 7. С. 64–76.
22. *Томилини М.Г., Гольдин К.Р., Лебедев В.И.* и др. Современные средства индикации любительских фотоаппаратов и перспективы их развития // Журнал оптико-мех. пром. 1977. № 11. С. 62–69.
23. *Brody T.P.* Birth of the active matrix // Information Display. 1997. Vol. 13, № 10. P. 28–32.
24. *Schadt M.* The history of LCD and LCM technology // Liquid Crystals. 1989. Vol. 5. № 1. P. 57–71.
25. *Bogdankevich O., Sadchikhin A., Sozinov S.* Research of projection systems on the basis of quantoscopes (laser CRTs) // Proc. of 10-th Symp. on Advanced Display Technologies. Minsk. 2001. P. 177–180.

26. Ламанов А., Ламанов М., Шешин Е., Шука А. Экраны на основе автоэлектронной эмиссии – перспективные устройства отображения информации // Инженерная микроэлектроника. 2005. № 9. С. 10–12.
27. Горфинкель Б., Абаньшин Н., Коровкин А. и др. Плоские экраны низковольтной катодолюминесценции // Электр. комп. 2002. № 1. С. 43–44.
28. Гиваргизов Е.И. Плоские автоэмиссионные лампы для подсветки ЖК дисплеев и автоэмиссионные дисплеи на основе кремниевых острий, покрытых алмазом // Опт. журн. 1999. Т. 66. № 6. С. 77–80.
29. Burden A.P. Materials on displays // Materials World 2000. P. 22–25.
30. Ghrayeb J., Jackson T.W., Daniels R., Hooper D.G. Review on field emission display potential as a future (leap-frog) flat panel technology // SPIE. 1997. Vol. 3057. P. 237–248.
31. Curtin C., Infante C. Fundamentals of emissive displays // SID short courses S-3. 1997. Boston. Massachusetts. 80 p.
32. Беляев В.В. Современные электронные дисплеи // Электр. комп. 2002. № 1. С. 24–28.
33. Воронов А.А., Дедов В.П. Принципы построения и проблемы совершенствования плазменных дисплеев // Опт. журн. 1999. Т. 66. № 6. С. 64–73.
34. Рахимов А.Т., Рой Н.Н., Коган Б.В. Новое поколение плазменных экранов коллективного пользования // Опт. журн. 1999. Т. 66. № 6. С. 74–76.
35. Shinoda T., Tolner H. Fundamentals of color-plasma display manufacturing // SID short courses S-2. 2004. Seattle. Washington. 76 p.
36. Трофимов Ю. Светодиодная элементная база – некоторые особенности и проблемы применения в дисплейных технологиях // Электр. комп. 2002. № 1. С. 29–34.
37. Коган Л.М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов. Новости светотехники № 7 / под ред. Ю.Б. Айзенберга // М: Дом света. 2001.
38. Абаньшин Н., Горфинкель Б., Жуков Н., Кустов В., Кузнецихин А. Плоскопанельные дисплеи на органических светоизлучательных структурах // Электр. комп. 2005. № 10. С. 57–59.
39. Forrest S. Fundamentals of organic light-emitting devices // SID short courses S-2. 2002. Boston. Massachusetts. 171 p.
40. Ghosh A., Hack M. Fundamentals of organic light-emitting devices // SID short courses S-1. 2004. Seattle. Washington. 90 p.
41. Kelker H. History of LCs // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1973. Vol. 21. P. 1–48.
42. Becker W., Lemp H.-J. 100 years of commercial LC materials // Information Display. 2004. Vol. 20. № 20.
43. Грошев А.А., Сергеев В.Б. Устройства отображения информации на основе жидких кристаллов. Л. Изд. Энергия. Библиотека по автоматике. 1977. Вып. 570. 80 с.
44. Ferguson J.L. Display system utilizing a LC material of the cholesteric phase. 1968. US Pat. № 3410999.

45. *Schadt M., Helfrich W.* Voltage-dependent optical activity of twisted NLC // Appl. Phys. Lett. 1971. Vol.18. P. 27.
46. *Gray G.W., Harrison K.J., Nash J.A.* New family of NLCs for displays // Electr. Lett. 1973. Vol. 9. P. 130–131.
47. *Alt P., Pleshko P.* Scanning limitation of LCD // IEEE Trans. Electr. Dev. ED-21. 1974. P. 146–155.
48. *Luder E.* Fundamentals of passive- and active-addressed LC displays // SID short courses S-1. 1997. Boston, Massachusetts. 111 p.
49. *De Boer W.* Fundamentals of AMLCDs // SID short courses S-1. 2002. Boston, Massachusetts. 98 p.
50. *Scheffer T.J., Nehring J., Jang J.* Fundamentals of LCDs // SID short courses S-3. 2004. Seattle, Washington. 103 p.
51. *Gooch C.H., Terry H.A.* The optical properties of twisted NLC structures with twist angles  $> 90^\circ$  // J. Phys. D: Appl. Phys., 1975. Vol. 8. P. 1575–1584.
52. *Lu R., Zhu X., Wu S.-T., Hong Q., Wu T. X.* Ultrawide-view LCD // IEEE/OSA Journ. of Display Techn. 2005. Vol. 1. № 1. P. 3–14.
53. *Цветков В.А.* Жидкие кристаллы в авиационной технике // Зарубежн. радиоэлектр. 1983. Т.2. С. 28–44.
54. *Desjardins D.D., Byrd J.C., Hopper D.G.* Military display market: update to fourth comprehensive edition // Proceed. SPIE. Display technologies and applications for defense, security and avionics III. 2009. Vol. 7327. P. 732705–15.
55. *Warren R.* et al. Horizontal diplopia thresholds for head up displays // AFAMRL 1984. doct. AD-A141965.
56. *Arbak C.* Utility evaluation of a helmet mounted display and sight // Proc. SPIE. 1998. Vol. 1116. P. 138.
57. *Brooks R.* Helmet mounted display for tank applications // in Imaging Sensors and Displays. Proc. SPIE. 1987. Vol. 765. P. 19.
58. *Moffitt K.* Ocular responses to monocular and binocular helmet mounted display configurations // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol 1116. P. 142–148.
59. *Amitai, Y.* et al. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays // Applied Optics. 1989. Vol. 28. P. 3405.
60. *Browder G.* Evaluation of a helmet-mounted laser projector display // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1116. P. 85.
61. *Burbidge D., Murray P.* Hardware improvements to the helmet mounted projector // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1116. P. 52–60.
62. *Thomas M.* et al. Fiber optic development for use on the fiber optic helmet mounted display» in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1116. P. 90.
63. *Gibson C.* Binocular disparity and head up displays // Human Factors. 1980. Vol. 22. P. 435–444.
64. *Rebo R.* A helmet mounted virtual environment display system // AFIT. 1988. doct. AD-A203055.

65. *Peli E.* Visual issues in the use of a head mounted monocular display // in Visual Communications and Image Processing IV. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1199. P. 1164–1176.
66. *Melzer J., Moffitt K.* Partial binocular overlap in helmet mounted displays // in Display System Optics II. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1117. P. 56–62.
67. *Robinson R., Thomas M.* Eyetracker development on the fiber optic helmet mounted display // in Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1989. Vol. 1116. P. 102–108.
68. *Robinett W., Rolland J.* A computational model for the stereoscopic optics of a head mounted display // in J. Merritt & S. Fisher (Eds.) Stereoscopic Displays and Applications 2. Proc. SPIE. 1991. Vol. 1457. P. 140–160.
69. *Rallison R., Schicker S.* Combat vehicle stereo HMD // in Large Screen Projection, Avionic and Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1992. Vol. 1456.
70. *Melzer K., Moffitt K.* An ecological approach to partial binocular overlap // in Large Screen Projection, Avionic and Helmet Mounted Displays. Proc. SPIE. 1992. Vol. 1456.
71. *Bohm D.* et al. Helmet mounted sight and display testing // in Large Screen Projection, Avionic and Helmet Mounted Displays. 1992. Proc. SPIE Vol. 1456.
72. *Rash C.E.* Helmet-mounted displays: design issues for rotary-wing aircraft // SPIE Press. 2001. Vol. PM93. 258 p.
73. *Hopper D.G.* Panoramic cockpit display // In Advanced aircraft interfaces: the machine side of the man-machine interface. 1992. Conf. Proceed. of the 63 Avionic Panel Meeting / Symposium held in Madrid. Spain. May 1992. Published by the NATO Advisory group for Airspace Research and Development. Avionic Panel. P. 9.
74. *Ong H., Woodard O., Cheong N., Reese C.* A new normally black, high contrast, wide symmetrical viewing angle AMLCD for military head mounted displays and other viewer applications // Proceed. of SPIE. 2004. Vol. 5442. P. 301.
75. *Беляев В., Жуков Н.* Дисплеи с повышенной надежностью для авиации и военной техники // Электрон. компон. 2002. №2. С. 20–23.
76. *Krevor D., McNelly G., Skubon J., Speirs R.* Development and manufacture of visor for helmet mounted display // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 5180.
77. *Томлин М.Г.* Нашлемные дисплеи // Опт. журн. 1999. Том 66. № 6. С. 81–87.
78. *Shiva S., Kishino F.* A new binocular parallax display method in which vergence changes are linked to accommodative responses // Digest Asia Display'95. 1995. P. 785–788.
79. *Shiva S., Omura K., Miyasato T.* Displaying photographic images using 3D displays with accommodative compensation // Digest Asia Display'96. 1996. P. 438–441.
80. *Suyama S., Kato K., Nakajima H.* 3DD with dual frequency LC varifocal lens // SID Intern. Symp. Digest of Techn. Papers. 1997. P. 273–276.

81. *Bauer G., Kiefer R., Klausmann H.* et al. In-plane switching: a novel electro-optic effect // *LC Today*. 1995. Vol. 5. P. 13–14.
82. *Ishii Y.* The world of LCD TVs – past, present and future // *Journ. of Display Techn.* 2007. Vol. 3. № 4. P. 351–360.
83. *Jin H.C., Kang I.B., Jang E.S., Moon H.M., Oh C.H., Lee S.H., Yeo S.D.* Development of 100-in. TFT-LCDs for HDTV and public-information-display application // *Journ. of SID*. 2007. Vol. 15/5. P. 277–280.
84. *Томилини М.Г.* Жидкие кристаллы: восхождение в третье тысячелетие // *Опт. журн.* 2001. Т. 68, № 3. С. 78–83.
85. *Томилини М.Г.* Какая дисплейная технология победит в битве за большой экран? // *Опт. журн.* 2004. Т. 71. № 10. С. 85–88.
86. *Pauluth D., Tarumi K.* Advanced LCs for television // *J. Mater. Chem.* 2004. V. 14. P. 1219–1219.
87. *Kim J.M., Choi H.Y., Lee M.-G., Nam S., Kim J.H., Whang S., Lee S.M., Cheong B.H., Kim H., Lee J.M., Han I.T.* Nanoimprint technology for future LCD / In book *Unconventional nanopatterning techniques and applications*. By John A. Rogers and Hong H. Lee. 2009. John Wiley & Sons, Inc. P. 565–594.

## Глава 8

### ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ

В настоящее время ЖКД составляют около 85% от объема выпуска всех плоских информационных дисплеев. Это объясняется их высокими эксплуатационными параметрами, многочисленностью используемых электрооптических эффектов и конструктивным многообразием этих устройств [1–3]. Развитие ЖКД определяется острой конкуренцией между различными технологиями и использованием новых материалов.

Различают просветные, отражательные и полупрозрачные (прозрачно-отражательные) жидкокристаллические дисплеи (рис. 8.1).

Просветные дисплеи используют заднюю подсветку для освещения ЖК экрана, обеспечивающую высокую яркость и высокое контрастное отношение. Они имеют ограниченный угол обзора и более пригодны для индивидуального пользования, например, в ноутбуках и игровых приставках. Использование фазовых компенсаторов в просветных ЖКД прямого видения увеличивает угол обзора, что позволяет применять их в качестве экранов настольных компьютеров и телевизоров. Просветные дисплеи могут также использоваться в качестве проекционных.

Отражательные дисплеи также разделяют на дисплеи прямого видения и проекционные. Дисплеи прямого видения не нуждаются в задней подсветке, и потому являются более легкими и потребляющими меньше энергии. Их основной недостаток — трудность считывания информации при низкой освещенности. Отражательные дисплеи более пригодны для проекционного телевидения при использовании микродисплеев на кремнии (LCoS). Для них тре-

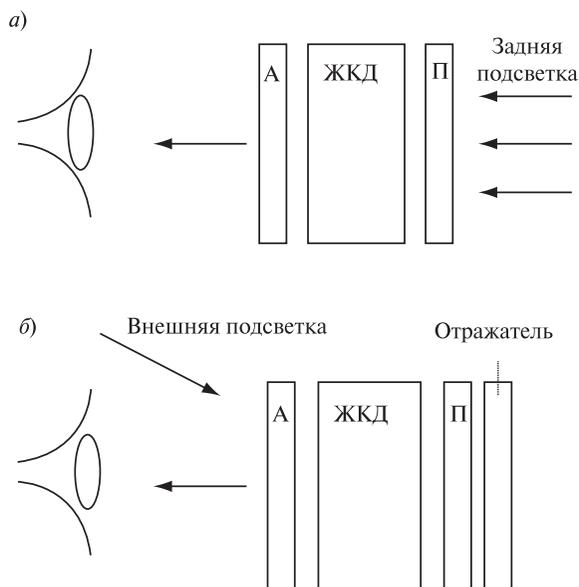


Рис. 8.1. Схемы просветных (а) и отражательных (б) дисплеев  
 А — анализатор, П — поляризатор

бования к углам поля зрения не столь высоки, как для дисплеев прямого видения. Полупрозрачные дисплеи объединили в себе характеристики тех и других. Так, при низкой освещенности включается задняя подсветка, и дисплей работает на просвет; при высокой освещенности подсветка выключается и дисплей работает на отражение.

В настоящей главе будут рассмотрены просветные ЖКД прямого видения, проекционные и объемные дисплеи.

### 8. 1. Просветные жидкокристаллические дисплеи прямого видения

При разработке этих дисплеев широкое использование нашли следующие электрооптические эффекты: твист-эффект, супертвист, селективное отражение в холестерико-нематических смесях, эффекты в сегнетоэлектрических С\*ЖК и бистабильные эффекты, рассмотренные в гл. 4. Наилучшие эксплуатационные характеристики достигнуты при использовании твист-эффекта с поперечным при-

ложением электрического поля (твист, переключаемый в планаре, — IPS) и мультидоменных вертикально ориентированных мод (VA) [4].

#### *Дисплеи на основе твист-эффекта*

Наиболее широко в дисплеях прямого видения используется твист-эффект в нематиках (TN). На рис. 8.2 представлена схема активно-матричного TN дисплея [5]. Она содержит элементы, которые имеются в различных типах ЖКД. Слой НЖК 5 толщиной около 2 мкм расположен между TFT подложкой 6 и цветным фильтром 8. На токопроводящие слои ITO 4 нанесен ориентирующий слой 7. Два скрещенных поляроида расположены на внешней стороне дисплейной панели. Ориентация молекул НЖК задается на внутренней стороне подложек ориентирующими слоями в двух ортогональных направлениях. Вследствие этого в отсутствии электрического поля создается закрученная на  $90^\circ$  структура (твист-структура), осуще-

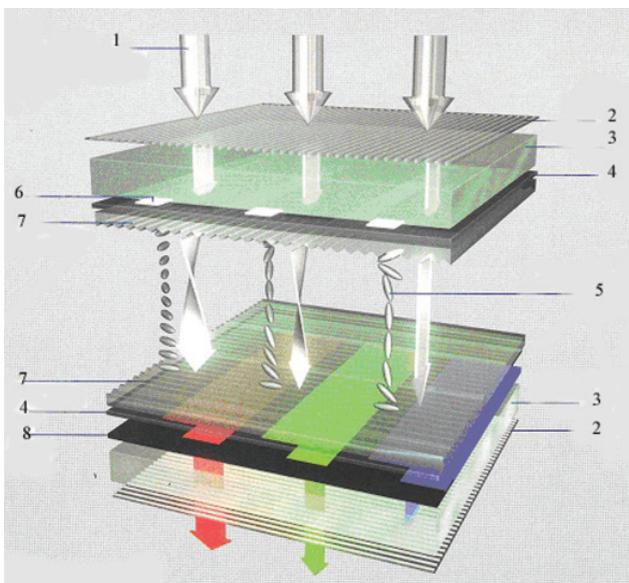


Рис. 8.2. Схема активно-матричного TN дисплея: 1 — поляризованный свет; 2 — поляризатор; 3 — стеклянная подложка; 4 — ITO; 5 — слой НЖК; 6 — TFT; 7 — ориентирующий слой; 8 — цветной фильтр [5]

ствляющая поворот плоскости поляризации на тот же угол. В скрещенных поляроидах свет проходит через такую структуру (светлое поле). При приложении электрического поля ориентация молекул НЖК становится гомеотропной, исчезает двулучепреломление слоя и структура не пропускает свет (темное поле). При повороте анализатора на  $90^\circ$  характер светопропускания меняется на противоположный. Детальное описание прохождения света через TN структуру приведено в главе 4 части 2. Время отклика зависит от толщины ячейки и отношения динамической вязкости к коэффициенту упругости  $K_{22}$  используемой ЖК смеси. Для ячейки толщиной 4 мкм время отклика при комнатной температуре составляет 20–30 мс. При напряжении на ячейке 5 В контрастное отношение равно около 400:1. Эти характеристики позволяют использовать TN дисплеи в ноутбуках. Двулучепреломление слоя НЖК зависит от угла наблюдения. Это приводит к ухудшению качества изображения при увеличении углов наблюдения, что является принципиальным недостатком TN дисплеев. Основные характеристики этих дисплеев приведены в работе [6].

Выявленная асимметричность оптических характеристик пропускания и ограниченность углов обзора привели к развитию новых ЖК технологий. Тем не менее, благодаря простоте, высокой яркости и небольшому времени отклика TN дисплеи получили широкое практическое применение.

Для обеспечения больших углов обзора было разработано несколько модификаций ЖКД: супертвистовые (STN), мультидоменные TN, дисплеи на поверхностно стабилизированных хиральных смектиках (SSFLC), на антисегнетоэлектрических смектиках (AFLC) и дисплеях с оптической компенсацией двулучепреломления (OCB) [7–12].

#### *Дисплеи на основе супертвист-эффекта*

Первые супертвистовые экраны для автономных компьютеров с пассивной адресацией появились в 1985 г. [7, 8]. Цветные STN дисплеи с пассивной адресацией стали использовать в миниатюрных компьютерах вместо оптически более совершенных, но более дорогих STN TFT дисплеев. Методами компьютерного моделирования было показано, что крутизну электрооптической характеристики, определяющей контраст, можно резко повысить, увеличив угол закрутки с  $90^\circ$  до  $180^\circ$ – $270^\circ$ . Оптимальные углы закрутки лежат в диапазоне от  $210^\circ$  до  $270^\circ$  и получаются внесением в нематик хиральной добавки. Сравнение контраста от угла поля зрения для твистового и супертви-

стового дисплеев показано на рис. 8.3. Как следует из рисунка, STN дисплей обладает большим углом обзора и более симметричной формой этой характеристики. Исследование электрооптических характеристик показало их существенную зависимость от угла поворота поляризатора  $\beta$ , угла наклона  $\alpha$ , шага спирали  $p$ , толщины ячейки  $d$ , диэлектрических параметров  $\gamma = \Delta\epsilon/\epsilon_{\perp}$  и отношения констант упругости  $K_{33}/K_{22}$  и  $K_{22}/K_{11}$ . Оптимальные углы наклона лежат в диапазоне от  $5^{\circ}$  до  $10^{\circ}$ .

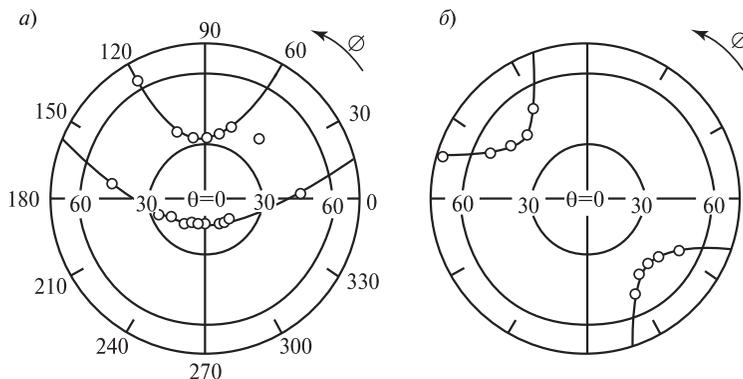


Рис. 8.3. Зависимость контраста от угла наблюдения для твистового (а) и супертвистового дисплеев (б) [7]

Ячейки с оптимальными значениями  $\alpha$  и  $\beta$  в мультиплексном режиме осуществляют адресацию к 240 линиям. Крутая электрооптическая характеристика ограничивает число градаций шкалы серого  $g$ , поскольку малый уровень  $r$  адресуемого напряжения приводит к малому отношению  $r/g$  на градацию. Супертвистовая ячейка с углом закрутки  $210^{\circ}$  имеет по сравнению с ячейкой с углом  $270^{\circ}$  более пологую электрооптическую характеристику, позволяющую проще в режиме мультиплексирования 100:1 обеспечивать 16 градаций серого. STN ячейки имеют следующие недостатки: требуется высокая точность обеспечения величины зазора; необходимо строго обеспечивать требуемые углы наклона директора к подложке по всей ее поверхности; светопропускание в видимом диапазоне зависит от длины волны; большие времена отклика (300–400 мс). Эти недостатки в значительной степени удалось преодолеть при использо-

вании твист-эффекта с поперечным приложением электрического поля (IPS).

*Дисплеи на основе твист-эффекта с поперечным приложением электрического поля*

Для обеспечения больших углов обзора была предложена схема с поперечным направлением приложенного электрического поля. Она нашла применение в TFT ЖКД в 1992 г. [9]. Встречно-штыревые электроды размещены на одной подложке и создают поперечное азимутальное краевое поле, вызывая поворот директора в плоскости (рис. 8.4). Эта схема управления получила название IPS (переключение в плоскости). На этом же рисунке приведена схема модифицированного варианта — FFS (с краевым электрическим полем). В ней для увеличения светопропускания IPS ячейки было предложено изготовить зазоры между электродами меньше (до 1 мкм). В этой ячейке, в отличие от IPS ячейки, величина зазора  $L$  меньше, чем толщина ячейки  $d$ . Это приводит к увеличению области твиста и росту пропускания. В главе 4 части 2 рассмотрены физические механизмы, определяющие режимы пропускания света данной структурой.

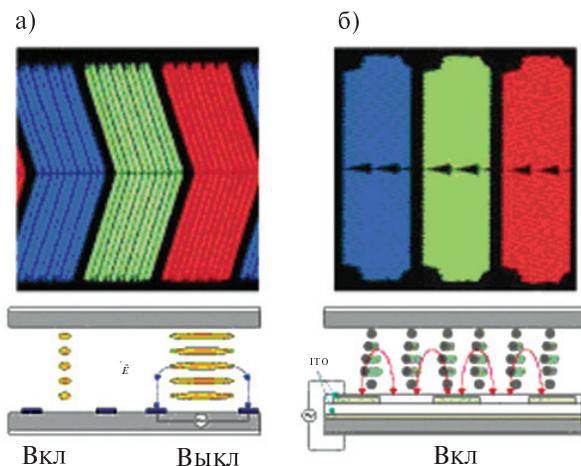


Рис. 8.4. Микроскопические (вверху) и схематические (внизу) изображения пикселей в структурах IPS (а) и FFS (б) [4]

Пропускание света по нормали к однородно ориентированному слою ЖК определяется формулой:

$$T = T_0 \sin^2[2\theta(V)] \sin^2[\pi d \Delta n(V)/\lambda], \quad (8.1)$$

где  $\theta$  — угол между оптической осью ЖК слоя и направлением поляризации;  $V$  — напряжение;  $d$  — толщина слоя;  $\Delta n$  — оптическая анизотропия;  $\lambda$  — длина волны света.

В IPS структуре угол  $\theta$  и пропускание света управляется электрическим полем. При ориентации молекул ЖК параллельно плоскости поляризации света в параллельных поляроидах свет не проходит (темное состояние). Угол  $\theta$  изменяется с увеличением поля и управление пропусканием (градации серого) достигается согласно формуле (8.1). Градации серого определяются только углом  $\theta$ . В уравнении (8.1) первый член  $T_0 \sin^2[2\theta(V)]$  нечувствителен к направлению наблюдения, поскольку молекулы переориентируются параллельно подложке. Вследствие этого структура IPS оказывается менее чувствительной к углу обзора, чем TN, что позволяет эффективно применять ее при больших углах обзора. Второй член, содержащий  $\Delta n$  и  $\lambda$ , слабо зависит от изменения электрического поля: при наблюдении по одной диагонали изображение приобретает желтизну, по другой — голубизну. Для компенсации этого цветового сдвига пикселям придается форма шевронов с тупыми углами (рис. 8.4а). Такая структура получила название супер IPS (S-IPS). FFS содержит два слоя прозрачных электродов, один из которых представляет собой сетку электродов, создающих краевые электрические поля (рис. 8.4б). Эти поля осуществляют переориентацию молекул ЖК во всей области пикселя, включая ЖК на прозрачном электроде. По сравнению с IPS структурой, имеющей непрозрачные металлические электроды, FFS обладает более высоким пропусканием из-за большей апертуры и наличия краевого поля. Изготовление FFS структуры требует как минимум одной дополнительной фотолитографической операции.

Углы обзора FFS и IPS структур мало отличаются друг от друга, но значительно больше, чем в случае TN [11].

#### *Дисплеи на основе мультидоменных вертикально ориентированных структур*

В дисплеях с вертикальной ориентацией молекул (VA) используются НЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией [12]. В отсутствие электрического поля данная структура не пропускает

свет. При приложении электрического поля молекулы переориентируются, структура пропускает свет согласно уравнению (8.1). В этом случае зависимость светопропускания от поля определяется не углом  $\theta$ , а эффективным двулучепреломлением  $\Delta n(I)$ , чувствительным к направлению наблюдения VA структуры. Эти структуры, предложенные в 1971 г., не имели большого угла обзора и не нашли практического применения. В 1990-х гг. основные недостатки VA были преодолены за счет использования мультидоменных структур и компенсационных пленок [13, 14]. Это позволило обеспечить углы обзора по вертикали и горизонтали до  $160^\circ$  в ЖКД с TFT, высокое контрастное отношение и малые времена переключения. Схемы переключения и сравнительные характеристики дисплеев TN, IPS и VA приведены на рис.8.5 и в таблице 8.1. В TN ЖКД даже при подаче максимального напряжения молекулы ЖК ориентированы не совсем перпендикулярно подложкам (рис. 8.5а). Поэтому структура не становится полностью темной. Кроме того, при подаче промежуточного напряжения различные полярные ориентации молекул создают различные изображения для разных углов наблюдения. Это приводит к тому, что наблюдатель под всеми углами (за исключением нормали) видит недостаточно четкое и правильное изображение. В IPS ЖКД молекулы поворачиваются параллельно подложкам при любых значениях напряжения, что устраняет проблему малых углов наблюдения, вызванную наличием полярных

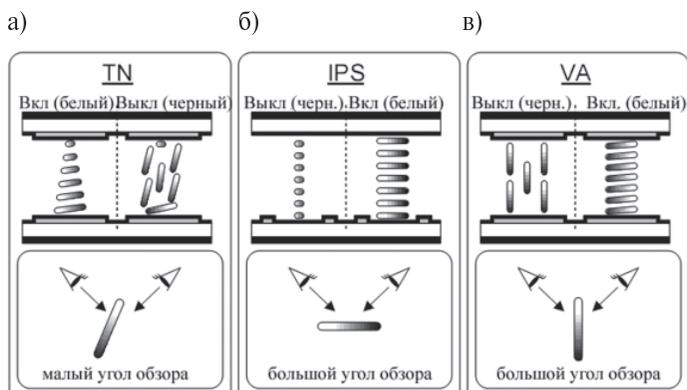


Рис. 8.5. Схемы переключения в различных дисплеях:  
а — TN, б — IPS, в — VA [14]

углов ориентации молекул. Однако времена переключения этих структур не являются удовлетворительными, поскольку переориентация молекул происходит при воздействии слабых полей, создаваемых парой планарных электродов. В VA ЖКД в отсутствие поля все молекулы, включая находящиеся на подложке, ориентированы вертикально, и тогда свет при скрещенных поляроидах полностью не проходит. Наблюдатель под разными углами видит темное поле. Достоинством данного дисплея является малые времена переключения, обусловленные в отсутствие твистовой структуры простым переключением ориентации из вертикальной в горизонтальную.

Таблица 8.1

### Сравнительные характеристики дисплеев [13]

TN	IPS	VA
Низкие управляющие напряжения; малые углы обзора	Очень большие углы обзора; большие времена переключения; низкая яркость	Большой контраст; большие углы обзора; малые времена переключения

В традиционной монодоменной VA технологии однородный наклон молекул обеспечивает получение промежуточных градаций серого (рис. 8.6а). В связи с однородной ориентацией молекул яркость зависит от угла наблюдения. При наблюдении по нормали из-за наклона молекул проходит только часть света вследствие эффекта двулучепреломления. Если наблюдать ячейку в направлении наклона молекул, то двулучепреломление исчезает и видно темное поле. При наблюдении в направлении нормали к наклону, двулучепреломление достигает максимума, и яркость становится наибольшей. С целью устранения зависимости яркости от угла наблюдения была разработана мультидоменная технология. На рис. 8.6б показана структура с одинаковым наклоном молекул влево и вправо. При малых размерах этих доменов однородная яркость создается для широких углов обзора. Математическое моделирование показало, что для оптимизации таких оптических характеристик как контрастное отношение, цветность, яркость для различных углов следует иметь, по крайней мере, четырех доменную структуру.

Для формирования четырех доменных структур использовались два способа: создание выступов (MVA) или впадин (PVA) на электродах, обеспечивающих наклон молекул на подложке. Технологии

получения S-PVA и MVA структур описаны в работах [15, 16]. Особенностью этих технологий является отсутствие операции натирания, что упрощает изготовление и делает MVA TFT более стабильными. На рис. 8.7 приведена схема с выступами.

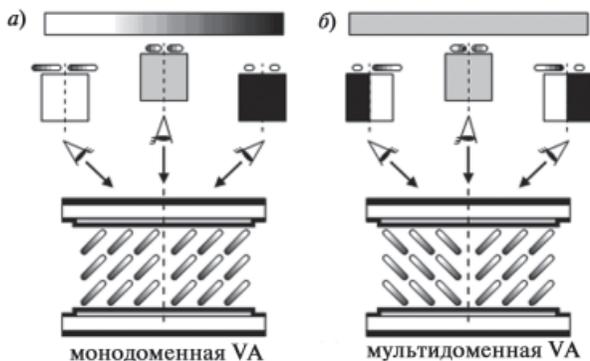


Рис. 8.6. Моно- (а) и мультидоменная (б) ориентации [14]

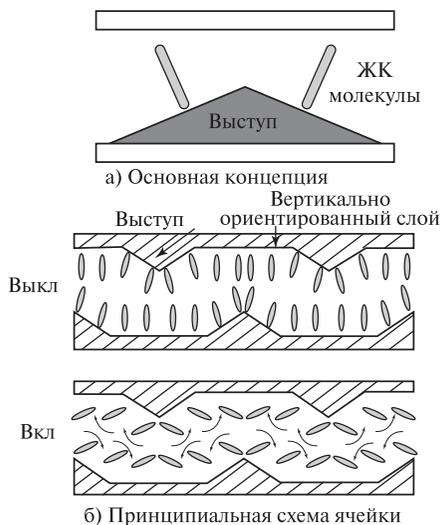


Рис. 8.7. Принцип работы MVA ЖКД [14]

Этот способ обеспечивает надежное формирование доменов, поскольку наклонные электрические поля совпадают с соответствующей ориентацией молекул на поверхностях выступов. В этом случае наблюдается две ориентации молекул ЖК, формирующих два домена с противоположными визуальными характеристиками. Это приводит к созданию ячейки с широким углом обзора. Технология позволяет за счет изменения конфигурации и периодичности выступов на обеих подложках легко менять параметры доменов. С использованием выступов шевронной конфигурации была создана четырех доменная структура MVA ЖКД [13]. Характеристики углов обзора этой структуры симметричны для вертикального и горизонтального направлений и составляют величину более  $160^\circ$ ; в диапазоне этих углов контрастное отношение — 30:1 (рис. 8.8).

В мультидоменных ЖКД не наблюдается инверсии градаций шкалы серого, что решает главную проблему в обеспечении качества изображения. Дальнейшее совершенствование дисплеев было связано с разработкой супер-PVA структуры (S-PVA) с восемью суб-доменами (рис. 8.9с) [4].

Для обеспечения плотности черного в изображении под углом к нормали в диагональном направлении для TN, IPS и VA дисплеев используют компенсирующие пленки. Теоретический анализ возможности увеличения углов обзора с их помощью, основанный на использовании сферы Пуанкаре, приведен в работе [17]. На рис. 8.10

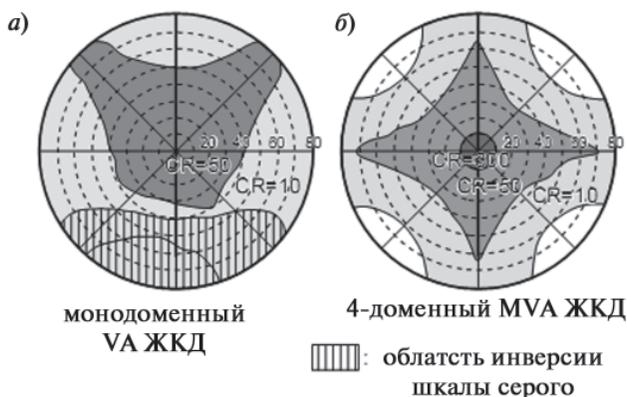


Рис. 8.8. Углы обзора VA и MVA ЖКД

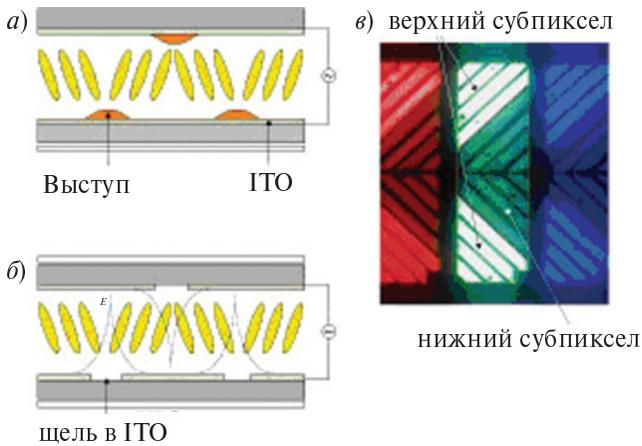


Рис. 8.9. Структуры MVA (а), PVA (б) и микроскопическое изображение восьми доменной структуры (в) [4]

показаны изоконтрастные кривые для TN дисплеев без компенсирующей пленки и с ней. По направлению нормали TN дисплей обеспечивает высокое контрастное отношение, однако оно резко уменьшается по направлению вверх и по диагонали вниз. По вертикали вниз контрастное отношение остается высоким, однако шкала серого испытывает инверсию (не показано на рис. 8.9). Использование однородной по фазе компенсационной пленки не позволяет

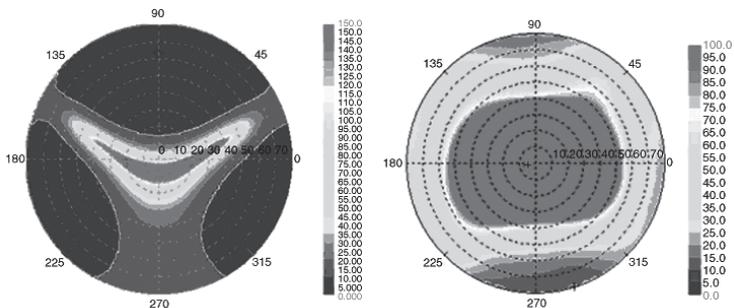


Рис. 8.10. Изоконтрастные кривые для TN дисплеев без (слева) и с (справа) компенсирующими пленками [18]

внести корректировку в верхнюю и нижнюю части одновременно. Поэтому используют две пленки для верхней и нижней части. Фирма Fuji Photo разработала пленки на основе дискотических ЖК для расширения угла обзора [18].

В IPS дисплеях максимальный полярный угол, при котором контрастное отношение между белым и черным превышает 10:1, равен  $60^\circ$ . Этот недостаток можно устранить использованием двусосных компенсирующих z-пленок с эллиптически изменяющимся показателем преломления  $n_x > n_z > n_y$  и  $(n_x - n_z)/(n_x - n_y) \approx 0,5$ , где z — ось, направленная по нормали к пленке, x и y — оси в плоскости пленки [19]. В VA дисплеях применение компенсирующих пленок позволяет при том же контрасте увеличить угол до  $89^\circ$ .

Завершая рассмотрение ЖКД с большими углами обзора, отметим использование для той же цели эффекта «гость–хозяин». При добавлении в нематик флуоресцентного красителя удалось создать TN дисплей, обладающий также эмиссионными свойствами с углом обзора почти до  $180^\circ$  [20]. Эта технология пока не получила развития, однако не исключена возможность ее использования в будущем.

В последние годы разработаны дисплеи с управляемым углом обзора [21]. Изменяемый угол обзора обеспечивает дополнительные возможности при отображении информации: защиту персональной информации от нежелательного просмотра посторонними лицами и обеспечение одновременного восприятия сразу двух изображений наблюдателями, находящимися справа и слева от экрана. Для защиты персональной информации используется переключение режима просмотра с широким углом обзора к режиму с узким углом обзора. С этой целью в дисплеях с широким углом обзора используют дополнительные оптические элементы, уменьшающие углы обзора. Они осуществляют либо сужение контрастной угловой характеристики, либо блокируют свет в направлениях, отличных от нормали. Разработаны различные технологии: использование фильтра на основе ЖК модулятора с эффектом управляемого двулучепреломления; использование двух фильтров (управляемого оптического компенсатора и светорассеивателя); применение матричного ЖК модулятора, а также встроенных трехэлектродных систем управления угловой характеристикой. Перечисленные технологии подробно описаны в работах [21, 22].

#### *Способы улучшения характеристик дисплеев прямого видения*

Для улучшения качества изображения ЖКД необходимо увеличивать угол обзора, уменьшать смазывание изображения, повышать

контраст и расширять цветовую гамму. Пути увеличения углов обзора были рассмотрены выше. Качество изображения движущихся объектов определяется временем отклика ЖК, связанного с поворотом молекул, и временем формирования кадра на экране, обновляемого с определенной частотой. Время поворота молекул ЖК составляет десятки миллисекунд, что сопоставимо со временем обновления кадра. Для уменьшения времени отклика необходимо оптимизировать выбор ЖК материала, толщину ячейки, конструкцию пикселя, форму электрода и режимы управления. ЖК материалы выбираются с минимальной вязкостью. Время отклика  $\tau$  также определяется приложенным напряжением:  $\tau \sim 1/(V_{пр} - V_{п})^2$ , где  $V_{пр}$  — приложенное к ячейке напряжение;  $V_{п}$  — пороговое напряжение. Для IPS дисплеев ЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  имеют вязкость 50–60 мпз; для VA дисплеев — 100–110 мпз. Толщина слоя ЖК в IPS дисплее — менее 4 мкм, в VA дисплее — 10 мкм, поэтому времена их отклика примерно равны. Оптимизация режимов управления для TFT-ЖКД описана в работе [23]. Для VA дисплеев время отклика также можно уменьшить заданием преднаклона молекул ЖК [24]. Использование методов импульсного управления задней подсветкой и увеличение частоты обновления кадра позволили обеспечить уменьшение смазывания и мелькания движущихся объектов до уровня ЭЛТ.

Контрастное отношение, определяемое как отношение освещенностей светлого и темного, является одним из основных критериев качества изображения. Типичные телевизионные ЖКД имеют яркость примерно 500 кд/м<sup>2</sup> и контрастное отношение 1000:1. Это означает, что яркость темного поля равна 0,5 кд/м<sup>2</sup>, что недостаточно темно для черного изображения. Недавно для IPS дисплеев было получено за счет улучшения процесса натирания и использования материалов с малым светорассеянием контрастное отношение 1500:1. В VA дисплеях очень темное состояние достигнуто в отсутствии поля в связи с нулевой фазовой задержкой. В MVA из-за наклона молекул в области выступов происходит рассеяние света, поэтому для его уменьшения выступы должны иметь плавную форму. В PVA, имеющих впадины в токопроводящем слое, светорассеяние мало и контрастное отношение достигает значений 10000:1. Определенные резервы для увеличения контраста имеются в уменьшении размеров частиц цветовых пигментов и уменьшения отражения света от поверхности поляризаторов. Уменьшением яркости темных и увеличением яркости светлых зон в изображении контрастное отношение может быть увеличено до 150000:1 и даже 1000000:1

при использовании флуоресцентных ламп с холодным катодом и светодиодов соответственно.

К общим недостаткам дисплеев прямого видения относится утомляющий взгляд серый фон, особенно при низком внешнем освещении. Этот недостаток можно в значительной степени устранить введением в ЖК флуоресцентного красителя, который превращает ЖКД в частично излучающий в угле  $180^\circ$ . Эффект был экспериментально подтвержден при использовании красителей из ряда перилена [25].

Одной из проблем в обеспечении качества изображений является точное воспроизведение цветов. Задача решается использованием цветных фильтров и источников задней подсветки с определенными спектральными характеристиками. Основой фильтра является подложка с наполнителем в виде красителя, цветовые характеристики которого определяют качество изображения. В последнее время используемые в дисплеях красители были заменены цветовыми пигментами, обладающими большей тепловой стойкостью и долговечностью. Однако оказалось, что они могут образовывать молекулярные скопления размером до нескольких сотен нанометров, которые вызывают светорассеяние и уменьшение контрастного отношения. Поэтому разработчики вновь обратились к использованию красителей с улучшенными характеристиками по светопропусканию. Кроме того, к производству дисплеев стали предъявляться требования по использованию экологически безопасных «зеленых» технологий, ограничивающих применение вредных материалов. Перспективными являются новые технологии с печатными операциями вместо фотолитографии и потребляющие меньшую энергию. Одним из таких направлений является создание бистабильных дисплеев.

#### *Бистабильные дисплеи*

Бистабильные дисплеи (БЖКД) привлекли внимание разработчиков за возможность сохранять изображение после переключения без расходования энергии и сверхмалую потребляемую энергию, например, от миниатюрных солнечных батарей. Они не нуждаются в использовании TFT для управления, имеют низкую стоимость и могут быть изготовлены на гибких подложках без ухудшения качества изображений [26]. В БЖКД используются эффекты объемной и поверхностной бистабильности в ЖК. Объемный бистабильный эффект был впервые изучен в ХЖК [27]. При отсутствии поляризаторов планарная структура ХЖК эффективно отражает свет, а при переключении под действием электрического поля в конфокальную

структуру становится прозрачной (рис.8.11а, б). Максимум отражения происходит на длине волны, равной шагу холестерической спирали (рис.8.11в). Достоинством дисплея является высокий коэффициент отражения (до 40% для монохромного излучения), низкая стоимость и отсутствие мельканий при отображении информации. Бистабильные отражательные дисплеи на ХЖК не нуждаются в задней подсветке [28]. К недостаткам относятся малое быстродействие, сложность получения цветного изображения, уменьшение контраста при механических воздействиях и необходимость использования специальных схем управления. В [29] описан бистабильный дисплей на ХЖК со структурой, стабилизированной полимером. Оптимизации параметров отражательных бистабильных ХЖК с низким управляющим напряжением посвящена работа [30].

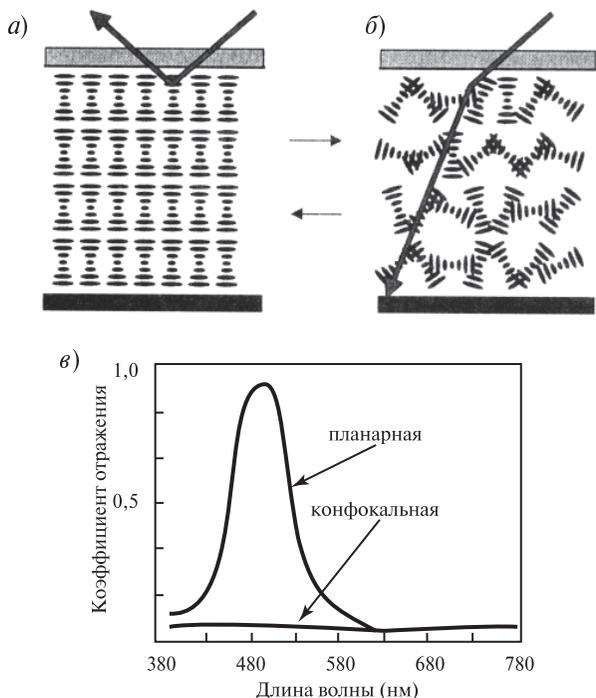


Рис. 8.11. Объемная бистабильность в холестерике: *а* — планарная рассеивающая структура; *б* — конфокальная прозрачная структура; *в* — зависимость коэффициента отражения от длины волны

Эффекты бистабильности в НЖК описаны ранее (гл. 4, часть 2). Бистабильное переключение моды продольного изгиба к моде поперечного изгиба в НЖК происходит при большом угле наклона ( $45^\circ$ ), оптимальном выборе констант упругости ЖК и его толщины. При этих условиях обеспечивается объемная зенитальная (полярная) бистабильность [31]. Технически это достигается использованием наклонных поверхностей подложки. Недостатком является невозможность мультиплексирования.

Бистабильная твист-ячейка в НЖК впервые была описана в работе [32]. Она отвечала основным требованиям, предъявляемым к пассивным матричным дисплеям с малой потребляемой энергией. ЖК материалом был нематик с хиральной добавкой для обеспечения отношения толщины зазора к шагу закрутки  $d/p = 0,5$ . Подложки натирались в противоположных направлениях для создания на них одинакового угла наклона. При этих условиях возможно возникновение твистовых структур с закруткой  $360^\circ$  [7, 33, 34] и  $180^\circ$  [35], показанных на рис. 4.15. В первом случае обеспечиваются малые времена переключения (30 мс при напряжении 20 В) и малые напряжения (1,5 В). К недостаткам относится невозможность запоминания изображения и необходимость обеспечения малого зазора в 1,5 мкм с точностью 50 нм. Во втором случае достигается высокий контраст и возможно запоминание изображения в отсутствии напряжения. Необходимо обеспечивать малый зазор в 1,5 мкм, избегать опасной зоны ориентации и жертвовать шкалой серого. Указанные ограничения исключают использование гибкой подложки. Областью применения могут быть дисплеи для мобильных телефонов. В работе [36] описан эффективный способ бистабильного переключения двухчастотного нематика.

ЖКД на основе поверхностной бистабильности нематика основаны на азимутальной или зенитальной переориентации молекул (рис. 4.16, а, б). В первом случае используется монокристаллическая поверхность с би-решеткой, нанесенной в двух ортогональных направлениях. Во втором случае – монорешетка с одним направлением. Азимутальная бистабильность поверхности за счет флексоэлектричества приводит к возникновению мод продольного или поперечного изгиба [37]. Достоинством структур является большой угол обзора, недостатками — слабый флексоэлектрический эффект, возможная азимутальная разориентация и сложность контроля профиля поверхности. Рельефная поверхность, покрытая ориентирующим слоем для создания гомеотропной ориентации, может создавать наклонные бистабильные структуры, когда оптимизированы шаг и глубина кана-

вок [38]. Рельеф получают контактной фотолитографией, методом интерференции, механическим натиранием. Различная ориентация осуществляется в зависимости от глубины профиля: возникает различие в упругой энергии слоев ЖК (рис. 4.17а, б). Это позволяет создать два типа устройств с устойчивым сохранением изображения при обычных размерах зазора (5 мкм для 1-го максимума, 10 мкм — для второго при допуске  $\pm 0,2$  мкм), с коэффициентом отражения 35% и возможностью мультиплексирования. Дисплеи не нуждаются в TFT, используют малое напряжение и могут изготавливаться на гибкой полимерной подложке. Недостатками являются ограниченный диапазон шкалы серого и малое быстродействие для отображения движущихся объектов. Описанная технология из-за низкой стоимости перспективна для применения в автономных переносных устройствах: мобильных телефонах, электронных записных книжках и книгах.

При создании бистабильных дисплеев на С\*ЖК, возможны две модификации (рис. 8.12) [39]. Дисплеи первого типа имеют высокую яркость и просты в изготовлении. Но они требуют высокого

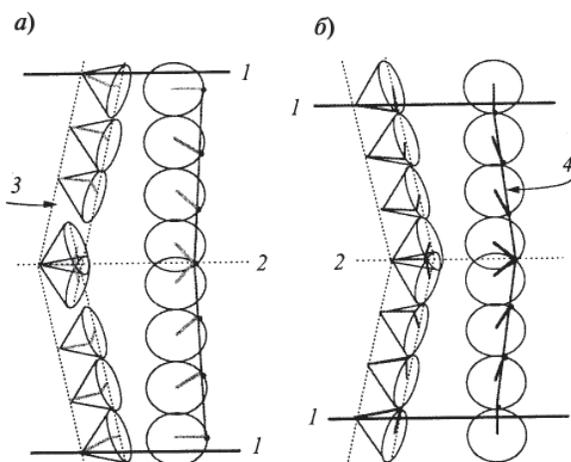


Рис. 8.12. Бистабильные модификации в С\*ЖК: а — структура с углом наклона слоев, совпадающим с углом наклона молекул на поверхности; б — структура с углом наклона слоев, ортогональным приповерхностному наклону молекул: 1 — поверхность; 2 — граница шевронов; 3 — смектические слои; 4 — угол закрутки директора

напряжения, имеют невысокое быстродействие и вызывают двойные изображения. Дисплеи второго типа обладают большим быстродействием и требуют меньшего напряжения.

Для получения высокой яркости требуется стабилизация напряжения и использование специальных приемов ориентации. В полноцветном макете разработки фирм Sharp и Dega с диагональю 17" достигнута высокая скорость и разрешение (720×916) после отладки технологии ориентации и обеспечения малого зазора (1,5 мкм). Дисплеи этого типа без принятия специальных мер чувствительны к ударам и имеют узкий температурный интервал эксплуатации (70°С). Бистабильные дисплеи на основе С\*ЖК с малым шагом описаны в работе [40]. Перспективно применение бистабильных дисплеев в качестве модуляторов для маломощных лазеров, индикаторов мобильных телефонов, электронных книг и записных книжек.

Оценивая перспективы развития дисплеев прямого видения, следует ожидать повышения их быстродействия для многофункциональных персональных компьютеров и цифрового ТВ. Времена переключения должны быть менее 5 мс, что почти в 3 раза меньше времени переключения современных дисплеев. Ожидается создание более информативных дисплеев (A-NIC LCD) с размерами пикселей порядка 126 мкм и промежутком 42 мкм. Такие пиксели должны быть более быстродействующими при малых напряжениях и обладать эффектом памяти. С помощью атомно-силового микроскопа уже создан пиксель размером в 1 мкм и получено черно-белое изображение на ЖК со сверхвысоким разрешением [41].

## **8.2. Отражательные жидкокристаллические дисплеи прямого видения**

Разработаны два типа отражательных дисплеев (ОЖКД): прямого видения и проекционные. В дисплеях прямого видения для считывания информации используется внешний свет, в проекционных – дуговые лампы или яркие светодиоды для проецирования изображения на большой экран. Дисплеи прямого видения обычно применяются в игровых приставках, для рекламы и некоторых мобильных телефонах. Отражательные дисплеи малых размеров (ЖК микродисплеи) перспективны для создания больших информационных экранов при проекции и отображении виртуальной информации.

В ОЖКД используется несколько механизмов модуляции света. Они могут быть классифицированы по числу используемых поляри-

заторов, что существенно определяет светотехнические характеристики устройства. В ЖК ячейке, расположенной между двумя ортогонально ориентированными линейными поляризаторами, используется твистовый нематик с закруткой на  $90^\circ$ . Такая структура широко применялась в просветных дисплеях благодаря высокой световой эффективности, малым цветовым искажениям, высокому контрастному отношению и низкому управляющему напряжению. Основные характеристики TN дисплея и его модификаций подробно рассмотрены в главе 4. В ОЖКД используется ряд электрооптических эффектов: MTN – комбинация эффектов вращения плоскости поляризации и двулучепреломления; супертвист (STN); изменение фазовой задержки в гомеотропной или гомогенной ячейке. При использовании поляризатора достигаются высокое контрастное отношение и насыщенные цвета, но при этом ухудшается светопропускание. В случае использования эффектов поглощения («гость–хозяин»), рассеяния света в PDLC и брэгговского отражения в ХЖК поляризаторы не требуются. Высокая яркость и большой угол обзора являются достоинством таких дисплеев, однако контрастное отношение для них не превышает величины 10:1. Мы ограничимся рассмотрением наиболее перспективных типов ОЖКД: отражательного дисплея на ХЖК и структур с вертикальной ориентацией (VA), с планарной ориентацией и компенсирующей пленкой, а также твистового нематика (MTN). Свойства отражательных дисплеев, основанных на других электрооптических эффектах, описаны в монографии [42] и обзоре [43].

Схема отражательного дисплея на эффекте брэгговского отражения в ХЖК приведена на рис. 8.13. Планарная структура холестерика

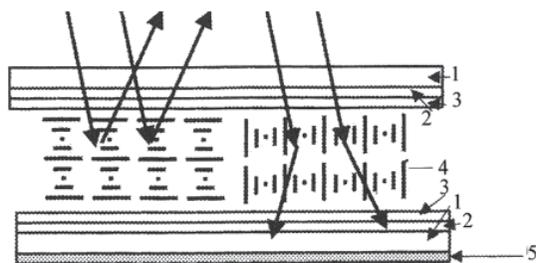


Рис. 8.13. Схема отражательного дисплея на ХЖК: 1 — подложка; 2 — прозрачные электроды; 3 — ориентирующие слои; 4 — слой ЖК; 5 — цветной поглощающий слой

вызывает брэгговское отражение света определенной длины волны. При приложении напряжения она переходит в конфокальную структуру и рассеивает свет. Для достижения высокого контраста необходимо, чтобы обратное рассеяние света от конфокальной структуры было минимальным. Для этого на заднюю подложку наносится цветной поглощающий слой. Для черно-белого дисплея используется черный поглощающий слой. Дисплей дает яркий цвет в случае планарной структуры ЖК и выглядит черным, когда структура конфокальная. Для белого дисплея используется цветной поглощающий слой. Например, ЖК с планарной структурой отражает желтый цвет, а поглощающий слой – синий, и дисплей выглядит белым.

В случае конфокальной структуры только синий цвет отражается от поглощающего слоя и ЖКД выглядит синим. Отражение ХЖК зависит от толщины ячейки. Для планарной структуры достаточна толщина в 3 мкм. Для обеспечения насыщенного отражения для ЖК с  $\Delta l \geq 0,2$  также рекомендуется толщина 3 мкм. Для ХЖК на основе PDLC — толщина 5 мкм. В полимерстабилизированных бистабильных ХЖКД холестерик смешивают с мономером, составляющим несколько процентов по весу. Вязкость смеси невысока, ею заполняют ячейку в вакууме и освещают УФ для фотополимеризации мономера. В поверхностно стабилизированном бистабильном ХЖКД используют либо слабую гомогенную, либо гомеотропную ориентацию. В случае гомеотропной ориентации конфокальная структура выглядит темной и время отклика меньше, хотя отражение от планарной структуры слабее. Недостатком ХЖКД является зависимость длины волны отраженного света от угла наблюдения, что рассмотрено в разделе 2.3.1. Если свет падает на совершенную планарную структуру, то наблюдение возможно только при зеркальном отражении. Эти проблемы частично решаются созданием полидоменной структуры при добавлении в ЖК небольшого количества полимерного материала или нанесении ориентирующего слоя, дающего не высококачественную гомогенную или гомеотропную ориентацию. Несовершенная планарная структура отражает падающие под определенным углом лучи от разных доменов в различных направлениях (рис. 8.14а). Лучи, отраженные от различных доменов, могут сходиться в одной точке (рис. 8.14б). Поскольку наблюдаемый свет представляет собой смесь различных цветов, то цвета, наблюдаемые под разными углами, не сильно отличаются. Полидоменные структуры улучшают углы обзора ХЖКД. Кроме того, добавление полимера и ориентирующие слои стабилизируют конфокальную структуру в отсутствии поля. Дисплеи, стабили-

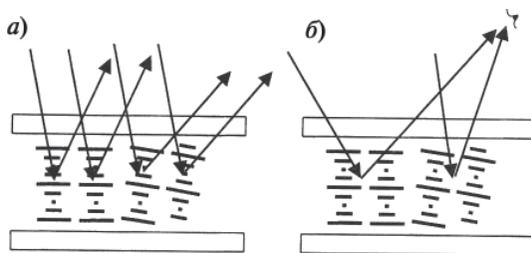


Рис. 8.14. Отражение света от полидоменной планарной структуры [44]

зированные полимером, называют полимерстабилизированными ХЖКД, а стабилизированные ориентирующим слоем — поверхностно стабилизированными ХЖКД.

ХЖКД позволяют обеспечивать градации шкалы серого несмотря на бистабильность структуры холестерика. Это объясняется наличием мультислоистой структуры: при приложении электрического поля разные домены из планарной структуры переходят в конфокальную при различных напряжениях.

В ХЖКД на основе одного холестерика может быть получен только один цвет. Для получения многоцветного дисплея используют три ХЖК с различным шагом спирали, обеспечивающих получение красного, зеленого и синего цветов. Это осуществляется либо использованием трех слоев различных холестериков, либо использованием одного слоя, разделенного на части, с тремя различными по шагу ХЖК [44].

Отражательные дисплеи могут быть созданы на основе ХЖК, диспергированных в полимере. В отсутствие электрического поля структура определяется граничными условиями и размерами капель. Такая структура слабо рассеивает свет. При приложении поля для ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией происходит переход в планарную структуру, отражающую свет. Поскольку величина отрицательной диэлектрической анизотропии обычно мала, необходимо прикладывать высокое напряжение. В малых каплях ХЖК не обладает бистабильностью.

Принципиальная схема отражательного дисплея прямого видения, использующего механизмы изменения фазовой задержки и вращения плоскости поляризации, показана на рис. 8.15. Поляри-

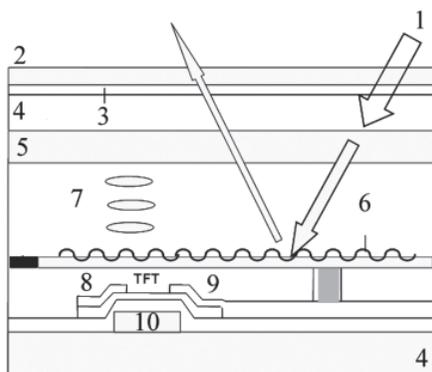


Рис. 8.15. Принципиальная схема ОЖКД прямого видения: 1 — внешний свет; 2 — поляризатор; 3 — пластинка  $\lambda/4$ ; 4 — стекло; 5 — цветной фильтр; 6 — ребристый рефлектор; 7 — слой ЖК; 8 — исток; 9 — затвор; 10 — затвор [44]

затвор и четвертьволновая пластинка являются аналогом скрещенных поляризаторов. Ребристый рефлектор диффузно рассеивает отраженное к наблюдателю излучение. Под рефлектором размещаются элементы TFT. ОЖКД имеет большое апертурное отношение ( $\sim 90\%$ ). Светоблокирующий слой используется для поглощения света от соседних пикселей. В отражательных и полупрозрачных дисплеях применяются три основных типа ячеек: с вертикальной ориентацией (VA), с планарной ориентацией и компенсирующей пленкой, твистовый нематик (MTN) [44].

В ячейках с вертикальной и планарной ориентацией используется эффект фазовой задержки, а в MTN — комбинация эффектов вращения плоскости поляризации и двулучепреломления. В ОЖКД толщина слоя ЖК в два раза меньше, чем в просветных дисплеях, так как свет дважды проходит через этот слой. В полупрозрачных дисплеях используются чаще всего VA ячейки с компенсирующей пленкой, обеспечивающие высокое контрастное отношение и большой угол обзора.

ЖК ячейки с планарной ориентацией не пригодны для просветных дисплеев, поскольку имеют малый угол обзора и недостаточное качество темного фона при отображении цветов. В отражательных дисплеях угол наблюдения эквивалентен двухдоменной ячейке бла-

годаря отражению от зеркала. Для дисплеев с малым экраном требование к широкому углу обзора не являются определяющим, и планарные ячейки могут быть использованы. Для обеспечения темного фона в планарной ячейке используется фазовая компенсационная пленка, устраняющая остаточную задержку, вызванную граничными слоями. Для такого дисплея должно выполняться условие: минимальное значение величины  $d\Delta n = \lambda/4$ . При  $\lambda = 550$  нм величина  $d\Delta n = 137,5$  нм. В зависимости от назначения ЖКД можно выбирать или малую толщину для быстрого отклика, или малое двулучепреломление, определяющую удобную для изготовления толщину ячейки.

Для отражательных дисплеев прямого видения и проекционных используется твистовый нематик (MTN) с углом закрутки от  $45^\circ$  до  $90^\circ$ . В полупрозрачных дисплеях обычно используют MTN ячейки с углом закрутки  $75^\circ$  и  $90^\circ$ . На рис. 8.16 приведены расчетные зави-

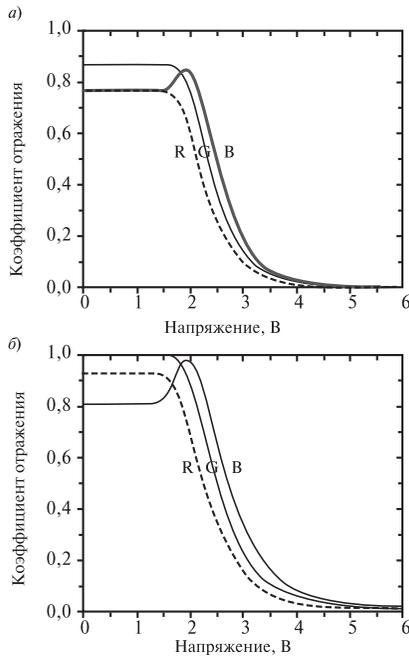


Рис. 8.16. Зависимость коэффициента отражения от напряжения для MTN ячейки с углами закрутки  $90^\circ$  (а) и  $75^\circ$  (б)

симости коэффициента отражения от напряжения для этих MTN ячеек. Моделирование проводилось для смеси Мерк MLC-6694-000 ( $\Delta n = 0,0857$  при  $\lambda = 540$  нм), угол наклона  $2^\circ$ .  $90^\circ$  MTN ячейка имела  $d\Delta n = 240$  нм и угол между направлением поляризации и директором ЖК равный  $20^\circ$ ;  $75^\circ$  MTN ячейка —  $d\Delta n = 250$  нм и угол  $\beta = 20^\circ$ . Для обеих ячеек наблюдается слабая зависимость кривых от длины волны.

При расчете выбирались следующие диапазоны длин волн: R = 620–680 нм, G = 520–560 нм и B = 420–480 нм. Как видно из рис. 8.16а,  $90^\circ$  MTN ячейка имеет хорошее качество черного состояния, однако максимальное отражение составляет только 88%.  $75^\circ$  MTN ячейка имеет отражение около 100%, но темное состояние хуже. Контрастное отношение при 5 В составляет величину 100:1.

Обзор жидкокристаллических материалов, разработанных для дисплеев прямого видения с активно-матричным управлением, приведен в работе [45].

### 8.3. Проекция изображений на большой экран

Для проекции изображений на большой экран применяются различные устройства на основе ЖК: оптически управляемые пространственно-временные модуляторы света (ПМС), жидкокристаллические дисплеи на кремнии (LCOS) и лазерные системы с ПМС и внутренним сканированием.

*Проекция изображений с использованием оптически управляемых пространственно-временных модуляторов света*

Для проекции изображений на большой экран использовались различные электрооптические эффекты в ЖК: твист-эффект, управляемое светорассеяние в ЖК, диспергированных в полимерной матрице (PDLC), и др. На рис. 8.17 приведена оптическая схема с использованием ПМС на нематике для создания проекции [46].

Изображение небольшого размера, получаемое на экране ЭЛТ (7), проецируется на фотополупроводниковый слой с помощью объектива (6) и зеркала (5). Одновременно проекционная лампа (1) осуществляет проецирование возникшего на слое ЖК изображения с усилением яркости на экран (8). Для поглощения той части спектра излучения, к которой фотопроводник наиболее чувствителен, перед проекционной лампой установлен светофильтр (3). Достоинством таких устройств является возможность получения движущихся

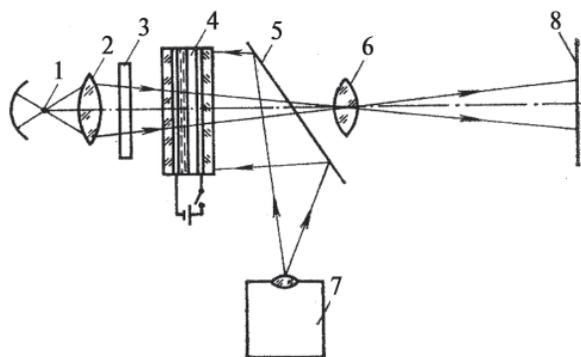


Рис. 8.17. Схема проекции изображения на ПМС на большой экран: 1 — источник света; 2 — линза; 3 — светофильтр; 4 — ПМС на НЖК; 5 — полупрозрачное зеркало; 6 — объектив; 7 — сигнальная ЭЛТ; 8 — экран

изображений с высоким пространственным разрешением. Их основным недостатком является низкая световая эффективность вследствие использования поляризаторов. Этот недостаток может быть устранен использованием ПМС на основе нематика, диспергированного в полимерную матрицу (PDLC) [47, 48] (рис. 8.18).

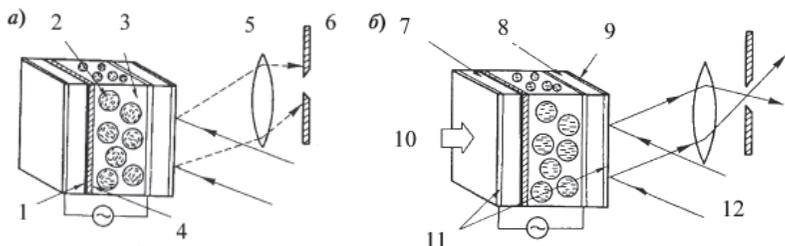


Рис. 8.18. Схема ПМС на PDLC: а — в отсутствие записывающего излучения; б — при наличии записывающего излучения [47]. 1 — светопоглощающий слой; 2 — НЖК; 3 — полимер; 4 — диэлектрическое зеркало; 5 — линза; 6 — диафрагма; 7 — фотопроводник; 8 — стекло; 9 — просветляющий слой; 10 — записывающее излучение; 11 — прозрачные электроды; 12 — считывающее излучение

В этом случае используется эффект управляемого светорассеяния, не требующий использования поляризаторов, что повышает световую эффективность более чем в 2 раза. В отсутствие записывающего излучения 10 диафрагма 6 перекрывает свет, проецируемый на экран. При наличии записывающего излучения изображение с помощью считывающего излучения 12 передается на экран. Устройство обеспечивает разрешение порядка 50 лин/мм, контрастное отношение 230:1 и температурный диапазон эксплуатации от 10 до 80 °С.

Отражательные ЖКД на кремнии (LCOS) или микродисплеи дают высококонтрастное изображение, иногда создаваемое на большом экране. LCOS используются для создания мнимых изображений в компактных электронных устройствах отображения информации индивидуального пользования и в качестве проекционных дисплеев, в частности, для создания ТВ систем с обратной проекцией. Хотя пространственное разрешение и оптические системы таких устройств различны, используемые в дисплее ЖК на кремнии физические эффекты одинаковы. В качестве примера на рис. 8.19 показана схема дисплея LCOS, разработанного компанией JVC.

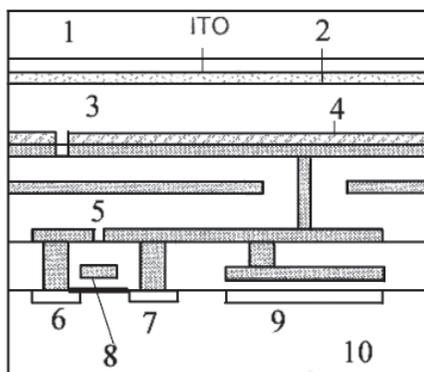


Рис. 8.19. Схема дисплея LCOS: 1 — стекло; 2 — ориентирующий слой; 3 — слой ЖК; 4 — алюминиевый рефлектор; 5 — светоблокирующий слой; 6 — источник; 7 — сток; 8 — затвор; 9 — емкость; 10 — кремниевая подложка [48]

КМОП (CMOS) транзистор и конденсатор формируются и соединяются на нижней кремниевой подложке. КМОП транзистор может обеспечивать работу с большим объемом данных благодаря высокой подвижности электронов в монокристалле кремния. Электронная подвижность  $c$ -Si на два порядка выше, чем в аморфном кремнии  $\alpha$ -Si. Отражающий алюминиевый электрод соединен со стоком транзистора и конденсатором с помощью легкого металлического блокирующего слоя. После чистовой обработки алюминиевое пикселированное зеркало приобретает коэффициент отражения около 91%. Размеры электрода  $13 \times 13$  мкм, расстояние между электродами 0,5 мкм, апертура равна 93%. Экран с разрешением  $1365 \times 1024$  имеет соотношение 4:3 и размер по диагонали 23 мм. Для защиты транзистора от паразитного света, уменьшающего пространственное разрешение и качество изображения, введен светоблокирующий слой. При использовании световой блокировки и термическом охлаждении устройство обеспечивает 15000 лм, требуемых для электронного кино при использовании ксеноновой лампы мощностью 5 кВт. Рассмотрим основные характеристики этих дисплеев.

Микродисплеи на кремнии имеют большую плотность пикселей (100 лин/дюйм), чем дисплеи прямого видения. Для просветных TFT ЖКД на поликристаллическом кремнии размеры пикселей уменьшаются до 20–40 мкм из-за повышения подвижности электронов. Отражательные микродисплеи на КМОП технологии имеют пиксели размером 6–12 мкм, что обеспечивает их плотность более 1000 лин/дюйм. Получаемое изображение по разрешению сравнимо с разрешением киноизображения.

Контрастное отношение для ЖК дисплеев существенно зависит от ориентации молекул. TN ЖКД имеет контрастное отношение 300:1, а гомеотропная ячейка — более чем 1000:1. Время отклика дисплеев прямого видения имеет величину порядка 20–40 мс. В проекционных дисплеях на  $\alpha$ -Si при толщине слоя ЖК 3 мкм характерное время формирования кадра (включение—выключение) составляет менее 16 мс.

#### *Оптические схемы формирования изображений при использовании ЖК дисплеев на кремнии*

Создаваемое микродисплеями изображение мало и для их увеличения разработаны оптические схемы. Схема для получения мнимого изображения в переносных устройствах индивидуального пользования (виртуальный дисплей) приведена на рис. 8.20.

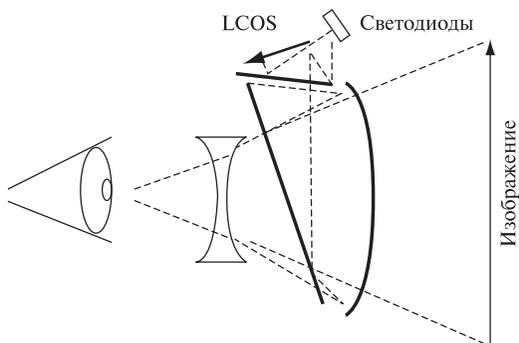


Рис. 8.20. Оптическая схема для получения увеличенного изображения микродисплея на кремнии [49]

Наблюдатель, глядя в небольшой визир, видит увеличенное изображение в плоскости на некотором расстоянии от себя. Светодиоды, излучающие свет трех основных цветов, используются для получения полноцветного изображения. Если дисплей имеет экран с диагональю 12,7 мм и разрешением 800×600 пикселей, то для получения изображения, эквивалентного изображению на экране с диагональю 19", расположенного на расстоянии 2 м, требуемое увеличение должно быть порядка 15×. Для обеспечения частоты смены кадров 85 Гц время включения—выключения должно быть меньше 3,9 мс, что обеспечивается уменьшением толщины слоя ЖК до 1 мкм.

Для проецирования изображения на экран, создаваемого микродисплеями на кремнии, используются более сложные оптические системы. Они должны обеспечивать однородность освещенности по диагонали экрана более 85%. На рис. 8.21 показан пример профессионального проектора на большой экран, использующий 3 отражательных дисплея на кремнии. Охлаждаемое зеркало устраняет нежелательное ИК излучение и отражает свет только в видимом диапазоне. Цветной разделитель лучей направляет свет трех длин волн микродисплеям. X — куб преобразовывает и модулирует RGB лучи, создавая изображение на экране с помощью проекционной оптики. Для упрощения схемы фирмами Philips и OCLI были разработаны две проекционные призмы (рис. 8.22). Устройство фирмы OCLI отличается от разработки фирмы Philips введением двух остроугольных призм. Преимуществом устройства является меньший вес и стоимость.

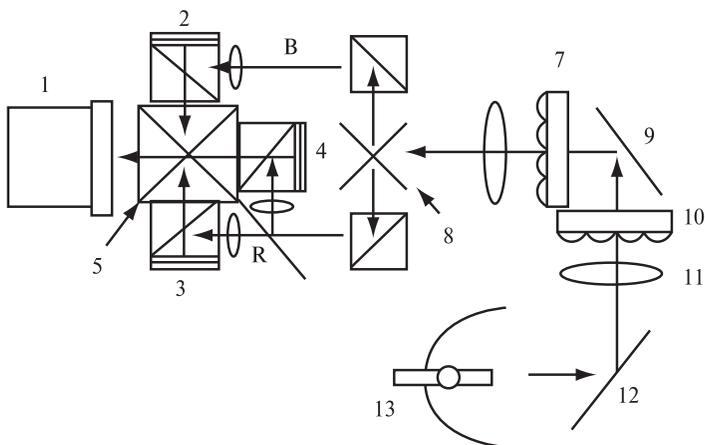


Рис. 8.21. Проекционный дисплей с 3 микродисплеями на кремнии: 1 — проекционный объектив; 2 — синий ЖКД; 3 — красный ЖКД; 4 — зеленый ЖКД; 5 — куб-смеситель; 6 — поляризатор; 7 — комбинированный поляризатор; 8 — цветоделитель; 9 — зеркало; 10 — интегратор; 11 — конденсор; 12 — охлаждаемое зеркало; 13 — лампа [49]

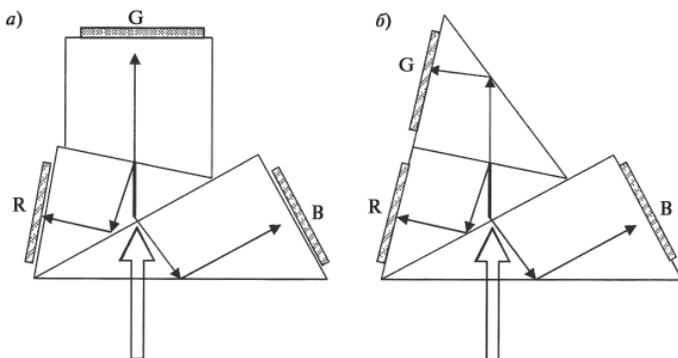


Рис. 8.22. Две призмы для трех ОЖКД: призма фирмы Philips (а) и OCLI (б)

ЖКД, используемые в проекционных системах всех типов, должны иметь повышенную стойкость к большим световым потокам и температуре. Более подробно микродисплеи описаны в обзоре [50].

### *Лазерные проекционные жидкокристаллические дисплеи*

За последние годы были существенно улучшены параметры проекционных дисплеев, которые можно рассматривать как альтернативу квантоскопа. Один из вариантов дисплея, использующего пространственно-временную модуляцию света с помощью ЖК, описан в работах [51–53]. Этот дисплей имеет высокую оптическую эффективность, обеспечиваемую применением лазера с сопряженным резонатором. Одно из лазерных зеркал выполнено в виде пространственно-временного модулятора света (ПМС) на ЖК. Основная идея состоит в объединении работы лазера и ПМС в схеме, позволяющей генерировать яркий оптический сигнал непосредственно в виде изображений, создаваемых на ПМС (рис. 8.23). Лазер содержит сопряженный резонатор с зеркалами 1 и 4 и активную среду 3. ПМС расположен внутри лазерного резонатора как одно из зеркал, например, зеркало 4. Проекционная линза 5 переносит изображение, создаваемое на ПМС, на экран 6. Резонатор работает как оптический ретранслятор, и плоскости зеркал отображаются друг в друга. Это означает, что ПМС осуществляет селекцию мод, что вызывает генерацию либо на одной моде (режим сканирования или адресации), либо на суперпозиции множества мод (режим генерации изображений). Достоинством системы, имеющей несколько

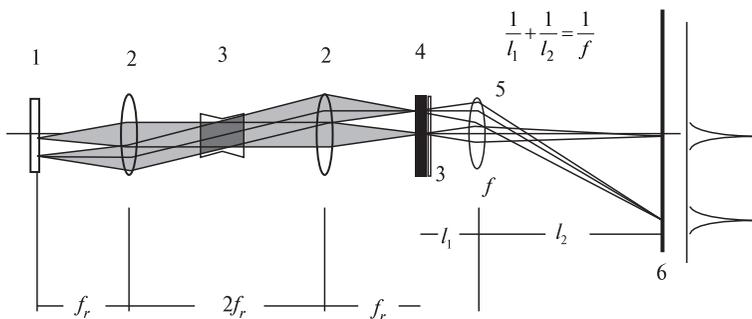


Рис. 8.23. Оптическая схема проекционного лазерного дисплея с ПМС на ЖК: 1 — зеркало резонатора; 2 — линзы; 3 — активная лазерная среда; 4 — зеркало в виде ПМС; 5 — проекционная линза; 6 — экран

модификаций, является высокая оптическая эффективность, поскольку она осуществляет генерацию только необходимого изображения. Эффективность подтверждена результатами экспериментального исследования макета. Устройство не требует охлаждения. При плотности мощности записывающего Nd:YAG лазера с накачкой от лазера на красителе R6G на длине волны 0,4–0,5 мкм  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> плотность мощности считывающего излучения при длительности импульса 20 нс составила  $8 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. ПМС содержал структуру: фотопроводник AsSe и ХЖК. Оптическое разрешение изображения составило более 25 лин/мм.

Одной из областей применения проекционных дисплеев являются тренажеры для обучения управлением транспортными средствами [54]. Принципиальная схема коллимационной оптико-проекционной системы двумерных изображений показана на рис. 8.24. Она содержит экран задней проекции 1, коллимационное (неплоское) зеркало 2, место расположения оператора 3, поляризационный расщепитель пучка 4, поляризатор 5. Проекционный ЖКД 6 может работать с зеркалом 2 на просвет или на отражение. Для обеспечения широкого угла обзора используют несколько проекционных устройств. Несмотря на сложности в решении этих задач, они преодолены, а описанная схема явилась основной для создания тренажеров.

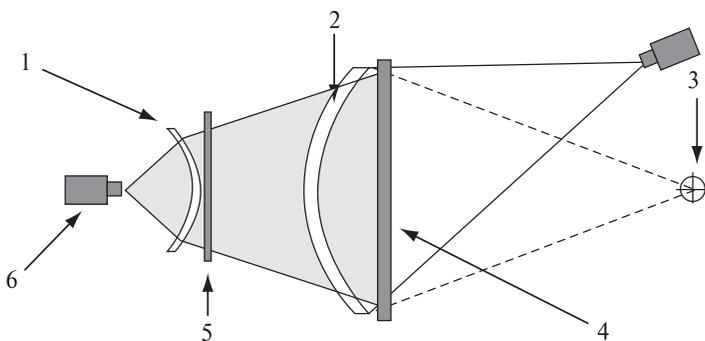


Рис. 8.24. Коллимационная схема проекционной системы для отображения двумерных изображений: 1 — экран задней проекции; 2 — коллимационное (неплоское) зеркало; 3 — место расположения оператора; 4 — поляризационный расщепитель пучка; 5 — поляризатор; 6 — проекционный ЖКД [54]

На рис. 8.25 показан внешний вид широкоугольного многоканального коллимированного тренажера «Панорама» разработки фирмы SEOS с радиусом зеркала 3,3 м;  $220^\circ \times 60^\circ$  [53].

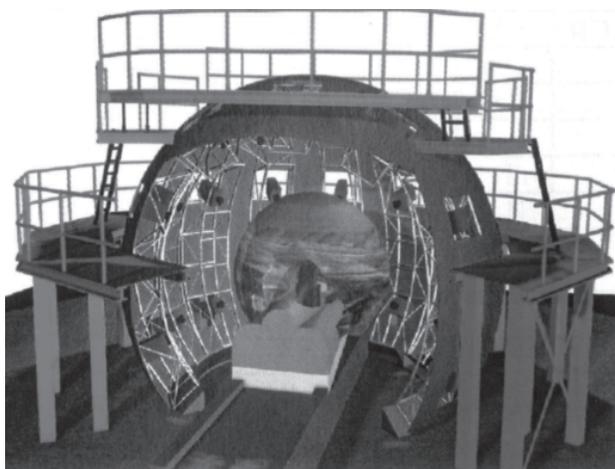


Рис. 8.25. Внешний вид тренажера «Панорама» [52]

К основным типам тренажеров, разработанных компанией SEOS, относятся системы «Продас», «Панорама», «Мидас» и «Лусид», отличающиеся размером экрана, углом поля зрения и количеством проекционных каналов [54]. Подробный анализ проекционных дисплеев приведен в работах [55, 56].

#### **8.4. ЖКД на эластичной подложке**

К новому поколению телевизионных дисплеев с большим размером экрана предъявляется требование существенного уменьшения веса. Также имеется много применений ЖКД, где отображение информации не всегда удобно осуществлять на плоском экране. Это способствует развитию легких дисплеев на эластичной подложке [57–59]. На рис. 8.26 показан переход от традиционной схемы дисплея к ЖКД на эластичной подложке.

Первый матричный дисплей на полимерной подложке, использующий бистабильный эффект в ЖК, был разработан фирмой Фи-

липс. Для создания эластичных дисплеев необходимо было решить ряд проблем, связанных со структурой дисплеев и материалами. В частности, для обеспечения однородности толщины слоя ЖК и его ориентации были использованы специальные спейсеры (полимерные стенки или волоконные элементы) (рис. 8.27). Для отображения быстро движущихся объектов использовался С\*ЖК, диспергированный в полимерную матрицу. Этот композит помещался между скрещенными поляризаторами и ламинировался вместе с эластичной пленкой задней подсветки.

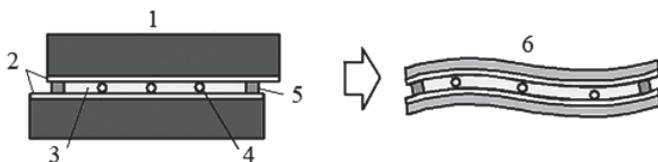


Рис. 8.26. Переход к дисплеям на эластичной подложке: 1 — стеклянная подложка; 2 — прозрачные электроды; 3 — слой ЖК; 4 — спейсер; 5 — герметик; 6 — полимерная подложка [57]

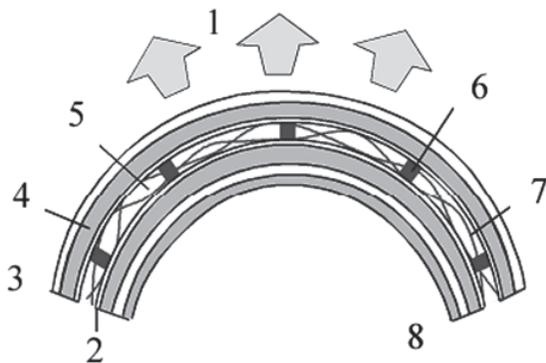


Рис. 8.27. Сечение дисплея на эластичной подложке с использованием С\*ЖК: 1 — свет; 2 — прозрачный электрод; 3 — поляризационная пленка; 4 — полимерная подложка; 5 — слой С\*ЖК; 6 — полимерная стенка; 7 — полимерное волокно; 8 — гибкий источник задней подсветки [57]

Пример эластичного полноцветного дисплея показан на рис. 8.28. Помимо С\*ЖК были использованы твистовые нематики с красителем и ХЖК. Технология изготовления эластичных дисплеев описана в работе [57]. Она позволяет получать дисплеи с высокой яркостью и контрастом изображения, широким углом обзора и низкой потребляемой энергией. В работе [58] описан эластичный дисплей на основе бистабильного отражательного эффекта в ХЖК. Рассмотрены его применения в качестве записной книжки, осуществляющей запись рукописного текста под действием давления, телефонов с изменяемым цветом экрана и эластичной смарт-картой.

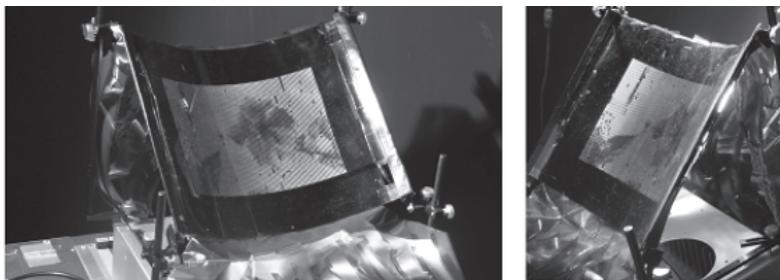


Рис. 8.28. Пример полноцветного дисплея на С\*ЖК размера А4 (96×64 пикселей) с эластичным слоем задней подсветки [59]

Ведутся работы по созданию миниатюрных дисплеев на гибкой подложке на эффектах твист, гость-хозяин и в структурах PDLC. Для их изготовления разрабатывается принципиально новая технология капельного заполнения ЖК в гибкую подложку, резко уменьшающая стоимость микродисплеев при сохранении высоких эксплуатационных параметров.

### 8.5. Дисплеи для отображения 3-х мерных объектов

Окружающий нас мир — трехмерный, и тенденция создания сверхреалистических дисплеев делает актуальным создание объемных дисплеев. Для многих применений, например, для решения задач распознавания образов, наведения летательных объектов на цель, выполнения хирургических операций, моделирования архитектурных сооружений, задач обучения, в телевидении, кино, развлечениях и др. предпринимаются попытки создания дисплеев для отображения объемных объектов [60, 61].

У человека стереоскопическое зрение обеспечивается наличием двух глаз, информация от которых обрабатывается сначала раздельно и параллельно, а затем синтезируется в зрительный образ. Сетчатка глаза формирует двумерное изображение, а информация о глубине пространства создается в мозгу. В основе объемного восприятия лежит различие изображений, получаемых каждым глазом, что создает ощущение глубины или стереоэффект. Человек оценивает расстояние до объекта и его габариты по расстоянию между проекциями его изображения на сетчатках правого и левого глаза. Выделить изучаемый объект из разнородного окружения позволяет фокусирование по глубине - аккомодация, изменение формы хрусталика глаза. Операция сравнения расположения проекций возможна лишь до тех пор, пока дистанция между ними находится в определенных пределах. Расширить диапазон различаемых расстояний удастся с помощью функции конвергенции, поворачивающей глазные яблоки на необходимый угол. Аккомодация и конвергенция напрямую связаны между собой, что становится причиной появления чувства дискомфорта, напряжения и неестественности у пользователей большинства современных трехмерных дисплеев. Чтобы воссоздать реальную глубину и объем, придется изготовить устройство, сопоставимое по размерам с отображаемыми объектами, что, конечно же, нереально. Устранение указанного рассогласования является одной из основных задач стереодисплеев. Поэтому разработчики ищут способ имитировать необходимые для комфортного просмотра характеристики изображения. Отметим, что указанная проблема отсутствует в объемных (volumetric) дисплеях.

Механизм зрения использует ряд факторов для обеспечения ощущения глубины изображения. Существует несколько монокулярных факторов, создающих ощущение глубины двумерных изображений: тени, преграды, относительные размеры, ухудшение резкости, аккомодация, перспективная дисторсия, параллакс движения (удаленные объекты кажутся движущимися с меньшей скоростью). Бинокулярными факторами глубины пространства являются конвергенция, характеризующая угловую сходимости, и горизонтальная диспаратность (рис. 8.29а, б). Противоречие между аккомодацией и конвергенцией уменьшается с увеличением бинокулярной глубины. В реальных сценах фокусировка глаз на объект и дивергенция зависят от расстояния до объекта. Комбинация монокулярных и бинокулярных факторов создают трехмерный эффект. При наблюдении объемных изображений в 3D дисплеях за счет их несовершенства появляются некоторые дефекты, уменьшающие эффект глубины: раздвоение, сокращение кадра, кулисный эффект [62].

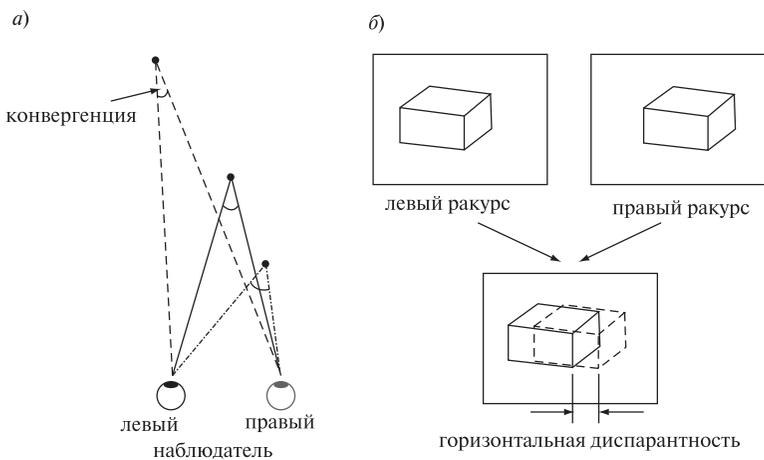


Рис. 8.29. Конвергенция (а) и горизонтальная диспаратность (б) [62]

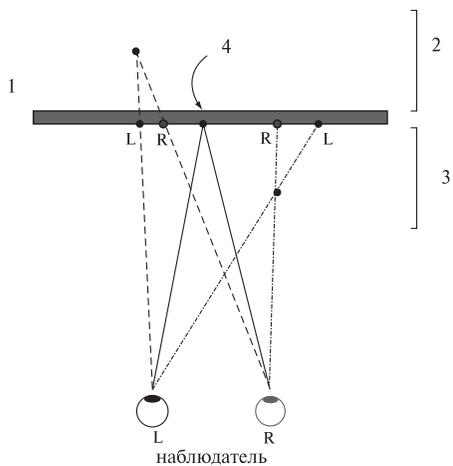


Рис. 8.30. Ближняя и дальняя части пространства, отображаемые объемным дисплеем: 1 — дисплей; 2 — задняя глубина; 3 — передняя глубина; 4 — точка в плоскости дисплея [62]

Большинство технологий объемных дисплеев позволяют отображать как ближнюю, так и дальнюю части пространства. На рис. 8.30 показан сдвиг между левым и правым пикселем для случая, когда объемный объект находится впереди или позади экрана. Для объекта в плоскости экрана левый и правый пиксели совпадают.

Технологии создания объемных дисплеев базируются на учете особенностей восприятия трехмерных сцен и объектов человеком. Широкое разнообразие объемных дисплеев принято классифицировать на три главных типа: объемные (volumetric), голографические, стереоскопические и автостереоскопические [63, 64].

### ***8.5.1. Объемные дисплеи – дисплеи реального трехмерного изображения***

Объемными (volumetric) называют особый класс дисплеев, формирующих объемные изображения, например, на быстро вращающемся неплоском экране [63–66]. Такие изображения можно наблюдать, обходя их с разных сторон. Хотя размер такого экрана мал, он обеспечивает высокое разрешение в вокселях. Одна из первых разработок была выполнена отечественными учеными (рис. 8.31) [67, 68]. Авторами предложена система визуализации трехмерных изображений и методы увеличения отображаемых элементов в объемном кадре на основе векторного управления положением лазерного луча и синтеза широкополосного сигнала возбуждения акустооптического

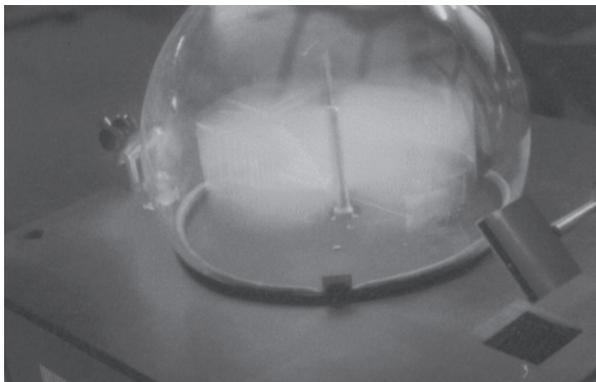


Рис. 8.31. Внешний вид объемного дисплея [67]

дефлектора. Объемное изображение формировалось по точкам при взаимодействии лазерного луча, идущего снизу, с вращающимся прозрачным экраном, выполненном в виде винта. Размер формируемого изображения ограничивался диаметром винта и составлял величину  $100 \times 100 \times 100$  мм<sup>3</sup>. Частота кадров составляла 25 Гц, число разрешаемых вокселей — 250000, объем памяти — 3,5 Мб. Можно использовать как аргоновый, так и гелий-неоновый лазер.

Более совершенный дисплей, являющийся развитием отечественного объемного дисплея, был разработан компанией Actuality System (США) [69–71]. Его схема и внешний вид приведены на рис. 8.32. Размер формируемого изображения ограничивался диаметром винта 25 см. Отображаемая информация представлялась в 198 сегментах, разрешение каждого сегмента составляло  $768 \times 768$ . Формирование объемного изображения осуществлялось с помощью процессора с использованием ПМС, работающего с частотой 5000 кадров/с. Частота кадров составляла 30 Гц, число цветных пикселей в одном кадре достигало 40 тыс., пропускная способность — 1,3 Гб/с.

Эти дисплеи представляют интерес для диспетчерской службы аэропортов, хирургии, архитектуры, компьютерной графики и обучения. Подобные системы можно использовать и для других целей, в частности, для управления движением транспортных средств в космосе [72–74].

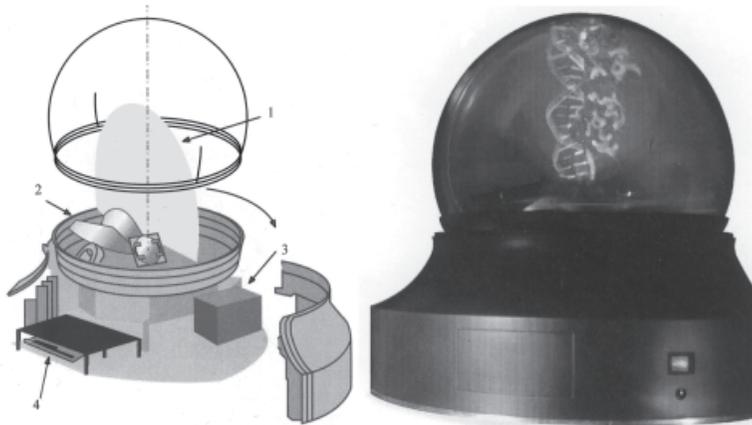


Рис. 8.32 Схема и внешний вид объемного дисплея, разработанного компанией Actuality System (США): 1 — проекционный экран; 2 — оптическая система; 3 — проектор; 4 — система развертка и блок памяти [71]

Еще один прототип полноцветного дисплея (volumetric) с разрешением  $96 \times 128$  пикселей был разработан на фирме Sony. Он также позволяет рассматривать трёхмерное изображение, создаваемое с помощью светодиодов, с любого угла и одновременно из нескольких точек.

Альтернативным описанным выше устройствам является ЖКД, выполненный в виде многослойной, «кулисной» системы экранов (рис. 8.33) [75, 76].

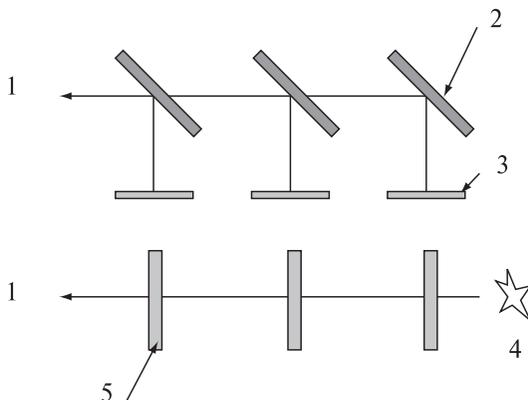


Рис. 8.33. Два типа объемных дисплеев с различным расположением экранов. Вверху — ЖК экраны, работающие с полупрозрачными зеркалами. Внизу — ЖК экраны, работающие на просвет: 1 — наблюдатель; 2 — полупрозрачное зеркало; 3 — ЖКД; 4 — задняя подсветка; 5 — ЖКД без задней подсветки [75]

Чтобы сформировать полный трехмерный объект, необходимо вводить соответствующие световые сигналы в каждую адресуемую, т.е. рассеивающую свет плоскость экрана, в то время как другие (не адресуемые) плоскости в этот момент являются прозрачными (рис. 8.34).

В работе [76] изучены режимы светорассеяния в монодоменных слоях С\*ЖК, используемых в электрооптических модуляторах, предназначенных для многослойного объемного экрана трехмерного дисплея. Для различных составов С\*ЖК-композиций, граничных

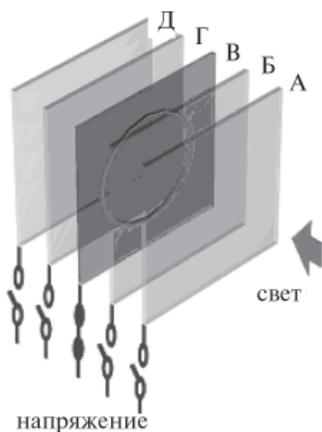


Рис. 8.34. Схема объемного экрана на основе ряда электрически управляемых светорассеивающих ЖК модуляторов [76]

условий и режимов импульсного управления С\*ЖК-модулятором обнаружено несколько типов рассеяния света. При переходном типе светорассеяния минимальный период его включения-выключения биполярными импульсами амплитудой 50 В составляет около 130 мкс, при рассеянии на сегнетоэлектрических доменах объемно-стабилизированного слоя негеликоидального СЖК это время приближается к 400 мкс, а при рассеянии на геликоидальной структуре С\*ЖК оно не превышает 600 мкс. Результаты свидетельствуют о возможности создания на основе С\*ЖК-модуляторов объемных экранов глубиной в 30–100 сечений. Обычно рассеяние включается и выключается поочередно, т. е. вначале включается и выключается в первой, затем во второй, затем в третьей плоскости - и так до последней плоскости, после чего возобновляется снова в первой плоскости, второй и так далее. Для наблюдения непрерывного, без мерцаний трехмерного изображения объекта частота воспроизведения его сечений и вместе с ними объекта в целом должна быть не менее 25 Гц, т. е. это изображение должно быть визуализировано за 40 мс и менее. Чем больше число сечений, тем короче время визуализации каждого из них, или тем быстрее должно включаться и выключаться рассеяние света в плоскостях сечений объекта. Включение экранов, расположенных на различном расстоянии от наблюдателя, создает ощущение объемного изображения. Число экранов определяет разрешение по глубине.

В работе [77] описана модификация объемного дисплея с использованием ЖК адаптивной линзы с двухчастотным управлением, формирующего объемное изображение без мелькания в угле обзора от  $-10^\circ$  до  $+10^\circ$ .

Примером использования мультипланарного оптического элемента является Depthcube разработки фирмы Texas Instruments [78]. Он проецирует со скоростью 1500 кадров/с последовательные полноцветные 3D срезы изображения в объем мультипланарного оп-

тического элемента, где каждый срез фиксируется на соответствующей глубине. В результате послойной развертки образуется гладкий, непрерывный в пространстве ортогональный трехмерный массив вокселей. Каждому вокселю соответствует 15-разрядный код яркости и цвета.

Мультислойный оптический элемент представляет собой стопку из 20 разделённых воздушным зазором ЖК затворов. В качестве материала в затворах применяется ХЖК, стабилизированный полимером. Затвор имеет коэффициент пропускания в прозрачном состоянии около 88% и 2% — в рассеивающем состоянии (рабочий угол 10°). Время переключения ЖК из прозрачного состояния в рассеивающее 0,39 мс, а из рассеивающего состояния в прозрачное — 0,08 мс. Благодаря своей мультислойной структуре 3D-изображение на Depth-Cube-дисплее имеет ту же глубину, что и реальные объекты. Поэтому есть все основания использовать для него определение «дисплей реального 3D-изображения». В отличие от стереоскопических и автостереоскопических дисплеев, Depth-Cube поддерживает нормальное соотношение между фокусным глазным расстоянием и конвергенцией, для того чтобы обеспечить комфортабельное и реалистичное наблюдение 3D-изображений без утомления глаз. Дисплей обеспечивает реальный параллакс при смещениях, как по вертикали, так и по горизонтали, позволяя наблюдателю видеть объекты на заднем плане, которые при обычном двухмерном представлении скрыты объектами переднего плана.

Кубический дисплей rCube с ручным управлением ракурса описан в работе [79]. Он содержит пять жидкокристаллических панелей с разрешением 640×480 пикселей (рис.8.35), размещенных в деревянном корпусе размером 146×120×146 мм. Общий вес составляет 1,3 кг. В любой момент времени наблюдатель видит 3 стороны куба. Компьютер создает 3 управляющих VGA сигнала, которые передаются верхней и расположенным друг против друга панелям (передней, задней, левой и правой) для получения всех пяти видеосигналов.

Разработчики использовали устройство Polhemus Fastrak для высокоточного трекинга движений как самого куба, так и головы пользователя в реальном времени и сразу по шести степеням свободы. Разработанная программа определяет, под каким углом в данную секунду человек смотрит на объект, и синхронно с движением головы строит на всех пяти экранах картинку с корректным ракурсом.

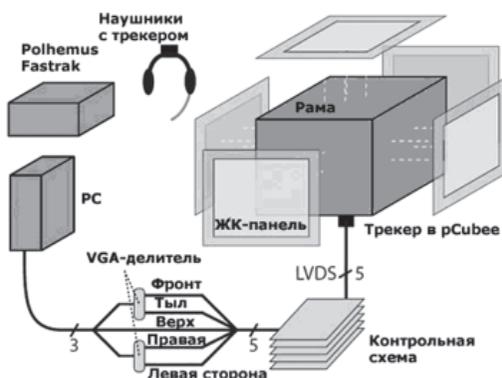


Рис. 8.35. Схема pCube дисплея [79]

Внешний вид кубического дисплея показан на рис. 8.36. Это устройство демонстрирует объекты виртуального мира. Их можно потрясти, передвинуть или повернуть при помощи наклона самого кубика. Можно дотронуться до них виртуальной указкой и, конечно, рассматривать с разных сторон. Так возникает эффект присутствия трёхмерного предмета внутри прозрачной коробки.



Рис. 8.36. Пятипанельный кубический дисплей, отображающий 3D модель глобуса; также показано контрольное устройство и наушники с сенсором положение головы

Если раньше похожие проекты сосредотачивались в основном на показе статичных сцен либо заранее записанных роликов, то этот дисплей используется для мгновенного отображения динамики виртуальных объектов при взаимодействии их с пользователем и между собой. Изображение в кубе меняется с частотой 40–60 Гц в зависимости от сложности моделируемых объектов. Имеется возможность держать этот куб в одной руке, а второй управлять отображаемыми объектами при помощи виртуальной указки или мышью.

Достоинством объемных дисплеев является неограниченное поле зрения без большого объема необходимой для отображения информации. Они могут применяться для управления движением воздушного транспорта и моделирования карты военных действий. Недостатками объемных дисплеев являются большие габариты, относительно высокая стоимость и в случае использования мультислойных оптических элементов - формирование только просветных изображений.

### *8.5.2. Стереоскопические дисплеи*

Наблюдатель получает изображение с помощью специальных очков для каждого глаза, согласованных с работой дисплея. В анаглифических очках используются цветные фильтры, либо синие и красные, либо зеленые и красные [61]. Каждый ракурс на дисплее окрашен в цвета фильтра. При согласовании работы дисплея и фильтров очков возникает ощущение глубины, несмотря на получение глазом искаженной цветовой информации. В поляризационных очках используются линзы с различными поляризаторами, согласованными с углами поляризации света, идущего от дисплея для соответствующего ракурса. ЖК затвор, используемый в очках, перекрывает свет, получаемый каждым глазом, синхронно с дисплеем (рис. 8.37). Для устранения мелькания изображения, времена переключения должны быть достаточно малыми. С 2000 г. ЖК затворы применяются в Японии в системе объемного спутникового ТВ на повышенной частоте модуляции, исключающей мелькание изображений. Используемый в этой системе бинокулярный параллакс вызывает нарушение естественного восприятия объемного изображения и приводит к утомлению зрителя. Одной из причин этому является фиксированное положение наблюдателя относительно экрана. По мнению ведущего эксперта США Д. Хоппера размещать вообще что-либо на голове наблюдателя можно только в исключи-

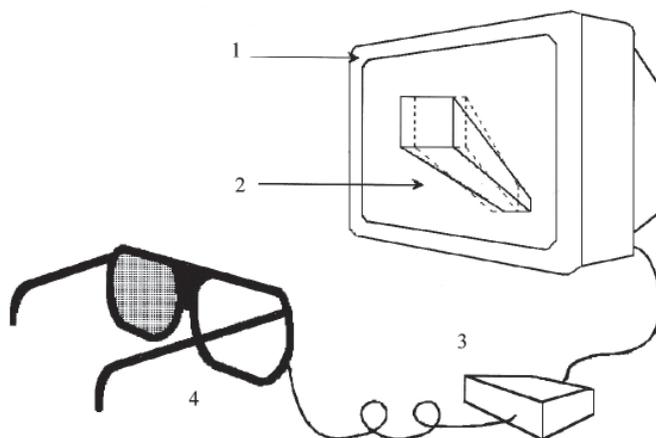


Рис. 8.37. Стереоскопический дисплей с использованием очков с ЖК затвором: 1 — стереомонитор с частотой 120 Гц; 2 — пара стереоизображений; 3 — синхронизатор кадр/затвор; 4 — «активные» ЖК очки

тельных случаях, когда это диктуется вопросами жизни или смерти, как, например, в авионике [80]. Поэтому основные усилия разработчиков направлены на разработку многопараллаксных безочковых систем [81].

Использование очков для получения стереоизображений создает дискомфорт наблюдателю, особенно в случае, когда он вынужден использовать вторую пару очков [82]. В работе [83] описан нашлемный стереодисплей, а в работах [84, 85] — пути улучшения эксплуатационных характеристик таких дисплеев. Такие дисплеи создают трехмерные изображения за счет пространственного разделения стереопары. Каждый глаз благодаря системе линз видит свой собственный миниатюрный монитор, размещенный в шлеме. Возможны два варианта: изолированный, когда человек не может видеть ничего, кроме изображения, и открытый, с полупрозрачным экраном, когда пользователь не теряет визуального контакта с окружающим миром. Обычно эти устройства содержат и датчики положения, позволяющие отслеживать движения головы пользователя. Именно в механизме контроля движений заключены все преимущества и недостатки подхода. Являясь недостаточно точным,

он часто вызывает неадекватную реакцию системы, однако отсутствие механизма обратной связи приводит к нежелательному мышечному напряжению в результате неестественного положения головы пользователя. Кроме того, вследствие ограничений по массе и размерам носимые устройства в основном страдают от низкого разрешения. Этому недостатка лишены дисплеи, представляющие собой массивные устройства высокого разрешения, которые закрепляются на подвижном манипуляторе с шестью степенями свободы. Человек контролирует положение дисплея руками примерно так, как обычно наводят на цель бинокль. В обеих вышеописанных реализациях в полной мере дает о себе знать отсутствие связи между аккомодацией и конвергенцией: глубина всех точек изображения зафиксирована в одной плоскости, которую можно с помощью оптики искусственно разместить на любом удалении. В японской лаборатории ATR Labs создали новый вариант нашлемного дисплея с дополнительными передаточными линзами, контролируя которые система в состоянии динамически подстраивать воображаемую дистанцию до изображения. В сочетании с отслеживанием положения зрачков становится возможным предлагать глазу то расстояние до предмета, которое соответствует конвергенции.

Японскими учеными была предложена модификация стереоскопического дисплея, основанная на атмосферной теории перспективы (рис. 8.38) [86–88]. Если два одинаковых изображения отобра-

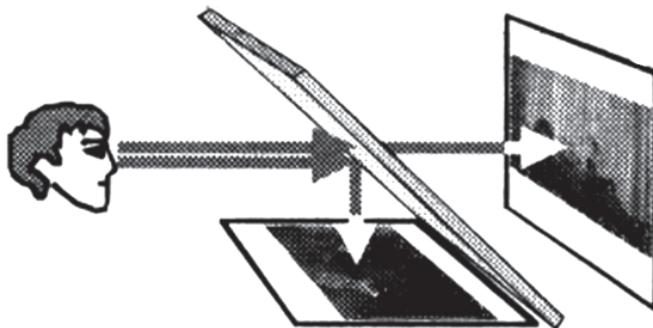


Рис. 8.38. Схема стереоскопического дисплея, основанная на атмосферной теории перспективы [86]

жать на горизонтальном и вертикальном экранах, расположенных на одинаковом расстоянии от наблюдателя, то он с помощью полупрозрачного зеркала будет воспринимать их находящимися на одинаковом расстоянии. Но если ввести слабо рассеивающий элемент, например, между вертикальным экраном и полупрозрачным зеркалом, то тогда наблюдатель будет воспринимать изображение, представленное на вертикальном экране, расположенным на большем расстоянии, чем расположенное на горизонтальном экране. Здесь используется закон атмосферной теории перспективы, открытый еще Леонардо да Винчи, гласящий, что «различимость объекта ухудшается с увеличением расстояния до него» [89]. На этой основе он разработал особую технику живописи *chiaroscuro* (сфумато), которая была использована пять столетий спустя при построении стереоскопических дисплеев.

### *8.5.3. Автостереоскопические дисплеи*

Автостереоскопические дисплеи позволяют получать эффект объемного изображения без использования очков. Когда наблюдатель находится в нужном положении, каждый глаз в зоне, называемой окном наблюдения, видит различные ракурсы объекта. Складываясь в мозгу, они создают впечатление объема. Различные оптические элементы используются для решения этой задачи. Для всех этих дисплеев наблюдатель должен находиться на определенном от них расстоянии для исключения совпадения изображений. На рис. 8.39 показан ракурс, при котором плоскость наблюдения параллельна плоскости дисплея.

Различают три типа автостереоскопических дисплеев: с фиксированными окнами наблюдения, с возможностью перемещения наблюдателя (рис. 8.40) и с несколькими ракурсами наблюдения (рис. 8.41) [60]. Панели ЖКД 1 и 2 (рис. 8.40) формируют независимые изображения соответственно для правого и левого глаза. Они собираются экраном 3 и представляются для наблюдения. Датчик положения оператора 4 согласует положение изображений на экране 3 с расположением глаз оператора. В результате в углах обзора 5 и 6 наблюдатель воспринимает трехмерное изображение 7. Дисплей с несколькими фиксированными окнами наблюдения может быть использован несколькими наблюдателями одновременно, воспринимающими изображения с помощью различных стереопар (рис. 8.41).

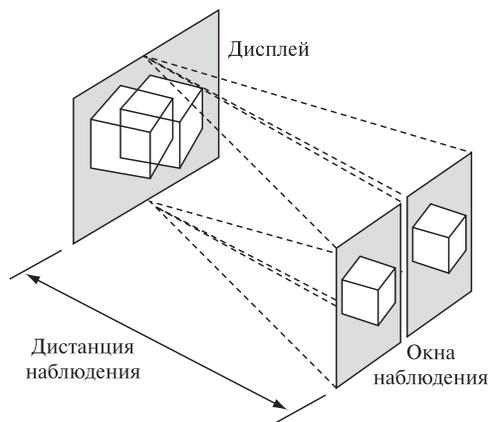


Рис. 8.39. Принцип автостереоскопического дисплея. Когда наблюдатель находится в нужном положении, каждый глаз видит различное изображение [60]

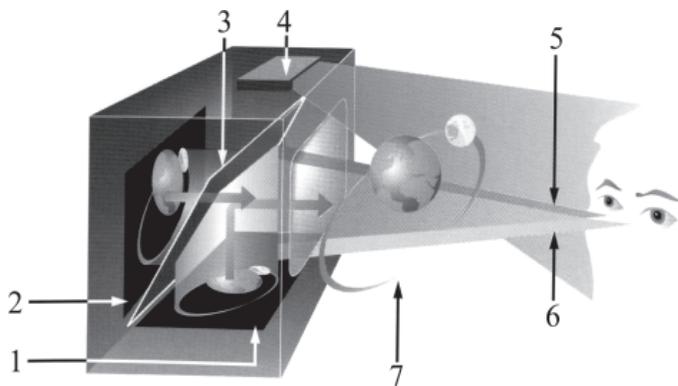


Рис. 8.40. Автостереоскопический дисплей: 1, 2 — панели ЖКД; 3 — экран; 4 — датчик положения наблюдателя; 5, 6 — угол обзора; 7 — трехмерное изображение

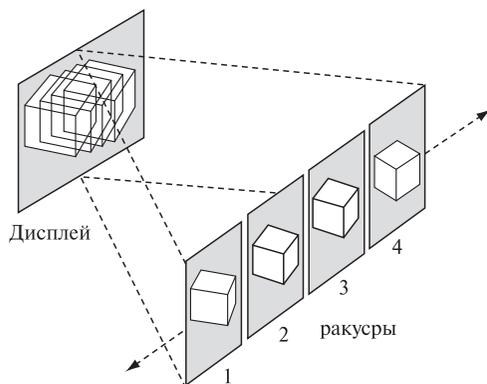


Рис. 8.41. Дисплей с четырьмя окнами наблюдения. Соседние ракурсы (1 и 2, 2 и 3, 3 и 4) создают стереопары [61]

Обзор автостереоскопических дисплеев приведен в работах [90, 91]. Любой тип матричных ЖКД может быть использован в объемных дисплеях при добавлении некоторых оптических элементов. На рис.8.42 показан *дисплей с параллаксным барьером*, использующий вертикальные непрозрачные полосы, перекрывающие доступ света к наблюдателю [92].

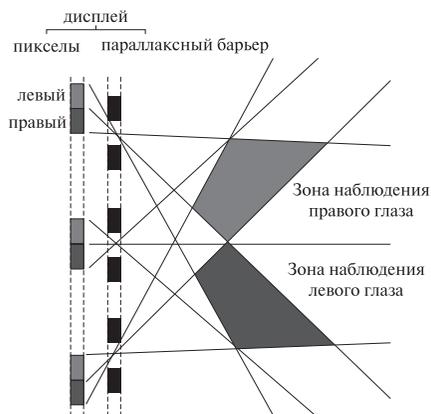


Рис. 8.42. Дисплей с параллаксным барьером [92]

Изменением геометрии барьера подбираются положения окон и углов наблюдения. Недостатком этих дисплеев является снижение их яркости за счет наличия барьера. *Растровый дисплей*, использующий массив миниатюрных линз, показан на рис. 8.43 [93]. Растры часто наклоняют, чтобы увеличить переходы между зонами наблюдения дисплея.

Основное достоинство растров состоит в передаче полной яркости.

*Формирование трехмерного изображения при помощи сфокусированных в точки аспектов изображаемой сцены*

В работах [94, 95] рассмотрен метод формирования трехмерного изображения посредством сканирования пространства лазерным лучом, который проецирует разные аспекты трехмерной сцены наблюдателю. На первом этапе записывается совокупность аспектов изображаемой сцены, на втором — система аспектов трансформируется в систему так называемых субаспектов. На этапе проекции субаспекты просвечиваются сфокусированным в точку лазерным пучком. Сканируя экран, такой пучок образует матрицу светящихся точек. Показано, что, наблюдая такую матрицу, наблюдатель видит локализованное на экране двухмерное изображение. При изменении точки наблюдения конфигурация представленного на экране изображения также изменяется, имитируя изменения аспектов сцены, которые имеют место при наблюдении реального трехмерного объекта. В результате у наблюдателя возникает иллюзия трехмерного проецируемого изображения. Отмечено, что процесс сканирования экрана системой сфокусированных в точки аспектов сцены эквивалентен одновременному сканированию экрана системой независимых тонких световых пучков, каждый из которых проецирует на экран свой присущий ему аспект сцены. Рассмотрен вариант дисплея, который воспроизводит только горизонтальные параллаксы трехмерной сцены. Показано, что в этом случае зрительская зона должна быть расширена в вертикальном направлении с помощью одномерного диффузного экрана. Рассмотрен режим работы

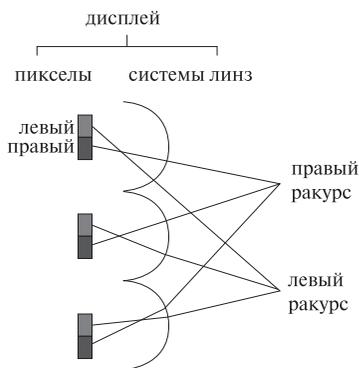


Рис. 8.43. Растровый дисплей

дисплея, когда сканирующий пучок управляется обычным телевизионным сигналом. Показано, что дисплей совместим с современной системой телевидения.

*Последовательно-временные дисплеи* используют изменение направления света от задней подсветки [96]. В первый момент времени свет направлен в левый глаз и наблюдается левое изображение. В следующий момент свет направлен в правый глаз и наблюдается правое изображение. За счет объединения двух ракурсов наблюдается объемное изображение. Недостатком является удвоение времени смены изображения, поэтому для видеоряда необходимо увеличение частоты до 120 Гц. Использование таких частот ограничено временами отклика современных ЖКД.

*Нашлемные дисплеи* относятся к дисплеям очкового типа [97–101]. Они широко используются в системах отображения виртуальной реальности. Каждый глаз видит отдельный размещенный непосредственно перед ним небольшой дисплей с диагональю менее 2,4 мм. Такой нашлемный дисплей может создавать стереоизображение высокого разрешения. Длительное использование такого дисплея приводит к утомляемости наблюдателя. Эти дисплеи не позволяют выполнять дополнительные операции, например, ведение записей.

#### ***8.5.4. Голографические дисплеи***

*Голографические дисплеи* строятся на отображении динамических голограмм [102]. Они имитируют пространственное размещение световых волн в таком виде, как они располагались бы при отражении света от реального трёхмерного объекта, и дают наиболее качественное трехмерное изображение, поскольку не имеют противоречия между аккомодацией и конвергенцией. При этом изображение может наблюдаться под разными углами несколькими наблюдателями [103]. Для наблюдения голограмм в реальном времени необходимо обеспечение очень большой полосы пропускания. Для стационарных полноцветных дисплеев высокого разрешения эта величина составляет порядок 100 Тб/с. Были разработаны некоторые методы параллельной обработки изображений, однако разрешение остается низким [104].

Появление первых голографических дисплеев относится к 90-м годам прошлого столетия. В работах [105, 106] показано, что голографические изображения высокого разрешения можно отображать

с помощью обычного ЖКД с углом поля зрения  $4^\circ$ . Для увеличения поля зрения необходимо существенное увеличение разрешающей способности, что не осуществимо активноматричными ЖКД на нематиках. Использование дисплеев на С\*ЖК позволяет увеличить поле зрения [107]. Для обеспечения угла обзора  $20^\circ$  необходимо разрешение 2,5 мкм, что требует осуществления модуляции с частотой 2 ГГц. Для отражательных цветных дисплеев использовались полимерные системы, создаваемые голографическими средствами [108].

Для отображения цветных динамических голограмм используются акустооптические модуляторы [109]. В работе [110] сообщается о разработке 3Д дисплея, основанного на использовании голограмм, создаваемых компьютером.

Из-за использования лазерной подсветки эти дисплеи чаще бывают монохромными. На сегодняшний день существуют прототипы голографических видеодисплеев, которые используют ЖК фильтры, подобные тем, что составляют матрицу современных ЖК мониторов [111]. Вместо отражения и создания интерференционной картины эти мониторы рассеивают свет, что и приводит к формированию псевдо трехмерного изображения. Недостатком этого типа ЖК голографических видеодисплеев является то, что они проецируют зрителю голограмму, «нарезанную» на части вместо того, чтобы представить единый трехмерный рисунок. Это не позволяет рассматривать голограмму под разными углами и делать ее доступной для просмотра сразу несколькими людьми.

Ученые из Калифорнии сообщают о разработке голографического дисплея, создающего трехмерную голограмму (при наблюдении в горизонтальной плоскости), которую можно обзирать с любой стороны (рис. 8.44). В состав дисплея входят: быстро вращающееся зеркало, покрытое анизотропным голографическим диффузором; микроконтроллер, отвечающий за декодирование видеосигнала, передаваемого посредством стандартного дисплея; высокоскоростной видеопроектор и обычный персональный компьютер. При этом разработчики отмечают, что их решение позволяет видеть трехмерную картинку, не используя специальных очков, с любой точки и неограниченному количеству зрителей.

Характеристики получаемого изображения: частота обновления — 15–20 Гц; разрешение 768×768 пикселей; угловое разрешение  $1,25^\circ$ ; диаметр изображения 13 см; скорость вращения экрана 900–1200 об/мин; количество отображаемых цветов — 2. За формирование трехмерной картинку отвечает видеокарта, создающая бо-

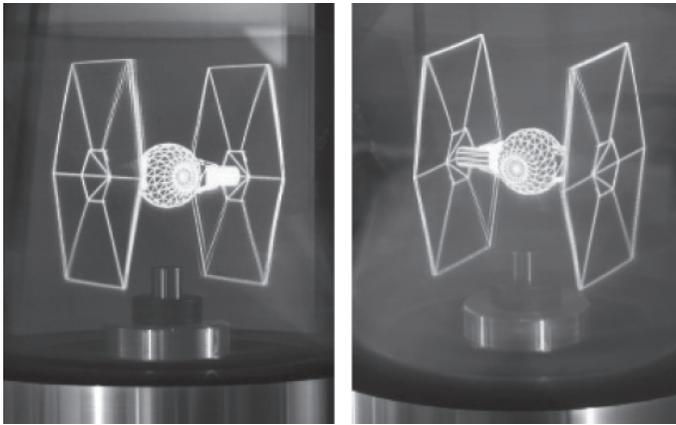


Рис. 8.44. Изображение, получаемое с помощью голографического дисплея, разработанного в Калифорнии

более 5000 изображений трехмерного объекта в секунду. Изображения проецируются на быстро вращающееся зеркало при помощи высокоскоростной проекционной системы. Необходимо отметить разработку исследователями специального алгоритма, обеспечивающего корректное отображение картинки независимо от места расположения наблюдателя и его расстояния до голографического дисплея.

Недостатками голографических дисплеев является техническая сложность на пределе современных возможностей аппаратуры и ограниченность вычислительных мощностей, которых хватает только для статических изображений.

#### *8.5.5. Ретинальные дисплеи*

Особый интерес представляют ретинальные дисплеи (РД), формирующие изображения непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя [112]. В предшествующих моделях изображение формировалось непосредственно перед глазом пользователя на маленьком экране, обычно в виде больших очков. Неудобство этих систем было связано с малым углом обзора, большим весом устройств, необходимостью фокусировки глаза на определенной глубине и низкой яркостью. Первые образцы РД были созданы в Университете Ва-

шингтона в 1991 году. При проекции изображения на оба глаза, создаются реалистичные трехмерные сцены. Эти дисплеи позволяют осуществлять динамическую перефокусировку изображений, что обеспечивает более высокий уровень реализма, чем у классических шлемов виртуальной реальности.

Схема РД приведена на рис. 8.45. Оптический сигнал от источника излучения 1 сканером 2, управляемым интерфейсом 3, направляется на сетчатку глаза. Ретинальные дисплеи не требуют создания изображения на промежуточном носителе, могут использоваться в условиях больших внешних засветок. Проецирование изображения непосредственно на сферическую поверхность сетчатки создает условия для устранения оптических искажений при проецировании больших полей пространства, снижает искажения на краях изображений и позволяют сократить оператору время для принятия решений в экстремальных условиях. В отличие от обычных нашлемных дисплеев, построенных на базе миниатюрных LCD-дисплеев, РД дисплей не перекрывает поле зрения, а накладывает свою картинку на видимое пользователем изображение реального мира. РД имеет очень малый вес, что позволяет располагать их на оправе очков (рис. 8.46) [113]. Достоинствами дисплеев являются: большой угол обзора (более  $120^\circ$ ); высокое пространственное разрешение; высокое качество отображения цветов, высокие яркость и контрастное отношение, а также возможность создания объемного изображения с большой пространственной глубиной.

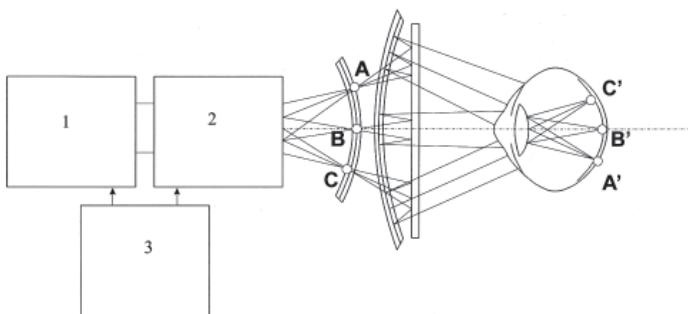


Рис. 8.45. Схема ретинального дисплея: 1 — источники излучения; 2 — сканеры; 3 — интерфейс; ABC — поле зрения [112]



Рис. 8.46. Ретинальный дисплей, размещенный на оправе очков.  
Разработка фирмы Brothers Industries, LTD (Япония) [113]

Ретинальные дисплеи первоначально были созданы для армии США. Командир подразделения получает изображение от бортового компьютера с помощью ретинального монитора, закрепленного на шлеме. Это позволяет более эффективно следить за обстановкой на поле боя и получать тактическую информацию. Это устройство также используется пилотами новых моделей американских вертолетов. Система может применяться в хирургии. Хирург проводит операцию, одновременно отслеживая показатели здоровья пациента. Дисплей может помочь в хирургической навигации — врач во время операции сможет видеть наложенное томографическое изображение органа.

Создание в последние годы беззеркальных микролазеров на ЖК с распределенной обратной связью на эластичной подложке могут ускорить практическую реализацию таких дисплеев.

Панорама современных дисплейных технологий демонстрирует широкое многообразие используемых материалов, принципов и конструкций, обладающих набором различных эксплуатационных параметров. Необходимость измерения рабочих характеристик дисплеев привела к развитию методов и аппаратуры для метрологии [114–117]. Важнейшим событием 2010 г. явилось начало коммерческой демонстрации ТВ передач с объемным изображением на ос-

нове использования стереоэффекта с применением очков. При всем многообразии систем отображения информации мечта разработчиков о создании простого и более дешевого дисплея с высокими эксплуатационными параметрами для широкого назначения стимулирует продолжение работ в этой передовой области прикладной оптики.

В заключение отметим, что в настоящее время ЖКД составляют почти 85% от объема выпуска всех плоских информационных дисплеев. Это объясняется их высокими характеристиками, достигнутыми за счет развития теории жидких кристаллов и передовых технологий. ЖКД характеризуются высоким контрастом, позволяющим воспринимать отображаемую информацию в широком диапазоне освещенности и углов обзора; высоким пространственным и временным разрешением, широким диапазоном отображаемых цветовых параметров и оттенков (шкалы) серого, позволяющим получать изображения максимально соответствующим отображаемым объектам.

Приведенные сведения о ЖКД позволяют отнести их к новой самостоятельной интенсивно развивающейся области современной фотоники.

### Литература к главе 8

1. *Bahadur B.* Liquid crystal displays // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1984. Vol. 109. №1. P. 1–98; A brief review of history, present status, development and market overview of LCDs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1983. Vol. 99. P. 345–374.
2. *Сухаруев А.С.* ЖК индикаторы. М., Радио и связь. 1991. 256 с.
3. *Севастьянов В.П., Аристов В.Л., Митрохин М.В.* ЖК дисплеи: электрооптика, управление, конструкция и технологии. Минск. Микровидео-системы. 1998. 508 с.
4. *Kim K.-H., Song J.-K.* Technical evolution of LCDs // *Asia materials.* 2009. Vol.1. № 1. P. 29–36.
5. *Schadt M.* Liquid crystal materials and liquid crystal displays // *Annu. Rev. Mater.* 1997. Vol. 27. P. 305–379.
6. *Cristaldi D.J.R. et al.* Liquid crystal displays. Materials, operating modes and applications / In book *Liquid crystal display drivers.* 2009. Springer Science + Business media. P. 33–73.
7. *Scheffer T. J., Nehring J.* A new highly multiplexable LCD // *Appl. Phys. Lett.* 1984. Vol. 45. P. 1021–1023.
8. *Scheffer T. J., Nehring J.* Supertwisted nematic (STN) liquid crystal display // *Annu. Rev. Mater.* 1997. Vol. 27. P. 555–583.

9. *Kiefer R., Weber B., Windscheid F., Baur G.* In-plane switching of NLCs // Japan Displays. 1992. Vol. 92. P. 547.
10. *Toko Y., Sugiyama T., Katoh K.* Amorphous twisted NLC displays fabricated by non rubbing showing wide and uniform viewing angle characteristics accompanying excellent voltage holding ratios // J Appl. Phys. 1993. Vol. 74. P. 2071–2075.
11. *Lee K.H., Song S.H., Yang S.M., Park S.H., Kim, J.K., Han J.K., Park I.C., and Lim Y.J.* CRT like characteristics of 32' WXGA TFT-LCD by true vision advanced FFS pixel concept // SID Tech. Dig. 2005. Vol. 36. P. 1742.
12. *Schiekel M. F., Fahrenschon F.* Deformation of NLCs with Vertical Orientation in Electrical Fields // *Appl. Phys. Lett.* 1971. Vol.19. P.391.
13. *Takeda A., Kataoka S., Sasaki T., Chida H., Tsuda H., Ohmuro K., Sasabayashi T., Koike Y., and Okamoto K.* A Super-High Image Quality Multi-Domain Vertical Alignment LCD by New Rubbing-Less Technology // SID Symposium Digest of Technical Papers. 1998. Vol.29. Issue 1. P. 1077–1080.
14. *Koike Y., Okamoto K.* Super High Quality MVA-TFT LCDs // Fujitsu Sci. Tech. J. 1999. Vol. 35. P. 221–228.
15. *Park S.B., Lyu J., Um Y., Do H., Ahn S., Choi K., Kim K-H., and Kim S.S.* A Novel Charge-Shared S-PVA Technology // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2007. Vol. 38. Issue 1. P. 1252–1254.
16. *Huang Y.-P. Huang W.-K., Tsao C.H., Su J.-J., Hou H-L., Chia-Yu Lee L.-L., Chang T.-R., Lin Y.-C., and Chen P.L.* Additional Refresh Technology (ART) of Advanced-MVA(AMVA) Mode for High Quality LCDs // *Soc. Inf. Display Int. Symposium Digest of Technical Papers.* 2007. Vol. 38. P. 1010.
17. *Vermeirsch K., De Meyere A., Fornier J., De Vleeschouwer H.* Viewing angle of LC display: representation on the Poincare sphere // *Appl. Optics.* 1999. Vol.38. № 13. P. 2775–2786.
18. *Saitoh Y., Kimura S., Kusafuka K., Shimizu H.* Optically compensated IPS mode TFT-LCD panel // SID Symp. Dig. of Techn. Papers. 1998. Vol.29. Issue 1. P. 706–709.
19. *Chen J., Kim K.-H., Jyu J.-J., Souk J.H., Kelly J.R., Bos P.J.* Optimum film compensation modes for TN and VA LCDs // SID Symp. Dig. of Techn. Papers. 1998. Vol. 29. Issue 1. P. 315–318.
20. *Van Ewyk R.L., O'Connor I., Mosley A., Guddy A., Hilsum C., Blackburn C., Griffiths J., Jones F.* Anisotropic fluorophors for LCDs // *Display Techn. And Appl.* 1986. Vol. 7. № 4. P. 155–160.
21. *Самарин А.* Технологии ЖК дисплеев с управляемым углом обзора // Компоненты и технологии. 2008. № 8. С. 15–22.
22. *Hisatake Y., Kawata Y., Murayama A.* Viewing angle controllable LCD using variable optical compensator and variable diffuser // Research & Development Center. Toshiba Matsushita Display Technology Co. Ltd. SID 05 Digest.
23. *Lee B.W., Sagong D., Jeong G.* LCDs: How fast is enough? // *Soc. Inf. Display Int. Symp. Dig. of Techn. Papers.* 2001. Vol. 32. P. 1106–1109.

24. *Utsumi Y., Takeda S., Kagawa H., Kajita D., Hiyama I., Tomioka Y., Asakura T., Shimura M., Ishii M., Miyazaki K., and Ono K.* Improved contrast ratio in IPS-Pro LCD TV by using quantitative analysis of depolarized light leakage from component materials // Soc. Inf. Display Int. Symp. Dig. of Techn. Papers. 2008. Vol. 39. P. 129–132.
25. *Van Ewyk R.L., O'Connor I., Mosley A., Guddy A., Hilsun G., Blackburn G., Griffiths J., Jones F.* Anisotropic fluorophors for LCD // Display Techn. and Appl. 1986. Vol. 7. № 4. P. 155–160.
26. *Томлин М.Г.* Передовые дисплейные технологии // Опт. журн. 2003. Том 70. № 7. С. 4–17.
27. *Greubel W.* Bistability behaviour of texture in cholesteric liquid crystal in an electric field // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. P. 5–7.
28. *Yang D.-K., West J.L., Chein L.-C., Doane J.W.* Control of reflectivity and bistability in displays using ChLCs // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 76 № 2. P. 1331–1333.
29. *Ma R.Q., Yang D.-K.* Optimization of polymer-stabilized bistable black-white cholesteric reflective display // J. SID. 1999. Vol. 7. P. 61.
30. *Feihong Yu, Qian W., Weimin P., Ye G., Huiguang C., Jun C., Haicheng G.* Experimental realization of reflective bistable ChLCD with new driving scheme and low driving voltage // Acta Photonica Sinica. 2000. Vol. 29. № 5. P. 420–425.
31. *Bryan-Brown G.P., Brown C.V., Jones J.C. et al.* Grating aligned bistable nematic device // SID'97 Digest. P. 37–40.
32. *Cheng J., Boyd G.D.* Threshold and switching characteristics of a bistable nematic liquid crystal storage display // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 37. № 12. P. 1072–1074.
33. *Bos P.J., Watson P., Anderson J.E. et al.* Status and trends in nematic bistable LCs // Proc. EuroDisplay'99. Berlin. P.397-400.
34. *Tanaka T., Sato Y., Inoue A. et al.* A bistable TN LCD driven by a passive-matrix addressing // Proc. Asia Display'95. P. 259–262.
35. *Marinot-Lagarde Ph., Dozov I., Pollosat E. et al.* Fast bistable nematic display using monostable surface anchoring switching // SID'97 Digest. P. 41–44.
36. *Патмо С.П.* Электрооптика и фотоника ЖК // УФН. 2005. Т. 175. Вып. 7. С. 784–790.
37. *Barberi R., Durand G.* // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 58. P. 2907.
38. *Bryan-Brown G.P., Brown C.V., Jones J.C. et al.* Grating aligned bistable nematic device // SID'1997 Digest. P. 37–40.
39. *Clark N.A., Lagerwall S.T.* Sub-microsecond bistable electro-optic switching in LCs // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. P. 899–901.
40. *Funfschilling J., Schadt M.* New short-pitch bistable ferroelectric LCDs // Jpn. J. Appl. Phys. 1991. Vol. 30 (4). P. 741–746.
41. *De Luca A., Barna V., Atherton T. J., Carbone G., Rosenblatt C.* Optical Nanotomography of Liquid Crystals // Books of Abstracts 12<sup>th</sup> Intern. Topical Meet. on Optics of Liquid Crystals. October 2007. Puebla City. Mexico. O-65.

42. *Wu S.-T., Yang D.-K.* Reflective LC displays. JOHN WILEY & SONS, LTD. Series in Display Technology. Chichester. 2001. 335 p.
43. *Yang D.-K., Doane J.W., Yaniv Z., Glasser J.* Cholesteric reflective display: drive scheme and contrast // *Appl. Phys. Lett.* 1994. Vol. 64. P. 1905–1907.
44. *Yang D.-K., Huang X.-Y., Zhu Y.-M.* Bistable cholesteric reflective displays: materials and drive schemes // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 1997. Vol. 27. P. 117–146.
45. *Schott D.J.* Reflective LCOS light valves and their application to the virtual displays // *Euro Display'99.* 1999. P. 485.
46. *Tarumi K., Bremer M., Geelhaar T.* Recent LC material development for active matrix displays // *Annu. Rev. Mat. Sci.* 1997. Vol. 27. P. 423–441.
47. *Томилин М.Г.* Создание и обработка изображений с помощью ЖК // *C.* 122–140.
48. *Takizawa K., Kikuchi H., Fujikake H., Namikawa Y., Tada K.* Polymer-dispersed liquid crystal light valves for projection display // *Opt. Eng.* 1993. Vol. 32. P. 1781–1791.
49. *Takizawa K., Fujii T., Kawakita M., Kikuchi H., Fujikake H., Yokozawa M., Murata A., Kishi K.* Spatial light modulators for projection displays // *Appl. Opt.* 1997. Vol. 36. № 23. P. 5732–5747.
50. *Ong H.L.* Microdisplay opportunity: small size, low power, big image, bright future // *SPIE.* 1998. Vol. 3560. P. 1–12.
51. *Kornev A.F., Pokrovsky V.P., Soms L.N., Stupnikov V.K., Tomilin M.G.* New concept of combined laser-SLM projection display // *Proc. 20 IDRC.* 2000. Palm Beach, Florida. USA. P. 108–110.
52. *Kornev A.F., Pokrovsky V.P., Soms L.N., Stupnikov V.K., Tomilin M.G.* New concept of the projection display // *Abstracts of 9 IC Advanced Display technologies.* Moscow 2000. P. 67.
53. *Корнев А.Ф., Покровский В.П., Сомс Л.Н.* и др. Новые схемы лазерных жидкокристаллических проекционных дисплеев // *Опт. журн.* 2001. Т. 68. № 9. С. 16–18.
54. *Томилин М.Г.* Оптико-проекционные дисплеи для тренажеров // *Опт. журн.* 2003. Т. 70. № 7. С. 53–58.
55. *Brennesholtz M.S.* Fundamentals of projection displays // *SID short courses S-4.* 1997. Boston, Massachusetts. 115 p.
56. *Schmidt T.C.* Fundamentals of projection displays // *SID short courses S-4.* 2002. Boston, Massachusetts. 95 p.
57. *Fujikake H., Sato H.* Current progress and technical challenges of flexible LCDs // *Emerging LC Technologies IV.* Edited by Liang-Chy Chien, Ming Hsien Wu. *Proc. of SPIE.* 2009. Vol. 7232. 723202-1-8.
58. *Montbach E., Davis D.J., Khan A., Schneider T., Marhefka D., Pishnyak O., Ernst T., Miller N., Doane W.* Novel Flexible Reflex™ Displays // *Emerging LC Technologies IV.* Edited by Liang-Chy Chien, Ming Hsien Wu. *Proc. of SPIE.* 2009. Vol. 7232. 723203-1-8.
59. *Flexible Flat Panel Displays / Ed. by G.P. Ctawford.* 2005. John Wiley & Sons, Ltd. P. 315–324; 489–498.

60. *Валюс Н.А.* Стереоскопия. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 379 с.
61. Selected papers on 3D displays / Editor Stephen A. Benton. SPIE milestone series. 2001. Vol. MS 162. 431 p.
62. *Hill L., Jacobs A.* 3D LCD and their applications // Proceed. of the IEEE. 2006. Vol. 94. № 3. P. 575–590.
63. *Pastoor S., Wopking M.* 3D-display: A review of current technologies // Displays. 1997. Vol. 17. P. 100–110.
64. *Balalubramonian K.* et al. Analysis of selected volumetric 3D imaging systems // in J. Ebbeni and A. Monfils (Eds.) Three Dimensional Imaging. Proc. SPIE. 1983. Vol. 402. P. 107–13.
65. *Balalubramonian K.* et al. Compatible volumetric 3D TV systems: a proposal // Applied Optics. 1981. Vol. 20. P. 3906–3911.
66. *Soltan P.* et al. Laser Based 3D Volumetric Display System // in E. Schlam (Ed.) High Resolution Displays and Projection Systems. Proc. SPIE. 1992. Vol. 1554.
67. *Voronov A.V., Golovkov A.A., Kuznetsov S.V.* Image formation in 3D laser display // Hardware for pattern recognition, image analysis and signal processing. 1996. Vol. 6. № 4. P. 823–826.
68. *Аснис Л.Н., Воронов А.В., Головков А.А., Кузнецов С.В.* Объемный лазерный дисплей с акустическими дефлекторами // Опт. журн. 1996. № 12. С. 66–69.
69. *Favalora G., Lewis D.* Spatial 3D visualization: the end of flat-screen thinking // Presented at the US Display Consortium high information content display systems Symp. 2003. Arlington, VA.
70. *Favalora G.* Spatial 3-D. The death of the pixel // SPIE's oemagazine. January 2004. P. 25.
71. *Favalora G.E.* Volumetric 3D displays and application infrastructure // Computer. 2005. Vol. 38. P. 37–44.
72. *Grossman T., Balakrishnan R.* Multi-finger gestural interaction with 3D volumetric displays // In Proc. UIST'04. ACM Press. 2004. P. 61–70.
73. *Grossman T., Balakrishnan R.* The design and evaluation of selection techniques for 3D volumetric displays // In Proc. UIST'06. ACM Press. 2006. P. 3–12.
74. *Wilcox B.* et al. A vision system for a Mars rover // in Mobile Robots II. Proc. SPIE Vol. 852, p172-179 Williams R. «Volumetric three dimensional display technology» in D. McAllister (Ed.) Stereo Computer Graphics and other True 3D Technologies. 1993.
75. *Takada H., Suyama S., Hiruma K., Nakazawa K.* A compact depth-fused 3D LCD // In SID Symp. Dig. Tech. Papers. 2003. Vol.34. №1. P.1526-1529.
76. *Андреев А.Л., Бобылев Ю.П., Губасарян Н.А., Компанец И.Н., Пожсидаев Е.П., Шошин В.М., Шумкина Ю.П.* Рассеяние света в СЖК модуля-торах для объемных экранов // Опт. журнал. 2005. Т. 72. № 9. С. 58.
77. *Suyama S., Date M., Takada H.* Three-dimensional display system with dual-frequency LC varifocal lens // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. P. 480–484.

78. Самарин А. Современные технологии дисплеев объемного изображения // Современная электроника. 2005. № 2. С. 2–6.
79. Stavness I., Lam B., Fels S. pCube: a perspective-corrected handheld cubic display // CHI. 2010. April. P. 10–15.
80. Hopper D.G. Reality and surreality of 3-D displays: holodeck and beyond // Electronic IDC of SID, ExCel, London. 2000. Nov. 21–23. P. 1–10.
81. Motoki T., Isono H., Yuyama I. Present status of 3D television research // Proc. IEEE. 1995. Vol.83. № 7. P. 1009–1021.
82. Sexton and I., Surman P., Stereoscopic and autostereoscopic display systems // IEEE Signal Process. Mag., 1999. Vol. 16. №. 3, P. 85–99.
83. Teitel M. The eyephone: a head mounted stereo display // in Stereoscopic Displays and Applications. Proc. SPIE. 1990. Vol. 1256. P. 168–172.
84. Faris S.M. Micro-polarizer arrays applied to a new class of stereoscopic imaging // SID'91 Digest. 1991. P. 840–843.
85. Okuda H., Chen J., Bos Ph. Possibility of stereoscopic displays by using a view angle dependence of twisted nematic liquid crystal cells // IEEE Trans. on electron devices. 1998. Vol. 45. № 4. P. 1445–1452.
86. Ding S.-Q., Chen J.-Y., Li J.-L. The discovery of induced stereovision and its application // Proceed. of ASID'00. 2000. P. 87–90.
87. Suyama S., Takada H., Ohtsuka H. et al // Proceed. of SID'00. 2000. 54.1. P. 1208–1211.
88. Suyama S., Takada H., Ohtsuka H. et al // Proceed. of SID'00. 2000. 53.3. P. 1300–1303.
89. Tomlin M.G. Leonardo da Vinci and 3DDs. Programme & Abstracts of XIV Intern. Symposium 2005. Advanced Display Technologies. Oct. 10–14. 2005. Crimea. Ukraine. P. 8–9.
90. Travis A. Autostereoscopic 3D display // Applied Optics. 1990. Vol. 29. P. 4341–4342;
91. Travis A. The display of three-dimensional video images // Proc. IEEE. 1997. Vol. 85. № 11. P. 1817–1832.
92. Woodgate G., Harrold J., Jacobs A., Mosley R., Ezra D. Flat panel autostereoscopic displays – characterization and enhancement // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII. 2000. Vol. 3957. P. 153–164.
93. Morishima H., Nose H., Taniguchi N., Inoguchi K., Matsumura S. Rear cross lenticular 3-D display without eyeglasses // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII. 1998. Vol. 3295. P. 193–202.
94. Денисюк Ю.Н., Марков В.Б., Ганжерли Н.М. Проекция трехмерного изображения методом аспектов сфокусированных в точки // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 1. С. 104–109.
95. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М., Орлов В.В. и др. Проекция трехмерного изображения при помощи сфокусированных в точки аспектов изображаемой сцены // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 5. С. 864–872.

96. *Dodgson N., Moore J., Lang S., Martin G, Canepa P.* 50 inch time multiplexed autostereoscopic display // Proc. SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII. 2000. Vol. 3957. P. 177–183.
97. *Pausch R.* et al. A practical low cost stereo head mounted display // In Stereoscopic Displays and Applications II Proc. SPIE. 1991. Vol. 1457. P. 198–209.
98. *Upton H. Goodman J.* Eyeglass heads up display // Proc. SID. 1982. Vol. 23. P. 77–80.
99. *Woodard O., Lo J., Khandaker M., Gassel J., Herrmann F., Ong H., Tsaur B.Y., Reese C.* A full-color SXGA TN AMLCD for military head-mounted displays and viewer applications // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 6955. 69550B-1-10.
100. *Choi H.K., Woodard O., Tsaur B.Y., Dingle B., Yung E., Greiman J., Cheong N., Chern W.-F., Lo J., Anupongongarch P., Khandaker M., Costa D., Herrmann F., Ong H.* Manufacturable full-color AMLCDs for military head-mounted displays and viewer applications // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7326. 73260G-1-8.
101. *Desjardins D.D., Byrd J.C., Hopper D.G.* Military display market: update to fourth comprehensive edition // In Display Technologies & Applications for Defense, Security and Avionic III. 2009. SPIE. Vol. 7327. P. 4.
102. *Higuchi K., Ishii K., Ishikawa J.* et al. Experimental holographic movie IV: The projection-type display system using a retro-directive screen // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2406. P. 20–26.
103. *Stanley M, Bannister R.W., Cameron C.D., Coomber S.D., Cresswell I., Hughes J.R., Jackson P., Milham K., Miller R., Payne D.A., Scattergood I.D.C., Smith A., Smith M.A., Watson P., Webber P., Slinger C.W.* 100 mega-pixel computer generated holographic images from active tiling(tm) – a dynamic and scalable electro-optic modulator system // Proc. SPIE, Practical HolographyXVII and Holographic Materials IX. 2003. Vol. 5005. P. 247–258.
104. *Slinger C., Cameron C., Coomber S., Payne D., Smith A., Smith M., Stanley M.* // Electroholographic displays for advanced visualization. Presented at the U.S. Display Consortium High Information Content Display Systems Symp. 2003. Arlington. VA.
105. *Katsuma H., Sato K.* Electronic display system using LCD, laser-diode and holography camera // Proc. SPIE. 1993. Vol. 1914. P. 212–218.
106. *Maeno K., Fukuya N., Nishikawa O.* et al. Electro-holographic display using 15 megapixels LCD // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2652. P. 15–23.
107. *Hashimoto N., Morokawa S.* Motion-picture holography using LC television SLMs // Proc. SID Int. Symp. Orlando, Fl. 1995. Vol.26. P.847-850.
108. *Tanaka K., Kato K., Tsura S., Sakai S.* Holographically formed liquid crystal polymer device for reflective color display // J. Soc. Inform. Display. 1994. Vol. 2. P. 37–40.
109. *Lucente M., Pappu R., Sparell C.J.* et al. Progress in holographic video with acoustooptical modulator display // Proc. SPIE. 1995. Vol. 2577. P. 2–7.

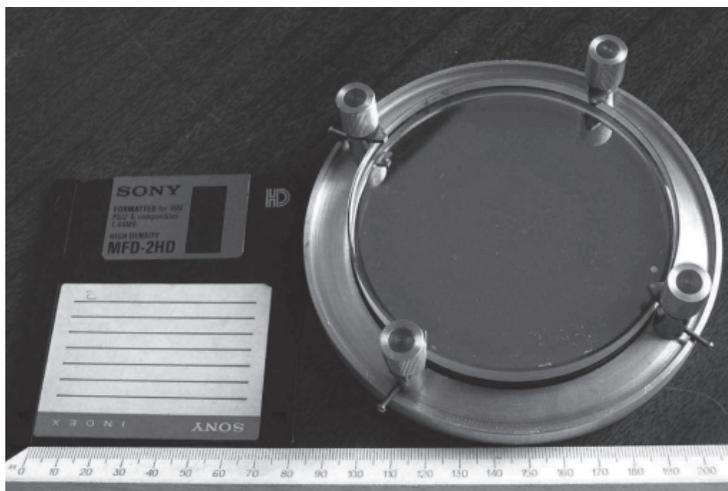
110. *Farhoosh H., Fainman Y., Urquhart K.* et al. Real-time display of 3-D computer data using computer-generated holograms // Proc. SPIE. 1989. Vol. 1052. P. 172–176.
111. *Son J.Y., Shestak S.A., Lee S.K.* et al. Pulsed laser holographic video // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2652. P. 24–28.
112. *Ковалев А.М.* Виртуальное пространство в сферической перспективе // Опт. журн. 1999. Т. 66. № 6. С. 127–135.
113. *Otani T.* Brothers Industries develops head-mountable retinal scanning display // Nikkei Electronics Asia Newsletter. 2008. Apr. 11.
114. *Smith P.* Measuring the electro-optic response of LCD // Electro-optical systems design. 1979. № 4. P. 43–47.
115. *Becker M., Neumeier J.* Measuring LCD optical performance realistically // Information Display. 1993. Vol. 9 (2). P. 16–19.
116. *Kelley E.F.* Fundamentals of display metrology // SID short courses S-3. 2002. Boston. Massachusetts. 204 p.
117. *Заргарьянц Г.С., Шмулевич В.Л.* Контроль качества дисплеев // Проблемы информатизации. 2001. №1. С. 70–71.

## Часть IV

### ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА

Природа проста и не роскошествует  
излишними причинами вещей.

И. Ньютон. «Начала»



Оптически адресуемый жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света для видимого диапазона длин волн диаметром 100 мм. Максимальная глубина фазовой модуляции  $3,5\pi$  на  $\lambda = 532$  нм. Разработка Государственного Оптического института им. С.И. Вавилова.

*Фото А. П. Онохова*

Данный раздел посвящен недисплейным применениям жидких кристаллов, интенсивно развивающимся в последние годы. Основное назначение ЖК оптических устройств — модуляция излучения и управление интенсивностью светопропускания, светорассеяния; поляризацией, преломлением, отражением, поглощением света, цветовыми параметрами. Продемонстрирована также возможность генерации лазерного излучения в ЖКМ. Устройства обладают возможностью плавного (или бистабильного) и локального управления оптическими параметрами среды. Его можно осуществлять электрическими и магнитными полями, световыми сигналами, механическими, тепловыми, и даже химическими воздействиями. Они обеспечивают высокое пространственное разрешение, большую глубину модуляции и небольшие времена переключения. Большинство устройств управляют поляризованным излучением, однако разработаны приборы, управляющие параметрами и неполяризованного излучения. По сравнению с микромеханическими системами жидкокристаллические устройства не имеют движущихся частей, имеют малые габариты, потребляют малую мощность и имеют низкую стоимость. Недостатками жидкокристаллических оптических устройств является зависимость их эксплуатационных характеристик от температуры и, в ряде случаев, использование нетрадиционных технологических операций при их изготовлении.

В отличие от дисплеев оптические устройства на ЖК используются не только в видимом диапазоне, но и в ИК диапазоне длин волн, а также осуществляют модуляцию излучения не только по амплитуде, но и по фазе. К тому же оптические устройства используют более толстые слои ЖК и не требуют широких углов обзора. Применение их совместно с мощными лазерными источниками излучения ставит специфическую задачу обеспечения лазерной прочности. Известно их использование в интегральной и адаптивной оптике, инфракрасной и лазерной технике, телекоммуникации, динамической голографии, обработке информации, акустике и др. Разработаны переключатели, световые шторки, дифракционные решетки с перестраиваемым шагом, оптические дефлекторы, фазовые корректоры, когерентно-оптические преобразователи изображений и другие элементы. Эти элементы дали толчок дальнейшему развитию адаптивных оптических приборов с новыми возможностями по управлению их оптическими характеристиками. Наиболее широкими функциональными возможностями обладают простран-

ственно-временные модуляторы света (ПМС) с электрическим или оптическим управлением. Оптически управляемые модуляторы содержат дополнительно светочувствительный слой фотопроводника. Они позволяют в аналоговом виде преобразовывать двумерные массивы информации с плотностями более  $10^{10}$  бит/с и решают многие задачи оптической обработки изображений. Область практического использования жидкокристаллических оптических устройств очень широка и труднообозрима. Мы ограничимся рассмотрением трех основных направлений: микролазеры на жидких кристаллах, электрически и оптически управляемые пространственно модуляторы света.

## Глава 9

### МИКРОЛАЗЕРЫ НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Фотонные кристаллы (ФК) представляют собой периодические структуры с модуляцией диэлектрической проницаемости, период которой сравним с длиной волны света. Интерес к ФК связан с возможностью контролировать распространение и излучение света благодаря наличию в них «стоп-зоны». Такие пространственные структуры легко реализуются в ЖК, в которых может быть создано пространственно-периодическое изменение показателя преломления. Если на слой ЖК падает фотон, обладающий энергией, соответствующей запрещенной зоне, то он не может в нем распространяться и отражается. Такие ЖК можно использовать для лазерной генерации. На границах запрещенной зоны («стоп-зоны» или «полосы селективного отражения») фотоны сильно локализованы. Это является следствием высокой плотности состояний [1, 2], и это свойство является ключевым для существования низкопороговой лазерной генерации.

Идея получения лазерной генерации в условиях, когда обратная связь создается не внешними зеркалами, а пространственно-периодическими изменениями диэлектрической проницаемости, была предложена в работе [3]. Авторы рассмотрели различные случаи, когда пространственно-распределенная обратная связь создается брэгговской структурой с периодическим профилем комплексного показателя преломления. В 1973 г. был получен первый патент на перестраиваемый ЖК лазер с распределенной обратной связью [4]. Лазерная генерация должна была обеспечиваться ХЖК с внедренным в него флуоресцентным красителем. Периодическая геликои-

дальняя структура ХЖК должна осуществлять распределенную обратную связь. Однако данных о реализации такого лазера не приводилось. Впервые лазерная генерация в ХЖК была экспериментально получена в 1980 г. [5]. Исследования лазерного эффекта и особенностей люминесценции в ХЖК были продолжены в работах [6–8].

В силу анизотропии свойств ЖК, теоретическая модель Когельника и Шанка [3] не дает исчерпывающего представления о свойствах обратной связи в фотонных ЖК структурах. Это, по-видимому, явилось причиной того, что первые экспериментальные результаты по лазерной генерации в ХЖК были не вполне правильно интерпретированы, хотя эксперимент был выполнен на высоком уровне. Поэтому безусловный приоритет авторов работы [5] иногда замалчивается, а первенство наблюдения лазерного эффекта в хиральных ЖК закрепляется за работами [9, 10]. В работе [9] генерация наблюдалась в хиральном полимерно-стабилизированном ЖК, а в [10] сообщалось о наблюдении лазерного эффекта в чистых ХЖК. Значимость работ [9, 10] в том, что, авторы, став на позиции интерпретации лазерного эффекта в терминах запрещенной фотонной зоны и плотности состояний, активизировали данное направление. В результате появилось много работ о лазерной генерации в системах на основе ЖК [11–20]. Обзор ранних работ по этой теме приведен в [2]. Последние достижения в данной области изложены в сборнике [20]. Исчерпывающе охватить все публикации по лазерной генерации в ЖК не представляется возможным. Далее анализируется современное состояние проблемы, обсуждаются физические основы и особенности возбуждения лазерной генерации в ЖК и рассматриваются свойства многослойных ЖК систем, приводящие к эффектам оптических диодов и пространственной асимметрии лазерной генерации.

## **9.1 Генерация лазерного излучения в хиральных ЖК**

### ***9.1.1. Физические основы лазерной генерации в хиральных ЖК***

В работе [3] рассмотрены два случая возникновения распределенной обратной связи: модуляция реальной части комплексного показателя преломления (индекса преломления) и модуляция показателя усиления среды (т. е. величины, связанной с мнимой частью комплексного показателя преломления). Для этих случаев по-

лучены дисперсионные соотношения для собственных волн, и найдены зависимости пороговых значений показателя усиления от параметров модулированной среды. Принципиальным является то, что в случае модуляции индекса преломления в спектре собственных волн возникает запрещенная зона с центром на брэгговской частоте  $\omega_0 = \pi c / (n\Lambda)$  ( $c$  — скорость света в вакууме,  $\Lambda$  — структурный период модуляции,  $n$  — среднее значение индекса преломления) и шириной  $\delta\omega = n_1\omega_0$  ( $n_1$  — амплитуда модуляции индекса преломления). Установлено, что самая низкопороговая лазерная мода находится у края запрещенной зоны. Для показателя усиления  $\alpha_g$ , соответствующего возбуждению лазерной генерации на краю зоны, получено выражение:

$$\alpha_g L \approx \left( \frac{\lambda_g}{n_1 L} \right)^2, \quad (9.1)$$

где  $\lambda_g$  — длина волны генерации в вакууме. Значение показателя усиления, необходимое для возбуждения лазерной генерации, обратно пропорционально кубу протяженности пространственно периодической среды  $L$ . Для случая пространственной модуляции коэффициента усиления найдено, что  $\alpha_g \sim 1/L$ , а частота генерации строго соответствует брэгговской частоте  $\omega_0$ . Таким образом, в случае модуляции индекса преломления значение показателя усиления  $\alpha_g$  падает с увеличением  $L$  намного быстрее, чем в случае модуляции усиления, и это является основным аргументом для реализации низкопороговой генерации именно в системах с модуляцией индекса преломления.

Структуры на основе ЖК отличаются от рассмотренных Когельником и Шанком наличием оптической анизотропии и пространственного изменения ориентации главных осей тензора диэлектрической проницаемости. В частности, в хиральных ЖК пространственное распределение поля директора является геликоидальным с шагом геликоида  $P$  (вставка на рис. 9.1). Однако, несмотря на эти особенности ЖК, многие из принципиальных результатов, полученных в работе [3], остаются в силе. Впервые дисперсионные соотношения для собственных волн, возбуждаемых вдоль оси геликоида хирального ЖК, получены в работе [21]. Эти соотношения имеют следующий вид:

$$k_{(2,1)}(\omega) = \left[ b(\omega/c)^2 + (2\pi/P)^2 \pm \sqrt{(4\pi\omega/cP)^2 + a^2(\omega/c)^4} \right]^{1/2}, \quad (9.2)$$

где  $b = (n_{\parallel}^2 + n_{\perp}^2)/2$ ,  $a = (n_{\parallel}^2 - n_{\perp}^2)/2$ ,  $n_{\parallel}$  и  $n_{\perp}$  соответственно главные индексы преломления для поляризации света вдоль и перпендикулярно директору,  $c$  — скорость света в вакууме,  $\omega$  — частота световой волны. Таким образом, вдоль оси геликоида могут распространяться четыре собственные волны  $\pm k_1(\omega)$  и  $\pm k_2(\omega)$ . На рис. 9.1 эти дисперсионные зависимости представлены графически. Кривые дополнены изображениями состояний поляризации собственных волн на различных частотах для случая, когда геликоид является правосторонним, а локальная анизотропия положительна ( $n_{\parallel} - n_{\perp} > 0$ ). Положительные и отрицательные значения  $k$  по оси абсцисс соответствуют прямой и обратной волнам в смысле направления их фа-

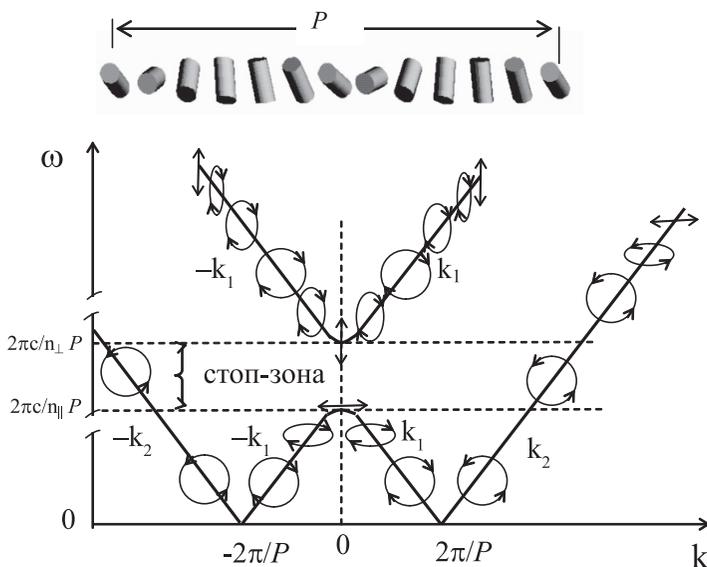


Рис. 9.1. Дисперсионные зависимости для собственных волн, возбуждаемых в бесконечной хиральной среде (на вставке распределение поля директора показано в виде цилиндров, оси которых соответствуют локальным оптическим осям). На дисперсионных зависимостях показаны состояния поляризации волн. В каждой точке хиральной среды одна из главных осей эллипса поляризации локально ориентирована вдоль директора ЖК [22]

зовой скорости. Собственные волны  $\pm k_2(\omega)$  могут возбуждаться во всем диапазоне частот  $\omega$ . В общем случае правостороннего геликоида эти волны имеют левостороннюю эллиптическую поляризацию<sup>1</sup>, близкую к круговой в области низких частот ( $\omega \ll 2\pi c/(nP)$ , где  $n = b^{1/2}$ ), и переходящую в линейную в области высоких частот  $\omega \gg 2\pi c/(nP)$  (режим Могена [22]). Пространственная ориентация главных осей эллипса поляризации меняется синхронно с локальным направлением директора ЖК. Одна из главных осей эллипса поляризации всегда совпадает с локальным направлением директора [22]. В отличие от волн  $\pm k_2(\omega)$  волны  $\pm k_1(\omega)$  могут возбуждаться не во всем спектральном диапазоне. Для них существует запрещенная зона — область частот  $2\pi c/(n_{\parallel}P) < \omega < 2\pi c/(n_{\perp}P)$ , где значения волнового вектора чисто мнимые, т. е. эти волны не могут распространяться. Также как и для волн  $\pm k_2(\omega)$  состояния поляризации волн  $\pm k_1(\omega)$  являются эллиптическими, но правосторонними. В общем случае они не являются ортогональными по отношению к состояниям поляризации волн  $\pm k_2(\omega)$ . Эллиптические состояния поляризации волн  $\pm k_1(\omega)$  вырождаются в линейные не только в области высоких частот, но и на краях запрещенной зоны. При этом линейная поляризация на низкочастотном краю локально совпадает с направлением директора ЖК, а на высокочастотном — перпендикулярна директору. Это свойство является ключевым для понимания особенностей возбуждения лазерной генерации на обоих краях запрещенной зоны в зависимости от знака анизотропии показателей усиления.

Из соотношения (9.2) также следует, что на краях стоп-зоны групповая скорость света  $d\omega/dk$  стремится к нулю. Для одномерных фотонных кристаллов величина обратная групповой скорости ( $dk/d\omega$ ) пропорциональна плотности состояний DOS (density of states) [23, 24]. Для бесконечно протяженного хирального ЖК плотность состояний на краях стоп-зоны стремится к бесконечности. В случае слоя ЖК

---

<sup>1</sup> Поляризация является правосторонней, если для наблюдателя, к которому движется волна, вектор поля испытывает вращение по часовой стрелке. Следует иметь в виду, что в современной физике часто используется соглашение, основанное на направлении вектора момента импульса фотона. Правым считается фотон, у которого вектор спина совпадает с вектором скорости. Это определение противоположно классическому в смысле определения правой и левой поляризации.

конечной толщины значения DOS на краях зоны принимают максимальные, но конечные значения (если среда не усиливающая). Максимальная плотность состояний соответствует максимальной вероятности возбуждения излучательных переходов. Поэтому именно на краях стоп-зоны, где DOS достигает максимальных значений, реализуется наименьший порог возбуждения лазерной генерации.

Существует прямая связь между представлениями в терминах DOS и классическим подходом к интерпретации возбуждения лазерной генерации. Если рассматривать произвольную оптическую систему как фильтр, охваченный обратной связью, то плотность состояний однозначно определяется коэффициентом усиления по петле обратной связи [25]:

$$\text{DOS} \propto \frac{1 + |A_1||A_2|}{1 - |A_1||A_2|}, \quad (9.3)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  соответственно комплексные коэффициенты передачи при распространении световой волны в прямом и обратном направлениях. В анизотропных средах эти коэффициенты зависят от состояния поляризации волны и направления ее распространения. Поэтому, в общем случае, коэффициенты передачи выражаются через комплексные элементы матриц распространения [25]. Согласно (9.3) плотность состояний стремится к бесконечности, если амплитуда коэффициента усиления по петле обратной связи  $|A_1||A_2| = 1$ . Таким образом, условие единичности коэффициента передачи по петле обратной связи, являющееся классическим условием возбуждения генерации, эквивалентно остановке света внутри резонатора (групповая скорость стремится к нулю) в терминах плотности состояний. На расходимость плотности состояний при возбуждении лазерной генерации также указывается в работе [26].

Условие единичности коэффициента передачи по петле обратной связи можно выполнить, если в среде нет потерь или она является усиливающей. Для тех направлений и частот, для которых в не усиливающей среде произведение  $|A_1||A_2|$  ближе всего к единице, будет наиболее низкий энергетический порог возбуждения лазерной генерации. Плотность состояний можно оценить и по ширине спектра пропускания (или излучения)  $\delta\omega$ , измеренной на полувысоте от соответствующего максимального значения в спектре [25]:

$$\text{DOS} \approx \frac{\pi}{L\delta\omega} \quad (9.4)$$

Практически бесконечное сужение линии излучения в условиях стационарной лазерной генерации есть следствие расходимости плотности состояний. Наиболее узкая спектральная мода в спектре пропускания ( $T$ ) и отражения ( $R$ ) на краях запрещенной зоны (рис. 9.2а) характеризуется максимальным DOS и минимальным значением показателя усиления  $\alpha_g$ , необходимым для возбуждения генерации [27]. На рис. 9.2б показаны вычисленные спектры возбуждения лазерной генерации для хиральных структур с различным знаком анизотропии показателя усиления.

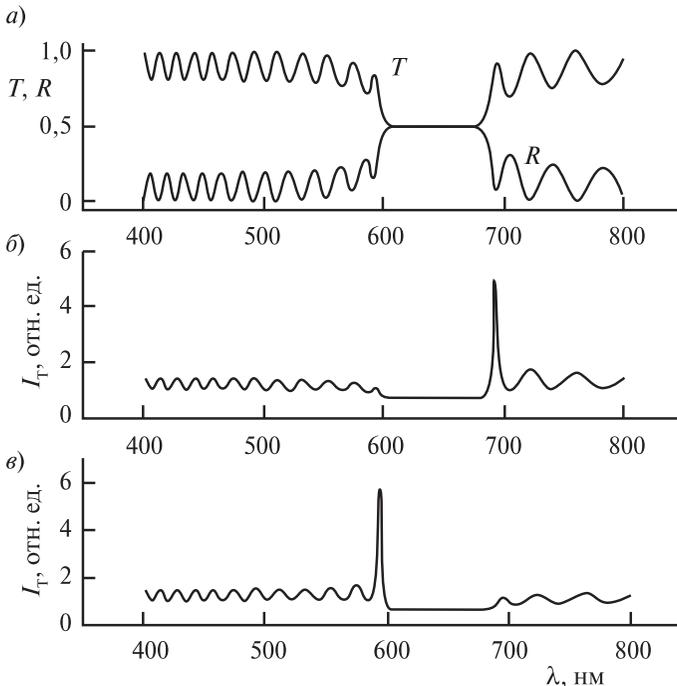
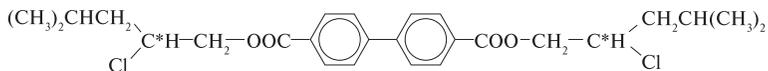


Рис. 9.2. Рассчитанные спектры пропускания  $T$ , отражения  $R$  (а) и излучения  $I_T$  (б, в), демонстрирующие возникновение лазерной генерации в ХЖК ( $P=0,4$  мкм,  $n_{\perp}=1,5$ ,  $n_{\parallel}=1,7$ ) [27]. При положительной анизотропии показателя усиления ( $\alpha_{g,\parallel} > \alpha_{g,\perp} = 0$ ) лазерное излучение возникает на длинноволновом краю запрещенной зоны. Если анизотропия отрицательна ( $\alpha_{g,\perp} > \alpha_{g,\parallel} = 0$ ), генерация имеет место на коротковолновом краю стоп-зоны

Если значение показателя вдоль локального направления директора значительно превышает соответствующее значение перпендикулярно директору, то наименьший порог возбуждения генерации будет для моды на низкочастотном краю стоп-зоны (б). В противном случае генерация возникнет на высокочастотном краю (в). Все это объясняется взаимно-ортогональной поляризацией собственных волн  $\pm k_1(\omega)$ , которая на обоих краях стоп-зоны является линейной и локально направлена соответственно вдоль и перпендикулярно директору ЖК (рис. 9.1). На практике усиливающие свойства хиральной среды, как правило, обеспечиваются примесными молекулами лазерных красителей. При этом стоп-зона и спектр люминесценции молекул красителя должны перекрываться. Разный знак анизотропии коэффициента усиления может быть реализован экспериментально при смешивании ЖК с различными типами дихроичных люминесцентных красителей, молекулы которых по-разному встраиваются в матрицу ЖК, ориентируясь соответствующими осцилляторами параллельно или перпендикулярно директору. Если анизотропия молекул, обеспечивающих усиление в среде, слабо выражена, то генерация возможна одновременно на двух краях запрещенной зоны [6–8].

### 9.1.2. Материалы и красители

Особенностью хиральных фаз является отсутствие плоскостей зеркальной симметрии. Хиральность может обеспечиваться как самими молекулами, например, ХЖК, так и быть индуцирована примесными хиральными молекулами. В последнем случае они добавляются к веществам, которые образуют ЖК фазы (нематические и смектические), но сами не обладают хиральностью. Этот способ создания хиральных ЖК позволяет в широком диапазоне управлять их свойствами. Примером хиральной добавки является молекула б-бис(2-хлор-4-метилпентил)бифенил-4,4'-дикарболсилата [28].



В этом примере хиральность и, как следствие, оптическая активность молекул обеспечивается двумя хиральными атомами углерода  $\text{C}^*$ . Если подобные молекулы добавить в нематический или смектический ЖК, то в нем спонтанно индуцируется геликоидаль-

ное распределение поля директора. Шаг геликоида  $P$  зависит от концентрации к добавки (при малых концентрациях  $1/P \sim \kappa$ ). Типичная весовая концентрация оптически активной добавки для получения запрещенной зоны в видимом спектральном диапазоне составляет 10–20%.

Геликоидальное распределение в  $C^*$ ЖК возникает, если они образуют наклонную смектическую ( $C$ -фазу). Возникающая хиральная  $C^*$ -фаза, как правило, является сегнетоэлектрической, что позволяет управлять генерацией с помощью электрического поля [29]. Для создания хиральных полимерных ЖК используется аналогичный подход. Полимер может включать как ковалентно связанные хиральные группы, так и добавки отдельных хиральных веществ [30]. Создание хиральных полимерных материалов для лазерной генерации, чувствительных к различным внешним воздействиям (деформации, изменению химического окружения) описано в [31]. Созданы материалы, в которых при механической деформации можно получать сдвиги стоп-зоны от красной до голубой области спектра. Существует большой выбор лазерных красителей [32]. Необходимым условием использования красителя является его растворимость в матрице ЖК. Широкий ассортимент красителей из групп полиметиновых, оксазиновых, кумариновых и других позволяет перекрыть весь видимый спектральный диапазон [20]. Концентрация красителя в матрице ЖК обычно не превышает нескольких единиц весового процента.

### ***9.1.3. Общие свойства лазерной генерации в хиральных ЖК***

Экспериментальный образец лазера на ХЖК, допированном красителем, и схема генерация излучения показаны на рис. 9.3 [10].

Тонкий слой хирального ЖК находится в зазоре между двумя прозрачными подложками. На внутренние стороны подложек наносятся тонкие полиимидные пленки, создающие ориентацию молекул ЖК и однородное распределение директора в направлениях  $x$ , параллельных плоскости слоя: ось геликоида направлена строго вдоль нормали к слою (рис. 9.4а). Именно вдоль нормали наблюдается низкопороговая лазерная генерация на краях запрещенной зоны. Оптическая накачка также осуществляется в направлениях близких к нормали. Малые времена жизни возбужденных состояний молекул красителей приводят к тому, что наиболее благоприятные условия возбуждения генерации возникают при импульсной оптической на-

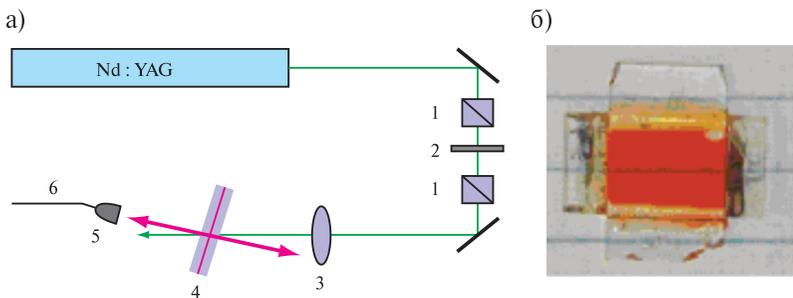


Рис. 9.3. Генерация излучения в ХЖК (а) и экспериментальный образец лазера (б): 1 — поляризатор; 2 — полуволновая пластина; 3 — линза; 4 — ХЖК с красителем; 5 — приемник; 6 — оптоволоконно [10]

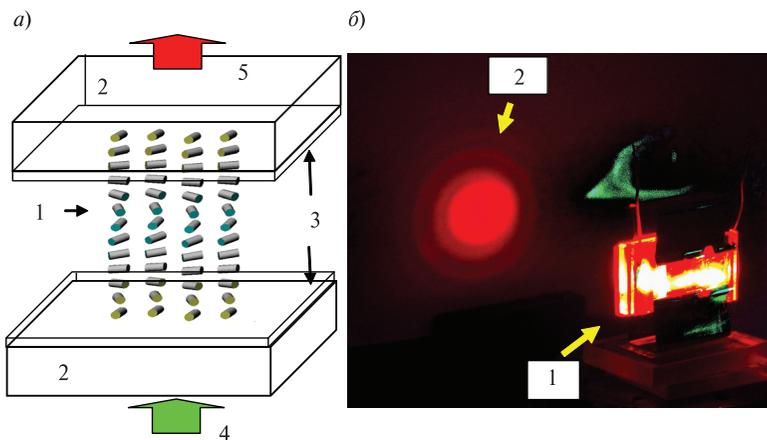


Рис. 9.4. Схема микролазера на основе ХЖК: а) 1 — слой ХЖК (толщина 15–30 мкм); 2 — стеклянные подложки; 3 — ориентирующие полиимидные пленки (толщина ~0,05 мкм); 4 — излучение накачки; 5 — генерируемое излучение; б) 1 — фото генерирующего микролазера при импульсной накачке; 2 — лазерное излучение на экране [30]

качке. Для этого часто применяется лазер на иттрий-алюминиевом гранате с ионами неодима (YAG—Nd<sup>3+</sup>), работающий в режиме модулированной добротности с длительностью импульса излучения 5–10 нс. Используется излучение на второй ( $\lambda = 532$  нм) или на третьей ( $\lambda = 355$  нм) гармониках. На рис. 9.4б показана типичная структура сечения пучка, генерируемого ЖК лазером при импульсной накачке [33, 34]. В этом примере ярко выражена кольцевая структура генерации, которая характерна для лазеров на ХЖК. Авторы работы [34] считают, что кольца — это генерация на одной из мод у края стоп-зоны, которая сдвинута в коротковолновую область из-за отклонения направления от нормали. Возможность лазерной генерации в этих направлениях при широкоапертурной накачке теоретически обоснована в работе [35]. Там же определены угловые зависимости коэффициентов усиления  $\alpha_g$ , необходимые для возбуждения низкогопороговой генерации на краю фотонной зоны, которая сдвигается в коротковолновую область по мере отклонения направления распространения волны от нормали. В работе [35] численно найдена обратная кубическая зависимость коэффициента усиления от толщины слоя ХЖК ( $\alpha_g \sim 1/L^3$ ), что совпадает с результатом (9.1) для пространственно-модулированных изотропных сред. Микролазеры на ХЖК имеют низкий порог генерации, что позволяет реализовать каскадную схему возбуждения, когда последующая ячейка оптически накачивается генерируемым излучением от предыдущей ячейки [36]. В соответствии с теорией, наиболее низкогопороговые моды находятся у края стоп-зоны. Абсолютные значения пороговых интенсивностей и коэффициент преобразования энергии в излучение зависят от типа лазерного красителя. В работе [37] сообщается о рекордных значениях эффективности преобразования, достигающей 30% для одного из полиметиновых красителей (PM597). Для этого же класса красителей авторы сообщают о порогах  $\sim 100$  нДж/импульс (длительность импульса  $\tau \sim 5$  нс, характерный размер сечения пучка 100 мкм, длина волны накачки  $\lambda = 532$  нм), что соответствует энергии на единицу площади  $\sim 1$  мДж/см<sup>2</sup> при мощности 0,25 МВт/см<sup>2</sup>. Для сравнения, порог возбуждения генерации в случае использования красителя оксазин-17 составляет примерно 5 мДж/см<sup>2</sup> при  $\tau \sim 10$  нс [34]. Порог возбуждения генерации зависит также от свойств матрицы ЖК. Используя результат (9.1), численно подтвержденный для ХЖК [35], и, исходя из предположения, что коэффициент усиления среды должен

быть пропорционален объемной плотности поглощаемой энергии накачки, легко получить следующий результат для порога накачки:

$$\alpha_g = \frac{\lambda_g^2}{(n_{\parallel} - n_{\perp})^2 L^3} \propto \frac{E_a}{V} = \frac{E_{th}(1 - e^{-kL})}{L} \text{ или} \quad (9.5)$$

$$E_{th} \propto \frac{\lambda_g^2}{(n_{\parallel} - n_{\perp})^2 (1 - e^{-kL}) L^2},$$

где  $E_a$  — поглощенная энергия;  $V$  — накачиваемый объем;  $k$  — коэффициент поглощения на длине волны накачки;  $E_{th}$  — пороговая энергия накачки на единицу площади в падающем пучке.

Выражение (9.5), приведенное в работах [26, 37], следует рассматривать как качественное. Оно дает лишь общее представление о зависимости порога от анизотропии ( $n_{\parallel} - n_{\perp}$ ) ЖК и толщины слоя  $L$ . В целом, экспериментальные результаты подтверждают снижение порога с увеличением  $\Delta n$  ЖК [20]. Выражение (9.5) не учитывает неоднородность возбуждения по толщине слоя, эффект многократных отражений, нелинейность коэффициента поглощения от интенсивности, каналы утечки энергии возбуждения в лазерную генерацию на других модах, а также другие особенности материала ЖК, влияющие на безизлучательную релаксацию энергии возбуждения. Многие из важных аспектов, относящихся к порогу возбуждения генерации, обсуждаются в работах [38, 39]. В теоретической работе [40] предложен способ уменьшения порога возбуждения за счет накачки в низкороговую моду на краю фотонной зоны. При этом частотная «настройка» моды на длину волны накачки может быть осуществлена изменением угла падения пучка накачки. Можно также подобрать условия и осуществить накачку в моду на коротковолновом краю запрещенной зоны при нормальном падении пучка, а генерацию получать на длинноволновом краю зоны. Это было подтверждено экспериментально [41]. Физическая причина снижения порога состоит в том, что плотность энергии внутри высокодобротного резонатора всегда намного выше, чем вне резонатора [25]. Это связано с эффектом многократных отражений, или, если говорить в терминах плотности состояний, с сильной локализацией фотонов внутри резонатора. Значительный эффект возможен только при высокой добротности резонатора, т. е. при низкой величине поглощаемой энергии на толщине слоя.

Прогресс в снижении порога генерации микролазеров на ЖК значителен и позволяет надеяться на замену громоздких YAG-лазеров полупроводниковыми лазерными диодами. В частности, об этом свидетельствуют результаты возбуждения усиленной люминесценции с использованием полупроводниковых лазерных диодов [37].

#### ***9.1.4. Управление лазерной генерацией в хиральных ЖК***

Чувствительность ЖК к внешним воздействиям: электрическим, магнитным полям, температуре, механическим напряжениями и др., можно использовать для управления лазерной генерацией. В бесконечной хиральной среде увеличение электрического или магнитного поля, направленного перпендикулярно оси геликоида, приводит к плавному увеличению шага геликоида. Это приводит к сдвигу запрещенной зоны в область низких частот и перестройке частоты лазерной генерации. Существующие топологические ограничения в пространственно-ограниченных слоях ХЖК, например, с осью направленной перпендикулярно плоскости слоя, не позволяют реализовать эффект плавной раскрутки [42, 43]. При превышении определенного значения напряженности поля геликоидальное распределение осуществляется термодинамически не выгодным, и раскрутка спирали осуществляется только через образование дефектов. Этот процесс является медленным и необратимым, что исключает его использование. В импульсных электрических полях геликоид просто деформируется, что дает лишь незначительные частотные сдвиги мод на краях фотонной зоны. Исследования [44, 45] подтверждают отсутствие перестройки частоты для слоя ХЖК с осью геликоида, перпендикулярной плоскости слоя (рис. 9.4а). Авторам [46–50] удалось реализовать геометрию, в которой геликоид лежит в плоскости слоя и не ограничен его толщиной (рис. 9.5б, а). В этом случае, при приложении электрического поля до 3,3 В/мкм, удалось осуществить перестройку частоты генерации в спектральном диапазоне ~ 20 нм (рис. 9.6б).

В работах [50–58] предложены два способа изменения шага геликоида изменением состава хирального ЖК. В первом способе используются фотоиндуцированные трансформации молекул. Второй — основан на создании градиента концентрации хиральной добавки в плоскости слоя ЖК и, как следствие, зависимости генерируемой длины волны от пространственного положения накачиваемой области образца. Пример реализации первого способа с использованием фо-

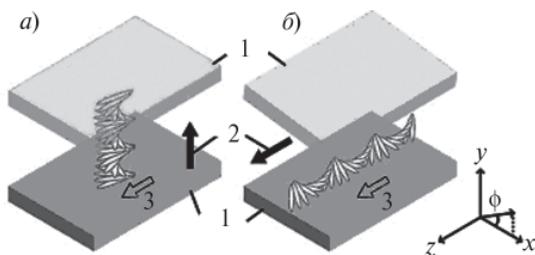


Рис. 9.5. Схема расположения оси спирали ХЖК в ячейке: а — традиционная (ось спирали перпендикулярна подложкам); б — ось спирали параллельна подложкам: 1 — подложки; 2 — направление оси спирали; 3 — направления натирания [50]

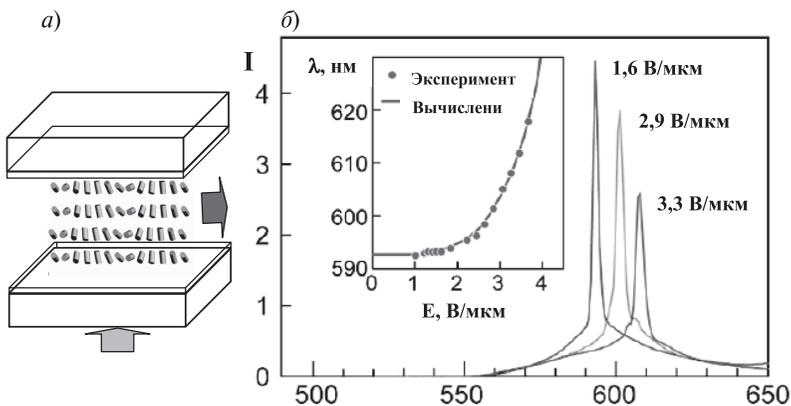


Рис. 9.6. а) схема микролазера (ось геликода лежит в плоскости слоя ЖК); б) спектры излучения в зависимости от напряженности электрического поля для схемы (а); на вставке — экспериментальная и теоретическая зависимости длины волны генерации от поля [45]

тостабильного НЖК (ZLI-1695, Merck), прозрачного в широком спектральном диапазоне, включая ближнюю УФ область, показан на рис. 9.7 [46]. Для создания геликоидальной структуры в ZLI-1695 добавляется оптически активная добавка ZLI-811 (весовая концентрация 34%), фотоактивная в УФ диапазоне. При УФ облучении ZLI-811 происходит необратимая фототрансформация молекул и изменение

шага геликоида, что вызывает спектральный сдвиг запрещенной зоны. Управление длиной волны лазерного излучения осуществляется изменением времени воздействия УФ излучения на хиральную добавку. В качестве лазерного красителя использован 4-циано-4-децилокси-*p*-терфенил (0,5%). Этот краситель люминесцирует в диапазоне 390–400 нм. На рис. 9.7а приведены спектры люминесценции этого красителя в двух ячейках ЖК толщиной 40 мкм — в матрице нематика ZLI-1695 и в хиральном нематике (смесь ZLI-1695 и левосторонней хиральной добавки ZLI-811). В отличие от нематика, в спектре люминесценции красителя в хиральном нематике ярко выражен провал в области 400–415 нм.

Из дисперсионных зависимостей (рис. 9.1) следует, что провал связан с запретом распространения в области стоп-зоны излучаемых молекулами красителя фотонов с левосторонней круговой поляризацией. При импульсной накачке ( $\lambda = 355$  нм,  $\tau = 6$  нс) на длинноволновом краю зоны (415 нм) наблюдалась лазерная генерация (рис. 9.7б). На рис. 9.7в показан пример сдвига спектров лазерной генерации в длинноволновую область с увеличением дозы УФ облучения. Получено изменение длины волны генерации в диапазоне около 20 нм. В качестве фотоактивного компонента можно использовать сам нематик. Для этого подходят различные ЖК на основе азо- и азоксисоединений, способных к фотоизомеризации. Например, при исследовании ХЖК на основе ЖК-440 было установлено, что шаг геликоида уменьшался при облучении светом в интервале длин волн 330–400 нм [48, 51]. Эффект обратимый — величина шага геликоида возвращается к исходному значению при облучении светом с длинами волн более чем 410 нм. Высокая чувствительность азо- и азоксисоединений к действию света позволила вместо ртутной лампы использовать для управления шагом геликоида светодиоды. При использовании двух светодиодов с разным спектром излучения осуществлялось обратимое управление соотношением *транс*- и *цис*-изомеров и, как следствие, шагом геликоида: светодиод с максимумом излучения на длине волны 405 нм индуцировал *транс*-*цис*-изомеризацию в ХЖК с азо- или азокси- компонентом, а светодиод излучающий в области 466 нм — *цис*-*транс*-изомеризацию в той же смеси. В результате наблюдалось изменение величины шага спирали в диапазоне 70 нм [33, 50]. Введение в ХЖК двух красителей позволило расширить диапазон перестройки генерации до 100 нм [54]. О широком диапазоне перестройки (610–700 нм) в результате воздействия на фоточувствительную смесь сообщается и в работе [55].

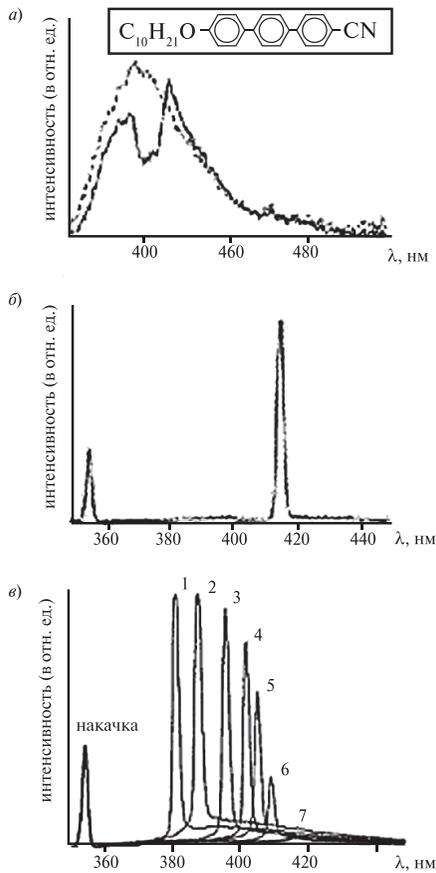


Рис. 9.7. а) спектры флуоресценции красителя в НЖК (пунктирная линия) и ХЖК (сплошная линия). На вставке — химическая формула красителя; б) спектры генерации в ХЖК; в) пример управления длиной волны лазерной генерации с помощью УФ облучения (1–6 для времен облучения 0, 5, 19, 33, 48 и 55 мин; кривая 7 — более 1 часа) [46]

Второй способ управления длиной волны излучения, основанный на изменении шага холестерической спирали путем создания градиента концентрации хиральной добавки, описан в работе [47]. Получен сдвиг длины волны генерации в пределах 30–40 нм. Для расширения полосы длин волн генераций была изготовлена специальная ячейка [49]. Использовались шесть красителей, позволивших охватить широкий спектральный диапазон от 373 до 684 нм. В ячейке был создан градиент концентрации хиральной добавки и, соответственно, переменный шаг геликоида. Для возбуждения генерации на одном из красителей в некоторых частях ячейки использовался эффект переноса энергии возбуждения от другого красителя по механизму Ферстера. В работе [52] для расширения диапазона излучения ХЖК лазера использованы оба рассмотренных способа. Для УФ воздействия на фотоактивную хиральную добавку использовалась маска с переменной оптической плотностью, что позволило получить градиент шага спирали. Исследовалась трехслойная ячейка, в которой между двумя слоями ХЖК находилась изотропная смесь с фотолюминесцентным красителем. Один слой ХЖК содержит материал с широкой полосой селективного отражения, а другой — набор ХЖК с разным шагом спирали с узкими полосами селективного отражения. При накачке разные длины волн излучаются различными областями ячейки. В результате диапазон генерации охватил спектральную область 420–790 нм.

Зависимость шага геликоида, а, следовательно, и длины волны лазерной генерации от температуры была использована для создания температурного сенсора [56]. Для этого ХЖК лазер был связан с оптическим волокном. Устройство имело малые габариты, отсутствие чувствительности к электромагнитному излучению и позволяло проводить измерения температуры объекта, расположенного на большом расстоянии.

Для управления параметрами стоп-зоны с помощью электрического поля в работе [57] используется гибридная ячейка, состоящая из двух генерирующих слоев ХЖК и не генерирующего (прозрачного) слоя НЖК между ними (рис. 9.8а). Слой нематика играет роль управляемой электрическим полем фазовой пластинки. Свет, проходя через него, изменяет свое состояние поляризации в зависимости от величины электрического поля. Это приводит к изменению спектральных свойств в области стоп-зоны и, как следствие, изменению глубины обратной связи, ответственной за возбуждение лазерной генерации (рис. 9.8б).

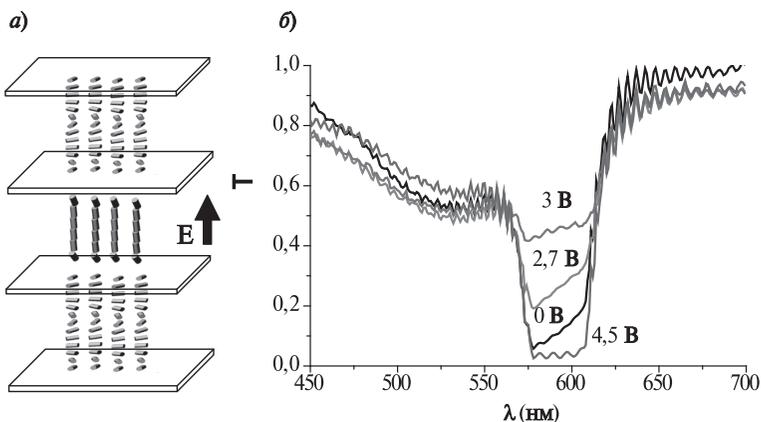


Рис. 9.8. а) Схема трехслойного микролазера с управлением генерацией электрическим полем, прикладываемым к среднему слою НЖК; б) спектры пропускания трехслойной системы в зависимости от напряжения на слое. Спектральная область 570–610 нм соответствует стоп-зоне в обоих хиральных слоях [57]

Продемонстрирована возможность электрического управления интенсивностью лазерного излучения и переключение генерации между соседними модами на краях стоп-зоны. Возможность управления интенсивностью при широкоапертурной накачке перспективна для создания информационных лазерных панелей, в которых излучение может быть коррелированным по фазе на большой площади, но при этом промодулировано по интенсивности в соответствии с информационным содержанием, адресуемым к отдельным пикселям панели.

Многослойные системы на основе ЖК открывают новые возможности и для увеличения эффективности ЖК лазеров, достигаемой при использовании рефлектора на основе ХЖК [58–60], а также за счет создания многослойной системы, разделяющей ХЖК и активную среду [61]. Использование слоя ХЖК как зеркала резонатора способствовало улучшению параметров обычных лазеров [62, 63].

### 9.1.5. Лазерная генерация в полимерах и дефектные моды

Если каким-либо образом нарушить пространственную периодичность изменения показателя преломления, то внутри стоп-зоны

возникнут разрешенные уровни энергий (дефектные моды). Это является результатом многократного френелевского отражения от дополнительных границ раздела, возникающих в тех пространственных точках, где нарушается глобальная периодичность или однородность структуры. Эффект многократных отражений может приводить к созданию глубокой обратной связи, что и требуется для низкопороговой лазерной генерации. Это эквивалентно сильному росту DOS для дефектной моды или локализации фотонов с соответствующей энергией. Существует много способов нарушения глобальной периодичности структуры, но наиболее просто это осуществляется в полимеризующихся материалах.

В работе [45] обсуждаются различные типы дефектов в структуре хиральных ЖК. Например, может быть создана структура из двух полимерных ХЖК слоев с нарушением непрерывности геликоида (твист-дефект) [64]. Другой способ основан на модуляции шага геликоида по толщине пленки (рис. 9.9). Это можно осуществить локальным воздействием на фотоактивную добавку или локальной фотополимеризацией с помощью сфокусированного пучка.

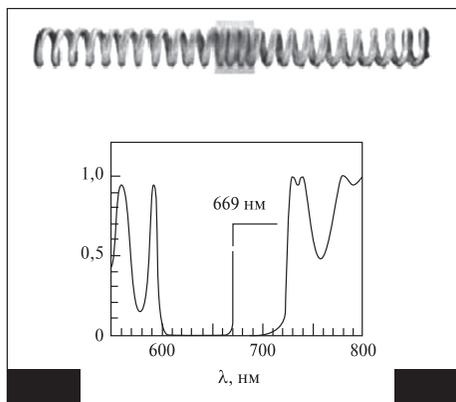


Рис. 9.9. Спектр пропускания хирального слоя при наличии дефекта в геликоидальном распределении директора. Дефект связан с сокращением шага геликоида в центре слоя (вставка сверху). Наличие дефекта приводит к возникновению узкой спектральной линии (669 нм) внутри стоп-зоны [45]

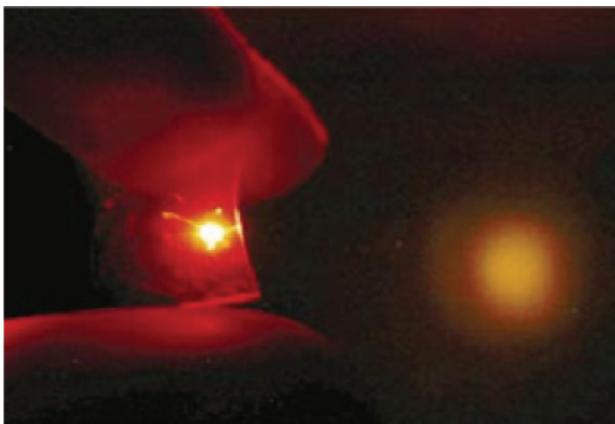


Рис. 9.10. Фотография лазерного излучения от фотополимеризованной свободной пленки ХЖК, допированной красителем. Справа на экране (на расстоянии 8 см от пленки) — пятно от генерируемого излучения [66]

В [45, 65] описан способ создания дефекта с использованием конфокального сканирующего микроскопа на основе фемтосекундного лазера для приповерхностной двухфотонной фотополимеризации хирального ЖК. Средняя (не фотополимеризованная) часть слоя ЖК играла роль дефекта. Удалось создать высокочастотные дефектные моды и получить низкочастотную лазерную генерацию.

Полимерные материалы позволяют создавать лазеры в виде гибких пленок [72]. Фотополимеризуемый ХЖК с лазерным красителем ориентировался двумя подложками ячейки так, что директор был параллелен плоскости слоя. Для фотополимеризации мономера использовалось УФ облучение. После фотополимеризации подложки убирались, и получалась свободная гибкая пленка. Для возбуждения генерации использовалась накачка от YAG-Nd<sup>+3</sup> лазера с энергией в импульсе более 1,5 мДж/см<sup>2</sup>. Рис. 9.10 иллюстрирует генерацию в деформированной фотополимерной пленке ХЖК с красителем.

Наряду с механической гибкостью, этот лазер обладает повышенной температурной стабильностью, что важно для применений. Описанное устройство, однако, не позволяло изменять длину вол-

ны лазерного излучения. Эта задача решена в работе [44], где было получено управление генерацией в диапазоне  $\sim 100$  нм. В пленке имело место плавное увеличение шага геликоида с осью, параллельной поверхности пленки. Такая ориентация достигалась приложением электрического поля вдоль нормали к слою неполимеризованного ХЖК в клиновидной ячейке при охлаждении из изотропной фазы. После охлаждения образец фотополимеризовался УФ излучением, фиксирующим конфигурацию директора. Управление длиной волны лазерного излучения осуществлялось перемещением пленки относительно пучка накачки.

В работе [67] приведены результаты исследования генерации излучения композита на основе ХЖК, допированного красителем, и полимера. Накачка осуществлялась наносекундными импульсами YAG-Nd<sup>+3</sup> лазера. Полимер добавлялся для формирования сетки, стабилизирующей структуру, так как накачка вызывала нагрев и нарушение характеристик брэгговского отражения. Использование пикосекундных импульсов при накачке также уменьшало нагревание. Для генерации единичных импульсов ЖК ячейка была толщиной  $\sim 10$  шагов геликоида. Накачка осуществлялась под углом 45° к поверхности ячейки, а генерация происходила вдоль нормали к ней.

## **9.2. Квазиволноводный и волноводный режимы лазерной генерации**

### ***9.2.1 Лазерная генерация на вытекающих модах (квазиволноводный режим)***

Особенностью лазеров на ЖК является малая толщина слоев жидких кристаллов. В условиях широкоапертурной накачки, когда характерный размер сечения возбуждающего пучка существенно превышает толщину слоя ЖК, условие лазерной генерации может быть одновременно выполнено для множества направлений [25, 35]. Особенно интересной оказывается генерация на вытекающих модах — лазерное излучение выходит в подложки, ограничивающие слой ЖК, и распространяется под очень малыми углами по отношению к его плоскости. Для возбуждения вытекающих мод не требуется пространственная модуляция показателя преломления в слое ЖК. Необходимая для генерации обратная связь обеспечивается разностью показателей преломления на границах раздела слоя ЖК и подложек при условии постоянства толщины слоя и его однородности в плоскости. В зависимости от соотношения индексов пре-

ломления подложки и слоя ЖК различаются два типа мод: скользящие и критические [25]. Для скользящих мод коэффициент усиления  $\alpha_g$ , требуемый для возбуждения генерации, стремится к нулю, если угол вытекания, отсчитываемый от нормали к слою, стремится к  $90^\circ$ . То есть, самые низкопороговые моды распространяются в подложке практически параллельно слою ЖК. Скользящие моды возбуждаются для тех состояний поляризации, для которых индекс преломления ЖК больше индекса преломления подложки. Для возбуждения критических мод требуется, чтобы, как минимум один из принципиальных индексов преломления ЖК был меньше индекса преломления подложки. Для этих мод характерно существование внутри подложек критического угла, выше которого вытекание невозможно. В отличие от скользящих мод, критические моды характеризуются высокой угловой плотностью и большой спектральной дисперсией генерируемой длины волны при коэффициенте усиления  $\alpha_g$ , стремящемся к нулю. Эти моды эффективно возбуждаются, обеспечивая многомодовую генерацию в широком спектральном диапазоне. Вытекающие моды исследовались экспериментально [28, 68–70]. В работе [68] вытекающие моды наблюдались впервые в изотропной и нематической фазах. Многомодовая лазерная генерация осуществлялась из торцов подложек при импульсной накачке ( $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ,  $\lambda = 532$  нм,  $\tau = 5$  нс). Пучок накачки фокусировался с помощью цилиндрической линзы в узкую область ( $7 \times 0,8$  мм<sup>2</sup>) (рис. 9.11). Моды с малым пространственным периодом переотражения выходят из стекол наружу без достаточного усиления. Для мод с большим периодом переотражения коэффициент отражения от внутренних поверхностей подложек (стекло и прозрачный электрод из ИТО) возрастает и усиление достаточно для возникновения генерации. Эти моды выходят в подложки наружу из торцов под малыми углами по отношению к подложкам. Измеренный порог возбуждения генерации составил менее  $0,5$  мДж/см<sup>2</sup>, что на порядок меньше величины значений порогов, достигнутых на краях заперешенной зоны в лучших образцах хиральных ЖК.

В работе [70] вытекающие моды были исследованы в хиральных ЖК, в которых они конкурируют с брэгговскими модами на краю стоп-зоны. Вместо одной из подложек была использована призма с индексом преломления, превышающим индексы преломления ЖК. Таким образом, были исследованы вытекающие критические моды. Использование призмы позволило точно измерить углы вытекания и сравнить экспериментальные результаты с теоретическими вычислениями.

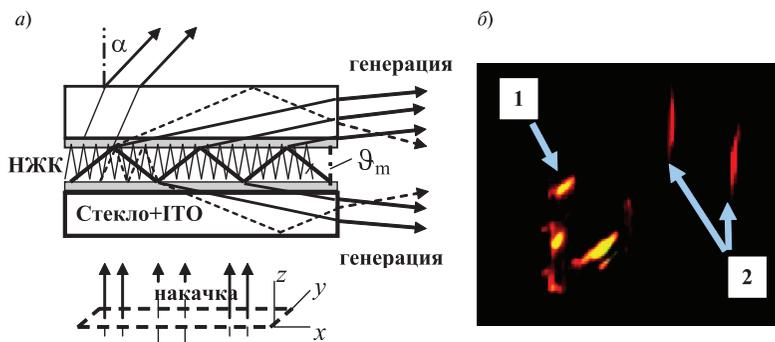


Рис. 9.11. а — схема квазिवолноводной ячейки ЖК [68]. Накачка осуществляется вдоль оси  $z$  в узкой и протяженной области слоя ЖК; б — ячейка (1) и два пучка лазерной генерации (2), выходящих из ячейки [25]

Было найдено количественное согласие с двумя теоретическими моделями: точной, основанной как на результатах численного решения уравнений Максвелла для многослойной системы, включающей слой ХЖК; приближенной, в которой для вытекающих мод слой ХЖК аппроксимируется оптически одноосным гомеотропно ориентированным слоем нематика.

Низкий порог возбуждения генерации делает вытекающие моды серьезным каналом утечки энергии при возбуждении генерации на краях запрещенной зоны в хиральных ЖК. В связи с этим актуальной становится задача подавления этих мод при широкоапертурной накачке. В работе [28] теоретически и экспериментально показано решение проблемы, основанное на использовании слабо поглощающей полимерной пленки в качестве ориентанта для слоя ЖК. В результате удалось существенно подавить вытекающие критические моды, увеличив эффективность брэгговской генерации на длинноволновом краю запрещенной зоны.

### 9.2.2. Волноводный режим лазерной генерации

Волноводный режим реализуется в тонком слое ЖК при условии полного внутреннего отражения от границ этого слоя (вытекание энергии в подложки в этом случае исключается). Генерация возможна как в однородных слоях за счет механизма, рассмотренного

выше для вытекающих мод, так и при пространственной модуляции комплексного показателя преломления (индекса преломления или показателя усиления).

Пример волноводного лазера, где для распределенной обратной связи используется модуляция показателя усиления, представлен в работе [71]. Схема этого лазера приведена на рис. 9.12. Накачка осуществлялась импульсным лазером (YAG-Nd<sup>3+</sup>,  $\lambda = 532$  нм,  $\tau = 5$  нс) в протяженной узкой области через периодическую штыревую систему непрозрачных электродов.

Штыревые электроды выполняли двойную задачу. Во-первых, области ЖК за электродами не подвергаются оптической накачке,

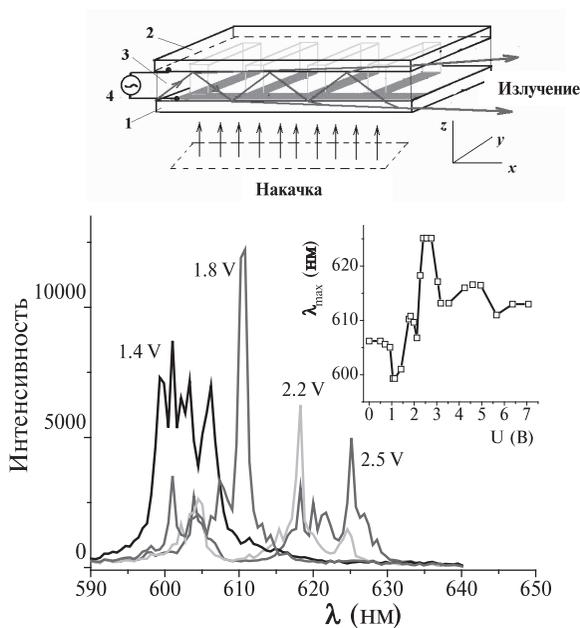


Рис. 9.12. Схема ячейки (вверху): 1 — стеклянная пластина с электродами из хрома на внутренней стороне, граничащей с НЖК; 2 — верхняя стеклянная пластина с прозрачным ITO электродом, контактирующим с ЖК; 3 — слой НЖК; 4 — источник напряжения. Внизу — спектры лазерного излучения при различных напряжениях на слое ЖК (на вставке — зависимость длины волны для максимума излучения от напряжения) [71]

в то время как области между электродами оказываются усиливающими. В итоге это создает пространственную модуляцию усиления и предпосылки для получения генерации на длинах волн:

$$\lambda_g(m, n) = n \frac{2\Lambda}{m}, \quad (9.6)$$

соответствующих различным брэгговским порядкам  $m$ , где  $n$  — средний индекс преломления слоя ЖК,  $\Lambda$  — пространственный период электродной системы.

Во-вторых, прикладывая электрическое напряжение между штыревыми электродами и сплошным электродом, расположенным на другой поверхности слоя ЖК, можно изменять индекс преломления  $n$  и, соответственно, длины волн лазерной генерации. В данном примере пространственный период, задаваемый электродами, достаточно велик (15 мкм). Лазерная генерация оказалась возможной на высших порядках брэгговской дифракции ( $m = 75-79$ ), соответствующих спектральной области 550–650 нм люминесценции лазерного красителя DCM (4-дицианометилен-2-метил-6-4-диметил-аминостирол-4н-пиран). Генерация получена как в изотропной, так и в нематической фазе. В нематической фазе изменением напряжения (0–6 В) удалось осуществить перестройку длины волны лазерной генерации в диапазоне от 600 до 625 нм (вставка на рис. 9.12).

В работе [72] показана возможность создания волноводного лазера на С\*ЖК с коротким шагом спирали, допированного красителем (рис. 9.13).

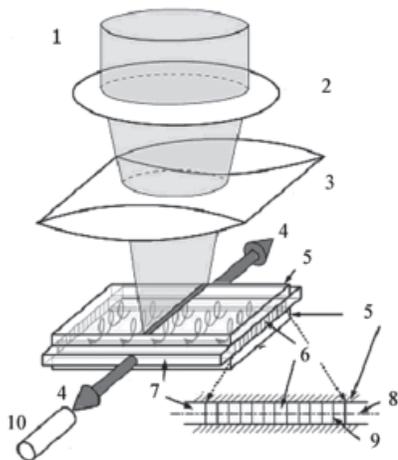


Рис. 9.13. Схема ячейки для лазерной генерации в волноводе на основе С\*ЖК: 1 — излучение накачки; 2 — собирающая линза; 3 — цилиндрическая линза; 4 — лазерное излучение; 5 — стеклянные подложки; 6 — С\*ЖК с красителем; 7 — прокладки; 8 — ось геликоида; 9 — слой С\*ЖК; 10 — приемник [72]

Генерация осуществлялась в направлении геликоидальной оси в волноводе (накачка перпендикулярно плоскости слоя). Управление длиной волны излучения происходило за счет изменения шага геликоида при приложении электрического поля. При возрастании напряжения от нуля до 40 В длина волны излучения изменялась от 472 до 487 нм.

### **9.3. Лазерная генерация в специфических материалах и жидкокристаллических фазах**

Перспективным для создания микролазеров является использование голографических полимер-дисперсных ЖК (H-PDLC) [73]. В этих материалах периодическая модуляция индекса рефракции реализуется методами стандартной оптической голографии. Исходная смесь H-PDLC содержит многофункциональный мономер, НЖК и фотоинициатор. При фотополимеризации в области интерференции пучков возникает разделение между возникающим полимером и НЖК (мономер диффундирует в области высокой интенсивности и полимеризуется, а молекулы НЖК собираются в областях низкой интенсивности). В результате возникает пространственно-периодическая структура с высокой степенью модуляции индекса преломления. Благодаря наличию ЖК компоненты такая структура может переключаться электрическим полем. Этим способом получены брэгговские структуры как для волноводного режима лазерной генерации, так и для генерации вдоль нормали к пленке. Так, для генерации вдоль нормали к пленке с полиметиниловым лазерным красителем РМ597 сообщается о достижении порогов возбуждения  $\sim 0.1$  мДж/см<sup>2</sup>. К недостаткам H-PDLC можно отнести то, что области с НЖК не являются в достаточной степени однородными и содержат много различных дефектов, связанных с неполным разделением ЖК и полимерной компонент. В результате использования других материалов и условий записи были созданы более совершенные голографические решетки (POLICRYPS и POLIPHEN) [74]. Как и в случае с H-PDLC, получение решеток основано на фазовом разделении в области интерференции записывающих лазерных пучков. Однако запись решеток типа POLICRYPS осуществляется при температурах выше точки просветления ЖК. В отличие от POLICRYPS запись решеток POLIPHEN идет при комнатных температурах. При записи решеток типа POLIPHEN важно подобрать условия записи. При высоких интенсивностях вместо качественных брэгговских структур типа POLIPHEN получаются типичные структуры типа H-PDLC [74].

К особым материалам можно отнести ЖК-эластомеры, представляющие собой полимерные материалы с сеткой поперечных связей и наличием мезогенных групп или соответствующих компонент. В этих материалах сочетаются свойства высокоэластичных полимеров и ЖК. В работе [75] сообщается о получении хиральных монодоменных пленок эластомеров с однородной геликоидальной надмолекулярной структурой. Благодаря высокой эластичности этих структур оказалось возможным изменять шаг геликоида с помощью механического растяжения пленок [76], что позволило управлять лазерной генерацией.

В работе [77] описан лазер на ХЖК с генерацией одновременно на нескольких длинах волн, причем их числом можно было управлять. В ХЖК добавлялась хиральная добавка с концентрацией, превышающей предел растворимости, создающая неоднородный раствор и мультидоменную структуру. Получена генерация на 9 длинах волн в диапазоне 600–675 нм. Управление осуществлялось изменением температуры с различной скоростью.

Рассмотренные выше хиральные фазы соответствуют одномерным фотонным кристаллам. Однако, возможные ЖК фазовые состояния, которые характеризуются надмолекулярной структурой, обладающей свойствами трехмерных (3D) фотонных кристаллов, когда запрещенная зона возникает для всех направлений распространения света. Эти фазы называются «голубыми» и характеризуются кубической симметрией. Впервые лазерная генерация в голубой фазе наблюдалась в работе [78]. Лазерное излучение возникает во всех трех ортогональных направлениях. В холестерических материалах голубые фазы возникают в промежутке между изотропной и холестерической фазами, составляющем всего несколько градусов. В полимерно-стабилизированных ЖК материалах температурный диапазон голубой фазы может быть существенно расширен. Так, в работе [79] получена генерация в голубой фазе в температурном диапазоне 35°C. Возможность значительного расширения температурного диапазона голубой фазы важна для применений 3D-фотонных ЖК.

#### 9.4. Усилители лазерного излучения на жидких кристаллах

Согласно выражению Когельника-Шанка (9.1) для возбуждения лазерной генерации на длине волны 600 нм в слоях хиральных НЖК ( $\Delta n = 0,1$ ,  $L = 10$  мкм) необходимо, чтобы показатель усиления  $\alpha_g$  инверсной ЖК среды достигал значения  $\sim 0,04$  мкм<sup>-1</sup>. Впервые пря-

мые измерения значений показателя усиления  $\alpha_{g,\parallel}$  (вдоль направления директора) и  $\alpha_{g,\perp}$  (перпендикулярно директору) выполнены в работе [80]. Измерения были сделаны на планарно ориентированном слое НЖК ( $\Delta n = 0,11$ ,  $L = 30$  мкм) с лазерным красителем оксазин-17 (0,3%). Наряду с увеличением показателя усиления по мере увеличения плотности накачки было установлено, что показатели усиления уменьшаются с увеличением энергии импульса на выходе усиливающего слоя. При накачке  $69$  мДж/см<sup>2</sup> (YAG: Nd<sup>3+</sup>,  $\lambda = 532$  нм) и изменении энергии усиленного импульса в диапазоне от  $5$  до  $30$  нДж показатели усиления изменялись соответственно в диапазоне от  $0,05$  до  $0,01$  мкм<sup>-1</sup>. Полученные значения согласуются с вычислениями по формуле (9.1) и тем экспериментальным фактом, что для возбуждения генерации в хиральных нематиках на краю стоп-зоны, как правило, требуются толщины слоев, превышающие  $10$  мкм. Найденная анизотропия усиления в данном случае оказалась положительной ( $\alpha_{g,\parallel} - \alpha_{g,\perp} > 0$ ).

В работе [80] также продемонстрирована возможность использования планарно-ориентированного слоя ЖК в качестве усилителя для микролазера на ХЖК. Схема возбуждения лазерной генерации на элементе ХЖК с последующим ее усилением приведена на рис. 9.15 (вверху). Накачка лазера и усилителя осуществлялась вдоль нормали к соответствующим слоям ЖК. Плотность энергии накачки от YAG-Nd лазера  $41$  мДж/см<sup>2</sup>. На рис. 9.15 показаны также спектр лазерной генерации  $W_0$  на входе усиливающего элемента (кривая 1), спектр супер люминесценции на выходе усилителя в отсутствие излучения  $W_0$  на входе (кривая 2), а также спектр  $W$  излучения на выходе ячейки усилителя при подаче излучения  $W_0$  на его вход (кривая 3). Коэффициент усиления  $K_{\perp} = W/W_0 = \exp(\alpha_{g,\perp} L)$  оказывается значительным ( $K_{\perp} \approx 15$ ). Приведенные результаты соответствуют поляризации усиливаемого излучения перпендикулярной директору. При толщине слоя НЖК  $L=50$  мкм анизотропия показателей усиления соответствует отношению коэффициентов усиления  $K_{\parallel}/K_{\perp} \approx 1,6$ . Это отношение определяет тот динамический диапазон, в котором можно изменять усиление с помощью электрического поля. Увеличить его можно увеличением толщины слоя, либо выбором красителя с более высокой анизотропией поглощения и усиления.

Таким образом, на основе ЖК можно создавать не только генераторы, но и усилители лазерного излучения. Анизотропия усиливающих свойств ЖК может быть использована для управления коэффициентом усиления с помощью электрического поля.

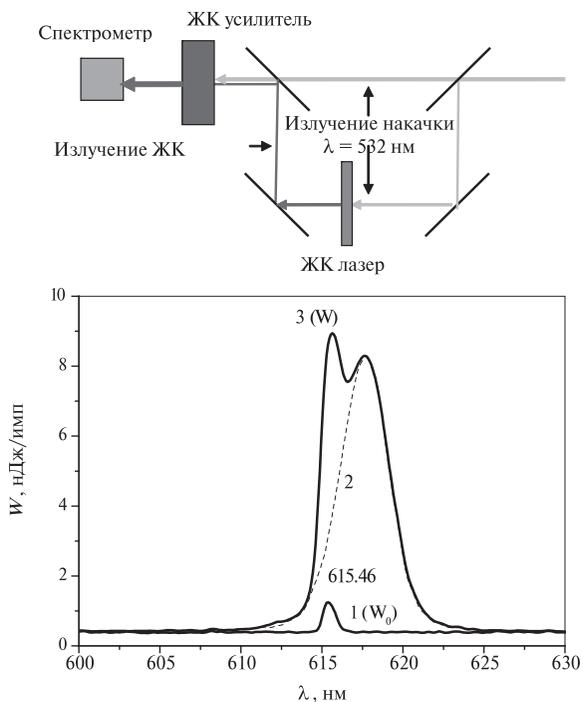


Рис. 9.15. Вверху — схема для изучения усиления генерации от микролазера на ХЖК с помощью усилителя на НЖК. Внизу — спектр излучения от ЖК микролазера ( $\lambda = 615,46 \text{ нм}$ ), измеренный на входе усиливающей ячейки (1), и спектры усиленного излучения на выходе ячейки в отсутствие (2) и при наличии (3) усиливаемого излучения на входе [80]

### 9.5. Управляемые оптические диоды на основе хиральных ЖК

Для информационных технологий большой интерес представляют управляемые электрическим полем оптические диоды, пропускающие поляризованный свет в одном направлении и не пропускающие его в противоположном направлении. Физический принцип работы такого диода состоит в следующем. В области запрещенной зоны правосторонний ХЖК пропускает свет левой цир-

кулярной поляризации и отражает правую циркулярную поляризацию. Если, например, между источником, генерирующим свет левой циркулярной поляризации, и слоем ХЖК поместить полуволновую пластину, то свет левой циркулярной поляризации будет преобразован в свет правой циркулярной поляризации, и слой ХЖК отразит этот свет. Если же теперь источник циркулярно поляризованного света перенести на другую сторону слоя ХЖК (оставив полуволновую пластинку на старом месте), то теперь поляризация света от источника будет оставаться левосторонней и не будет испытывать отражения от слоя ХЖК. Свет последовательно пройдет через слой ХЖК и полуволновую пластинку. Таким образом, слоистая система из полуволновой пластинки и слоя ХЖК представляет собой оптический диод.

В работе [81] предложена гетероструктура, содержащая слой НЖК между двумя слоями полимерных ХЖК с различным шагом спирали ( $P_1 < P_2$ ), в которой диодный эффект и его направленность зависят от частоты света. Эта структура имеет аналог в природе у жуков *Plusiotis batesi* и *Plusiotis respiciens* (рис. 9.16а), отличающихся характером селективного рассеяния света. В случае *Plusiotis batesi* наблюдается различное рассеяние света левой и правой циркулярной поляризации (отражается свет только левой поляризации); в случае *Plusiotis respiciens* наблюдается рассеяние света обеих поляризаций. Это вызвано наличием у *Plusiotis respiciens* анизотропного слоя, выполняющего функцию полуволновой пластинки, который расположен между двумя левовращающимися слоями. В гетероструктуре (рис.9.16б) дисперсионные зависимости для прямого и обратного прохождения света определяются наличием оптически анизотропного слоя. На рис.9.16в приведены две дисперсионные кривые {зависимость частоты излучения  $\omega$  от волнового числа  $k$ ;  $q = 2\pi/P_i (i = 1, 2)$ } для света с левой циркулярной поляризацией для ХЖК<sub>1</sub> и ХЖК<sub>2</sub>. Линии 1 и 2 соответствуют прямому и обратному прохождению света. Зоны селективного отражения одинаковы для прямого и обратного прохождения света: эффект оптического диода отсутствует. На рис. 9.16г показаны дисперсионные кривые для гетероструктуры с анизотропным слоем, где ХЖК имеют разный шаг спирали. Спектральные характеристики зависят от направления распространения света, демонстрируя эффект оптического диода. В отличие от диода состоящего лишь из одного слоя ХЖК и фазовой пластинки, в данном случае «направленность» диода зависит от частоты и состояния поляризации источника све-

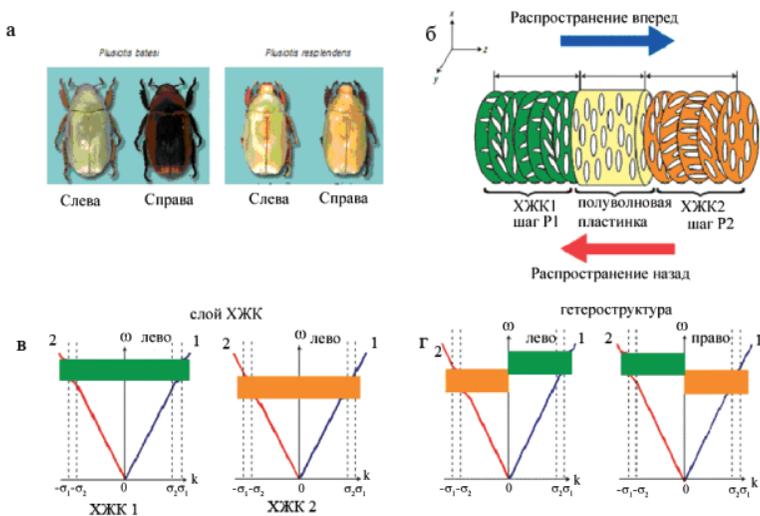


Рис. 9.16. а — фотографии жуков *Plusiotis batesi* с одной геликоидальной структурой и обычным характером селективного отражения, и *Plusiotis respledens* с анизотропным слоем между двумя левовращающимися слоями ХЖК с одинаковым шагом спирали, отражающий свет обеих поляризаций; б — гетероструктура, содержащая слой НЖК между двумя слоями ХЖК с различным шагом спирали, в которой наблюдается диодный эффект; в — две дисперсионные кривые для левовращающего света в случае ХЖК<sub>1</sub> и ХЖК<sub>2</sub>; линии 1 и 2 соответствуют прямому и обратному прохождению света; г — дисперсионные кривые для гетероструктуры с анизотропным слоем [8]

та. Отметим, что диодный эффект отсутствует у жуков *Plusiotis respledens*, поскольку две запрещенные зоны (зеленая и оранжевая) охватывают один и тот же диапазон частот. Экспериментальная установка для изучения оптических свойств гетероструктуры и результаты исследований приведены на рис. 9.17. Белый свет, проходя через право- или левовращающий поляризатор, фокусируется на гетероструктуре (рис. 9.17а). Проходящий свет диспергирует на дифракционной решетке и на экране наблюдается цветное изображение (рис. 9.17б, в). Для изготовления гетероструктуры использовались две полимерные пленки ХЖК толщиной около 3 мкм с левозакрученной спиралью и различным шагом (центры стоп-зон 505 нм и 595 нм). Оси спирали были перпендикулярны к поверх-

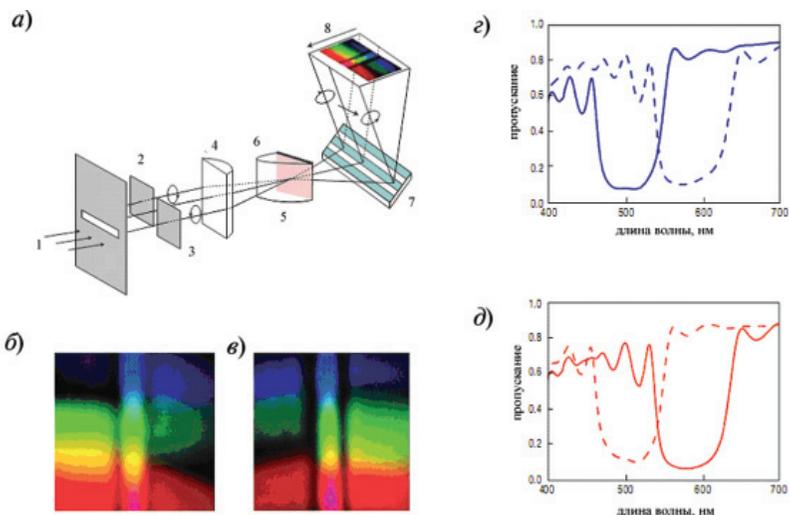


Рис. 9.17. Результаты исследования гетероструктуры: а) экспериментальная установка: 1 — излучение; 2 — левовращающий поляризатор; 3 — правовращающий поляризатор; 4 — цилиндрическая линза; 5 — цилиндрическая призма; 6 — образец; 7 — решетка; 8 — длина волны; б) картина дисперсии при прямом прохождении через ХЖК левовращающегося (слева) и правовращающегося (справа) циркулярно поляризованного света; в — как и б, но для обратного прохождения света; г, д — спектры пропускания гетероструктуры для прямого (г) и обратного (д) распространения света. Сплошные и пунктирные кривые соответствуют циркулярно поляризованному свету с направлением вращения, совпадающим и противоположным закрутке холестерической спирали [81]

ности подложки. Слой НЖК, обеспечивающий задержку 289 нм (примерно полуволновая фазовая пластинка), размещался между двумя слоями ХЖК. На рис. 9.17б и в приведены картины дисперсии при прямом и обратном прохождении через ХЖК левовращающегося (слева) и правовращающегося (справа) циркулярно поляризованного света. Зоны гетероструктур показаны темными областями, положение которых зависит от направления распространения света и характера его поляризации. Приведенные картины свидетельствуют о наличии оптического диодного эффекта. На длинах волн 501 и 577 нм интенсивность света при обратном

прохождении уменьшилась в 12 раз по сравнению с прямым прохождением.

Достоинством предложенной системы является использование НЖК как анизотропного слоя (полуволновой пластинки) с возможностью электрического управления. Это позволяет создать электроуправляемый оптический диод, что было невозможно осуществить в предшествующих разработках оптических диодов. В той же работе гетероструктура была использована для генерации лазерного излучения. В этом случае в НЖК вводился краситель. При использовании право- и левовращающегося поляризованного света лазерное излучение наблюдалось в прямом и обратном направлениях.

Аналогичные трехслойные структуры можно использовать для управления направленностью лазерного излучения, возникающего на краях стоп-зоны в двух различных слоях ХЖК<sub>1</sub> и ХЖК<sub>2</sub>, [82]. В ХЖК<sub>1</sub> стоп зона занимает область 448–525 нм, а в ХЖК<sub>2</sub> — 489–564 нм. Изменяя величину электрического напряжения на слое НЖК можно переключать спектральный состав генерируемого света для двух взаимно противоположных направлений распространения, как это показано на рис. 9.18. На рис. 9.18а генерация от ХЖК<sub>1</sub>

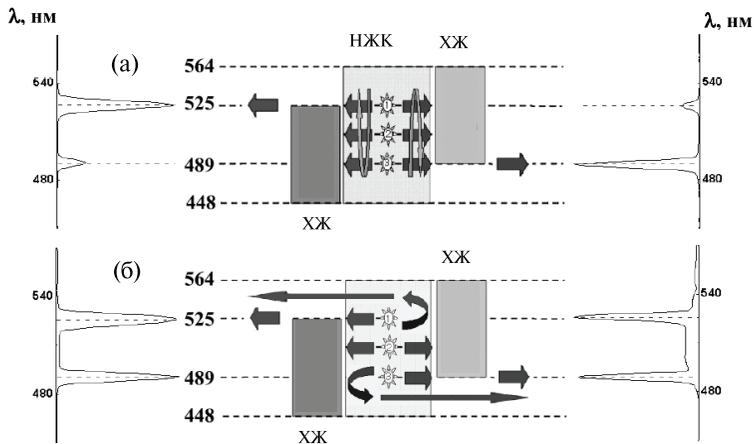


Рис. 9.18. Иллюстрация управления направлением и спектральным составом лазерного излучения в трехслойных структурах, аналогичных оптическим диодам [82]

на длинноволновом краю стоп-зоны (525 нм) распространяется в основном влево, так как НЖК меняет состояние поляризации генерируемого света так, что он почти не проходит вправо из-за отражения от ХЖК<sub>2</sub>. Аналогично, генерация на коротковолновом краю стоп-зоны (489 нм) от ХЖК<sub>2</sub> распространяется преимущественно вправо из-за отражения от слоя ХЖК<sub>1</sub>. Однако, электрическим напряжением на НЖК можно изменять состояние поляризации прошедшего через него света, генерируемого на длинах волн 525 нм и 489 нм слоями ХЖК<sub>1</sub> и ХЖК<sub>2</sub> соответственно. Таким образом, можно осуществить условия, когда излучение от каждого отдельного слоя ХЖК более не будет испытывать отражения от другого слоя, то есть генерация на двух длинах волн будет двунаправленной, рис. 9.18б.

Применение ЖК для генерации лазерного излучения представляет собой новое перспективное направление. Лазеры на ЖК не содержат зеркал, имеют малые габариты, низкие пороги генерации, что, в частности, позволяет реализовать каскадную схему возбуждения. Микролазеры на ЖК чувствительны к внешним воздействиям, и могут быть перестраиваемыми в УФ и видимом спектральном диапазоне. Использование хиральных полимерных ЖК дает возможность создания гибких лазерных элементов. Имеется возможность создания лазерных панелей с большой оптической апертурой. Такие панели могут содержать множество пикселей, управляемых с помощью электрического поля [57]. Это может лечь в основу создания нового поколения лазерных информационных дисплеев. Недостатками микролазеров являются невысокая термостабильность, большая расходимость и малая энергия излучения (до 100 нДж/импульс). Тем не менее, особенности микролазеров на ЖК открывают новые и интересные возможности их применения в устройствах фотоники [83].

Помимо использования ЖК для генерации лазерного излучения, следует отметить возможности их применения в качестве управляемых оптических элементов лазерных систем: электрически управляемый фильтр для изменения спектрального состава излучения, зеркала с управляемым селективным отражением излучения, экраны для ослабления пятнистой структуры когерентно-оптического изображения [84–88].

## Литература к главе 9

- 1 Dowling J.P., Scalora M., Bloemer M.J., Bowden C.M. The photonic band edge laser: A new approach to gain enhancement // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. P. 1896–1899.
- 2 Puffy-Muchoray P., Cao W., Moreira M., Taheri B., Munoz A. Photonics and lasing in LC materials // Phil. Trans. R. Soc. A. 2006. Vol. 364. P. 2747–2761.
- 3 Kogelnik H., Shank C.V. Stimulated emission in a periodic structure // Appl. Phys. Lett. 1971. V. 18. P. 152–154; J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 2327–2335.
- 4 Goldberg L.S., Schnur J.M. Tunable internal feedback LC laser. US patent 3,771,065. 1973.
- 5 Ильчишин И.П., Тихонов Е.А., Тищенко В.Г., Шпак М.Т. Генерация перестраиваемого излучения примесными ХЖК // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 32. С. 27–30.
- 6 Белоцкий Е.Д., Ильчишин И.П., Лев Б.И., Толмачев А.В., Томчук П.М., Шпак М.Т. Эффект несоизмеримости в НЖК с индуцированной гиротропией // Письма ЖЭТФ. 1990. Т. 51. С. 216.
- 7 P'chishin I.P., Tikhonov E.A., Tolmachev A.V., Fedoryako A.P., Shpak M.T. Harmonic distortion of the induced helical structure of the NLC detected by the distributed feedback laser // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1990. Vol. 191. P. 351–355.
- 8 P'chishin I.P., and Vakhnin A.Yu. Detecting of the structure distortion of ChLC using the generation characteristics of the distributed feedback laser based on it // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1995. Vol. 265. P. 687.
- 9 Kopp V.I., Zang Z.-Q., Genack A.Z. Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in ChLC // Opt. Lett. 1998. Vol. 23. P. 1707–1709.
- 10 Taheri B., Puffy-Muchoray P., Kabir H. Lasing in cholesteric band-gap materials // In ALCOM Symp. Chiral materials and applications. 1999. Cuyahoga Falls, OH. P. 18–19.
- 11 Shibaev P.V., Tang K., Genack A.Z., Kopp V., Green M.M. Lasing from a polymeric lyotropic cholesteric LC // Macromolecules. 2002. V. 35. P. 3022–5.
- 12 Chambers M., Fox M., Grell M., Hill J. Lasing from a Furster transfer fluorescent dye couple dissolved in a chiral NLC // Adv. Mater. 2002. Vol. 12. P. 808.
- 13 Ozaki R., Matsui T., Ozaki M., Yoshino K. Electrically color-tunable defect mode lasing in one dimensional photonic-band-gap system containing liquid crystal // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 3593.
- 14 Araoka F., Shin K.-C., Takanishi Y., Ishikawa K., Takezoe H., Zhu Z.G., Swager T.M. How doping a ChLC with polymeric dye improves an order parameter and makes possible low threshold lasing // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 94. P. 279–283.
- 15 Lo D., Ye C., Wang J. Distributed feedback laser action by polarization modulation // Appl. Phys. 2003. B76. P. 649.
- 16 Song M.H., Park B., Shin K.-C., Ohta T., Tsunoda Y., Hoshi H., Takanishi Y., Ishikawa K., Watanabe J., Nishimura S., Toyooka T., Zhu Z., Swager T.M., Takezoe H. Effect of phase retardation on defect mode lasing in polymer ChLCs // Adv. Mater. 2004. Vol. 16. № 9–10. P. 779.

- 17 *Strangi G., Barna V., Caputo R., de Luca A., Versace C., Scaramuzza N., Umeton C., Bartolino R., Price G.* Color-tunable organic microcavity laser array using distributed feedback // *Phys. Rev. Lett.* 2005. Vol. 94. P. 063903.
- 18 *Haase W., Podgornov F., Matsuhisa Y., Ozaki M.* Lasing in dye-doped chiral LCs: influence of defect modes / In *Nanophotonic Materials. Photonic crystals, plasmonics and metamaterials*. Ed. by R.B. Wehrspohn, H.-S. Kitzerov, K. Busch. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2007. P. 239–248.
- 19 *Chilaya G., Chanishvili A., Petriashvili G., Barberi R., Gipparone G., Mazzulla A., Sellame H., Mairanga M.A.* Lasing in three layer systems consisting of ChLCs and dye solution // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2008. Vol. 495. P. 97–105.
- 20 *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.
- 21 *Кац Е.И.* Оптические свойства холестерических жидких кристаллов // *ЖЭТФ* 1970. Т. 59. С. 1854–1862.
- 22 *Yeh P., Gu C.* *Optics of Liquid Crystal Displays*. John Wiley & Sons. 1999.
- 23 *Bendickson J.M., Dowling J.P., Scalora M.* Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finale, one-dimensional, photonic band-gap structures // *Phys. Rev. E* 1996. Vol. 53. P. 4107.
- 24 *Kopp V.I., Zang Z.-Q., Genack A.Z.* Lasing in chiral photonics structures // *Progr. Quant. Electron.* 2003. Vol. 27. P. 369.
- 25 *Palto S.P.* Lasing mode leakage in nematic and cholesteric layers // Chapter 8. In *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.
- 26 *Moreira M.F., Relaix S., Cao W., Taheri B. and Palffy-Muhoray P.* Mirrorless lasing and lasing thresholds in cholesteric liquid crystals // Chapter 12 in *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.
- 27 *Палто С.П.* Электрооптика и фотоника ЖК // *УФН*. 2005. Т. 175. Вып. 7. С. 784–790.
- 28 *Палто С.П., Штыков Н.М., Барник М.И., Уманский Б.А.* Увеличение эффективности лазерной генерации в фотонных структурах на основе ХЖК // *Кристаллография*. 2010. Т.55. № 2. С. 313–323.
- 29 *Ozaki M., Matsuhisa Y., Yoshida H., Ozaki R, Fujii A.* Photonic crystals based on chiral LCs / In *Nanophotonic Materials. Photonic crystals, plasmonics and metamaterials*. Ed. by R.B. Wehrspohn, H.-S. Kitzerov, K. Busch. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2007. P. 251–267.
- 30 *Bobrovsky A.Y., Boiko N.L., Shibaev V.P., Wendorff J.H.* Cholesteric mixtures with photochemically tunable, circularly polarized fluorescence // *Adv. Mater.* 2003. Vol. 15. P. 282.
- 31 *Shibaev V.P.* Responsive cholesteric polymer lasers. // Chapter 7. In *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.
- 32 *Brackmann U.* *Laser Dyes*. Lambda Physik AG, Güttingen, Germany. 2000.

33 Chilaya G., Chanishvili A., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., Gipparrone G., Mazzulla A., Shibaev V.P. Reversible tuning of lasing in ChLCs controlled by light emitting diodes // *Advanced Materials*. 2007. Vol.19. Issue 4. P. 565–568.

34 *Palto S.P., Shtykov N.M., Umansky B.A., Barnik M.I. and Blinov L.M.* General properties of lasing effect in chiral liquid crystals // *Opto-Electronics Review* 2006. Vol. 14. N 4. P. 323–328.

35 *Палто С.П.* Лазерная генерация в тонких пленках ЖК // *ЖЭТФ*. 2006. Т. 130. С. 544–553.

36 *Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Baraderi R., Bartolino R., Gipparrone G., Mazzulla A.* Laser emission from a dye-doped ChLC pumped with by another ChLC laser // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. P. 3378.

37 *Coles H.J., Morris S.M., Ford A.D., Hands P.J.W. and Wilkinson T.D.* Red-green-blue 2D tuneable LC laser devices and displays // Chapter 13. In *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.

38 *Bartolino R., Blinov L.M.* Liquid crystal microlasers (introductory notes) // Chapter 1. In *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network (2010).

39 *Blinov L.M.* NLC cells as light amplifiers and DFB lasers. // Chapter 5. In *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.

40 *Belyakov V.A.* Low Threshold DFB Lasing in Chiral LC at Diffraction of Pumping Wave // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 453. P. 43–69.

41 *Matsuhisa Y., Huang Y., Zhou Y., Wu S.-T., Ozaki R., Takao Y., Fujii A. and Ozaki M.* Low-threshold and high efficiency lasing upon band-edge excitation in a cholesteric liquid crystal // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. P. 091114.

42 *Palto S.P., Blinov L.M.* Field Induced Unwinding of Cholesteric and SmC\* Helix: Expectations and Reality // *J. Soc. Elect. Mat. Eng.* 2005. Vol. 14. P. 115–8.

43 *Blinov L.M., Palto S. P.* Cholesteric Helix: Topological Problem, Photonics and Electro-optics // *Liquid Crystals* 2009. Vol. 36. Issue 10&11. P. 1037–1047.

44 *Yoshida H., Inoue Y., Isomura T., Matsuhisa Y., Fujii A., Ozaki M.* Position sensitive, continuous wavelength tunable laser based on photopolymerizable ChLCs with an in-plane helix alignment // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 94. P. 093306-1-3.

45 *Ozaki M. and Yoshida H.* Wavelength tuning and lowering of lasing threshold based on photon localization in chiral liquid crystals // Chapter 2. In *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.

46 *Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., Gipparrone G., Mazzulla A., Opiol L.* Phototunable lasing in dye-doped cholesteric LCs // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83, № 26. P. 5353–55.

47 *Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., Gipparrone G., Mazzulla A., Opiol L.* Lasing in dye-doped Cholesteric LCs: two new tuning strategies // *Adv. Mater.* 2004. Vol. 16. № 9–10. P. 791–795.

- 48 *Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., Gipparrone G., Mazzula A., Gimenez R., Opiol L., Pinol M.* Widely fine-tunable UV-VIS liquid crystal laser // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86. P. 051107.
- 49 *Chilaya G., Chanishvili A., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., De Santo M. P., Matranga M. A., Collings P.* Light control of ChLC using azoxy-based host materials // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 453. P. 123–140.
- 50 *Chilaya G.S.* Light-controlled change in the helical pitch and broad-band tunable ChLC lasers // *Crystallography Reports.* 2006. Vol. 51. Suppl. 1. S108-S118.
- 51 *Arinzon D., Levy E., Collings P., Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G.* *Trans-cis* isomerization of an azoxybenzene LCs // *Liquid Crystals.* 2007. Vol. 34. № 6. P. 707–718.
- 52 *Petriashvili G., Matranga M.A., De Santo M.P., Chilaya G., Barberi R.* Wide band gap materials as a new tuning strategy for dye doped ChLCs laser // *Optics Express.* 2009. Vol. 17. №6. P. 4553–4558.
- 53 *Barberi R. and Chilaya G.* Strategies for tunable cholesteric lasers // Chapter 11. In *Liquid Crystal Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.
- 54 *Lin T.-H., Chen Y.-J., Wu F.-C., Liu J.-H., Fuh A. Y.-G.* Lasing in photonic crystals based on dye-doped LC films // *Emerging LC technologies*. Ed. by Liang-Chy Chien. *Proceed. of SPIE.* 2005. Vol. 5741. P. 129–134.
- 55 *Furumi S., Yokoyama S., Otomo A., Mashiko S.* Phototunable photonic band-gap in a chiral LC laser device // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 84. № 14. P. 2491–93.
- 56 *Moreira M.F., Carvalho I.C.S., Cao W., Bailey C., Taheri B., Palffy-Muhoray P.* Cholesteric LC laser as an optic fiber-based temperature sensor // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. P. 2691.
- 57 *Barnik M.I., Blinov L.M., Lasarev V.V., Palto S.P., Umansky B.A., Sh-tykov N.M.* Lasing from photonic structure: cholesteric-voltage controlled nematic-cholesteric LC // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103. P. 123113-7.
- 58 *Mosini F., Tabiryian N.V.* ChLC resonator and systems with addressable colors // *SPIE Proceed.* 1993. Vol. 1982. P. 28–33.
- 59 *Zhou Y., Huang Y., Wu S.-T.* Enhancing ChLC laser performance using a cholesteric reflector // *Optics Express.* 2006. Vol. 14. №9. P. 3906–3916.
- 60 *Zhou Y., Jang E-E.A., Huang Y., Wu S.-T.* Enhanced laser emission in opposite handedness using a cholesteric polymer film stack // *Optics Express.* 2007. Vol. 15. № 6. P. 3470-3477.
- 61 *Chilaya G., Chanishvili A., Petriashvili G., Barberi R., Gipparrone G., Mazzulla A., De Santo, Sellame H., Matranga M.A.* Single mode lasing in multi-layer sandwiched systems consisting of ChLCs and dye solution // *SPIE Proceed.* 2007. Vol. 6637. P. 66370M1-6.
- 62 *Grebe D., Macdonald R., Eicher H.J.* ChLC mirrors for pulsed solid-state lasers // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1996. Vol. 282. P. 309–314.
- 63 *Lee J.C., Jacobs S.D., Gunderman T., Schmidt A., Kessler T.J., Skeldon M.D.* TEM mode and single longitudinal mode laser operation with a ChLC laser and mirror // *Opt. Lett.* 1990. Vol. 15. P. 959–961.

- 64 *Ozaki M., Ozaki R., Matsui T., Yoshino K.* Twist-Defect-Mode Lasing in Photopolymerized Cholesteric LC // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003. Vol.42. L472.
- 65 *Yoshida H., Lee C. H., Matsuhisa Y., Fujii A., and Ozaki M.* Optical tuning and switching of photonic defect modes in cholesteric liquid crystals // *Adv. Mater.* 2007. Vol. 19. P. 1187.
- 66 *Matsui T., Ozaki R., Funamoto K., Ozaki M., Yoshino K.* Flexible mirrorless lasers based on free-standing film of photopolymerized ChLC // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 81. № 20. P.3741-3743.
- 67 *Fuh A. Y.-G., Lin T.-H., Liu J.-H., Wu F.-C.* Lasing in chiral photonic LCs and associated frequency tuning // *Optics express.* 2004. Vol.12. № 9. P. 1857-63.
- 68 *Blinov L. M., Cipparrone G., Pagliusi P., Lazarev V.V., Palto S.P.* Mirrorless lasing from NLCs in the plane waveguide geometry without refractive index or gain modulation // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. P. 031114-1-3.
- 69 *Blinov L.M., Palto S.P., Lasarev V.V., Cipparrone G., Mazzulla A., Pagliusi P.* Quasi-in plane leaky lasing modes from thin waveguiding lasers of nematic and cholesteric LCs // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2007. Vol. 465. P. 37–50.
- 70 *Blinov L.M., Cipparrone G., Mazzulla A., Pagliusi P., Lasarev V.V., Palto S.P.* Quasi-in-plane leaky modes in lasing ChLC cells // *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 104. P. 103115-1-7.
- 71 *Blinov L.M., Cipparrone G., Mazzulla A., Pagliusi P., Lasarev V.V., Palto S.P.* Simple voltage tunable LC laser // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. P. 131103-1.
- 72 *Kasano M., Ozaki M., Yoshino K., Ganzke D., Haase W.* Electrically tunable waveguide laser based on FLC // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 82. P. 4026-4028.
- 73 *Simoni F., Lucchetta D.E., Criante L., Francescangeli O., Vita F.* Microlasers based on holographic PDLC structures // Chapter 10. In *LC Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.
- 74 *Slussarenko S., Vassetsov M., Abbate G., Stumpe J., Sakhno O.* PO-LIPHEM- gratings based DFB laser on the second order Bragg diffraction // Chapter 6. In *LC Microlasers*, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.
- 75 *Kim S.T. and Finkelmann H.* Cholesteric liquid single-crystal elastomers obtained by the anisotropic deswelling method // *Macromol. Rapid Commun.* 2001. Vol. 22. P. 429–433.
- 76 *Finkelmann H., Kim S.T., Mucoz A., Palffy-Muhoray P., and Taheri B.* Tunable Mirrorless Lasing in Cholesteric LC Elastomers // *Adv. Mater.* 2001. Vol. 13. P. 1069–1072.
- 77 *Wang C.-T., Lin T.-H.* Multi-wavelength laser emission in dye-doped photonic LCs // *Optics Express.* 2008. Vol.16, №22. P. 18334-18339.
- 78 *Cao W., Munos A., Palffy-Muhoray P., Taheri B.* Lasing in a three-dimensional photonic crystal of the LC blue phase // *Nature Mater.* 2002. Vol. 1. P. 111–113.
- 79 *Yokoyama S., Mashiko S., Kikuchi H., Uchida K., Nagamura T.* Laser Emission from a Polymer-Stabilized LC Blue Phase // *Adv. Mater.* 2006. Vol. 18. P. 48–51.

80 Штыков Н.М., Барник М.И., Блинов Л.М., Уманский Б.А., Палто С.П. Усиление генерации жидкокристаллического микролазера с помощью однородного ЖК слоя // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т.85. Вып.12. С. 734–737.

81 Hwang J., Song M.H., Park B., Nishimura S., Toyooka T., Wu J.W., Takahashi Y., Ishikawa K., Takezoe H. Electro-tunable optical diode based on photonic bandgap LC heterojunctions // Nature materials. 2005. Vol. 4. P. 384–387

82 Hideo Takezoe, Na Young Ha, Myoung Hoon Song, Soon Moon Jeong and Byoungchoo Park. Tuning laser light from liquid crystal lasers// Chapter 4. In Liquid Crystal Microlasers, Editors: L.M. Blinov & R. Bartolino. Published by Transworld Research Network 2010.

83 Невская Г.Е., Палто С.П., Томилин М.Г. Микролазеры на жидких кристаллах // Опт. журн. 2010. Т. 77. № 8. С. 13–31.

84 Бахшиев Н.Г., Студенов В.И., Томилин М.Г. Жидкие кристаллы в оптике лазеров. Аналитический обзор по отечественным и зарубежным материалам за 1970-1985 гг. ГОИ им. С.И. Вавилова. 1985. 113 с.

85 Белова Г.Н., Королев Ю.Н., Яковенко Г.Н. Внутривибрационная модуляция интенсивности лазеров на основе акустооптических эффектов в ЖК // Квант. электр. 1983. Т. 10. № 4. С. 851–854.

86 Gleeson Y.F., Murray A.J., Fraser E., Zoro A. An electrically addressed liquid crystal filter for tunable lasers // Opt. Commun. 2002. Vol. 212. P. 165–168.

87 Корнев А.Ф., Покровский В.П., Сомс Л.Н., Ступников В.К. Лазерные системы с внутренним сканированием // Опт. журн. 1994. № 1. С. 10–25.

88 Болгарь В.А., Лебедев В.И., Березин Н.П., Томилин М. Г., Шульман М.Я. Ослабление пятнистой структуры когерентно-оптического изображения при использовании ЖК экрана // Журн. опт. мех. пром. 1978. № 1. С. 62–63.

## *Глава 10*

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ**

Основной областью недисплейных применений ЖК являются пространственно-временные модуляторы света (ПМС). Они представляют собой электрооптические устройства, позволяющие осуществлять модуляцию интенсивности, фазы и поляризации излучения в пространстве и во времени [1–4]. Разработано большое количество модуляторов, использующих нематические ЖК. Для быстросдействующих ПМС применяются сегнетоэлектрические ЖК.

Электрически управляемые ПМС (ЭУ ПМС) работают как на отражение, так и на просвет (рис. 10.1).

ЭУ ПМС можно разделить на устройства, осуществляющие модуляцию излучения по всей апертуре оптической системы, и осуществляющие локальную модуляцию по адресуемым пикселям. Они предназначены для создания сложных изображений в слое ЖК при приложении к нему напряжения. Требуемый рельеф напряжения формируется с помощью активных матриц, состоящих из пикселей. Адресация матрицы пикселей осуществляется, как правило, на основе тонкопленочных транзисторов, диодной логики, или МОП (металл-окисел-полупроводник) транзисторов в монокристаллическом кремнии (с-Si). Схемы управления ПМС аналогичны описанным ранее схемам управления ЖКД. Известно большое число технологий, используемых в активных матрицах ПМС. Напряжение, приложенное к пикселям с помощью активной матрицы (АМ), может вызывать различные оптические эффекты в ЖК: S-эффект,

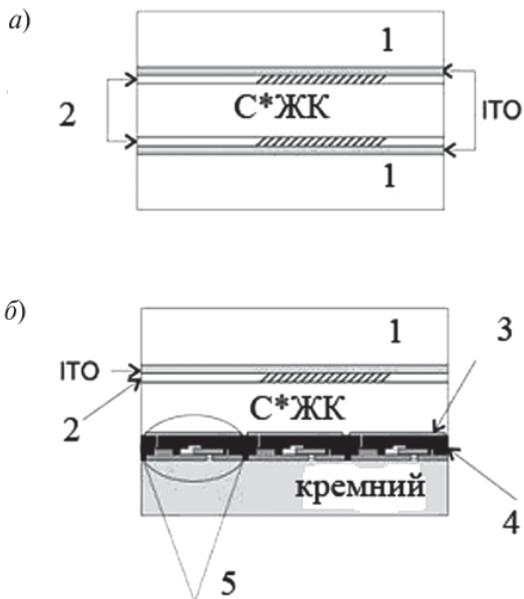


Рис. 10.1. Электрически управляемые модуляторы:  
 а — работающий на просвет с пассивной адресацией;  
 б — работающий на отражение с активной адресацией;  
 1 — стеклянные подложки; 2 — ориентирующий слой;  
 3 — отражательный электрод; 4 — пассивный слой;  
 5 — МОП транзисторы

твист-эффект в НЖК, PDLC (полимер-диспергированные) и PSLC (полимер-стабилизированные) на основе НЖК, и ряд эффектов в С\*ЖК. Недостатком ПМС на основе НЖК является малое быстродействие (в лучшем случае — доли миллисекунды).

Электрически управляемые ПМС, осуществляющие модуляцию излучения по всей апертуре оптической системы, являются наиболее простыми и наиболее разнообразными по конструкции. Разнообразии электрооптических эффектов, широкий диапазон показателей преломления и величин наводимого электрическим полем двулучепреломления в ЖК позволяет создать на их основе ряд активных интегрально-оптических элементов. Эти элементы осуществляют изменение фазы на  $\pi$ , модуляцию или отклонение лазер-

ного луча на значительный угол при малых величинах оптического пути и управляющих напряжений. Они обеспечивают частоту модуляции до 10 кГц с контрастным отношением примерно 1000:1 и могут работать в видимом и ИК диапазонах. Возможно использование просветных ПМС совместно с ЭЛТ при адресации электронным пучком. Для повышения быстродействия используют С\*ЖК. Характерные параметры быстродействующих ЖК модуляторов на различных эффектах в С\*ЖК приведены в табл. 10.1 [5].

Таблица 10.1

### Параметры модуляторов на С\*ЖК

Эффекты в С*ЖК Параметр	Эффект Кларка-Лагерволла	Деформация геликоида	Электроклинный
Время переключения, мкс	20–30	100–200	2–5
Толщина слоя ЖК, мкм	1,5–2	2–2,5	1,3–1,6
Управляющее напряжение, В	20–30	1–5	20–30
Шкала серого	нет	да, с гистерезисом	да

Из таблицы 10.1 следует, что к наиболее быстродействующим электрооптическим эффектам относится электроклинный эффект. Однако быстродействие не всегда является основным требованием, предъявляемым к модуляторам. Существуют также технологические сложности изготовления ПМС с толщиной слоя С\*ЖК менее 2 мкм.

Далее будут приведены примеры использования ЭУ ПМС в качестве элементов оптических устройств [6–9]: дефлекторов, оптических аттенюаторов, переключателей в системах телекоммуникации, управляемых фильтров и др.

### 10.1. Дефлекторы

Дефлекторы — это оптические элементы, отклоняющие оптический луч на определенный угол, а также осуществляющие сканирование луча в пространстве. Они используются для управления

ным лучом и применяются в устройствах связи, переключателях, проекционных дисплеях и в военных целях. Разработано два типа дефлекторов: дифракционные и призматические [7]. Обычно дифракционной решетке наблюдается несколько дифракционных порядков. Теоретическая дифракционная эффективность (ДЭ) в первом порядке составляет примерно 34%. Лазерные голографические решетки осуществляют концентрацию света в первом порядке. В качественной жидкокристаллической призматической решетке с призматическим профилем ДЭ в первом порядке может достигать величины около 100%. Рассмотрим наиболее распространенные типы дефлекторов на ЖК: призматические, на явлении полного внутреннего отражения, на управляемом двулучепреломлении, на дифракционных структурах, на ультразвуковых волнах, на клиновидной деформации и др.

### 10.1.1. Дефлекторы на основе дифракции

Дефлекторы на ЖК являются альтернативой механически переключаемых зеркал, скорость переключения которых является ограниченной. Дефлекторы на дифракционных структурах основаны на электрооптических эффектах, позволяющих получать фазовые дифракционные решетки. На рис.10.2 показана пилообразная решетка

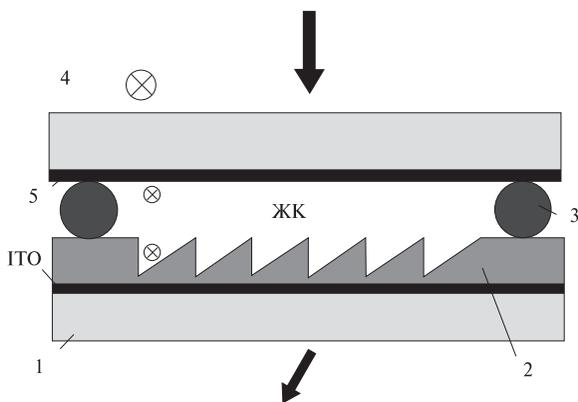


Рис. 10.2. Дефлектор на основе пилообразной решетки: 1 — стеклянная подложка; 2 — полиметилметакрилат; 3 — прокладка; 4 — направление поляризации падающего света; 5 — поляризатор [10]

со слоем ЖК, толщина которого изменяется периодически и асимметрично [10].

Решетка в полиметилметакрилате (ПММА) создается электронно-лучевой литографией. Показатель преломления ПММА близок к показателю преломления обыкновенного луча выбранного ЖК, но меньше показателя преломления необыкновенного луча. Поэтому в отсутствие поля распределение оптического пути в плоскости ячейки для падающего света имеет пилообразный профиль. При подаче достаточно высокого напряжения дифракция исчезает. Так осуществляется управление лазерным лучом.

Описанный профиль решетки приводит к искажению ориентации ЖК, что вызывает уменьшение ДЭ. Лучший результат получается, когда к однородному ЖК слою прикладывается напряжение пилообразной формы, создающее в нем дифракционную решетку (рис. 10.3) [11]. Внутренняя поверхность нижней прозрачной подложки содержит прозрачные полосчатые электроды с промежутком для создания фазового сдвига. На внутреннюю поверхность верхней подложки нанесен общий прозрачный электрод. На него нанесен слой  $\text{SiO}_2$  для ориентации молекул ЖК с углом наклона  $2-3^\circ$ .

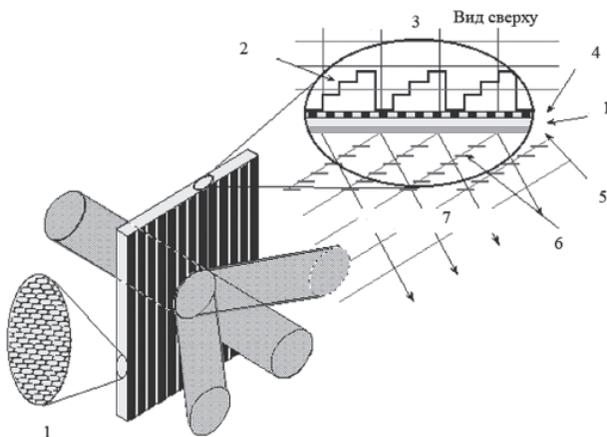


Рис.10.3. Схема фазовой дифракционной решетки: 1 — ЖК; 2 — напряжение; 3 — падающая плоская волна; 4 — полосчатые электроды; 5 — подложка; 6 — локальная фазовая задержка; 7 — выходная плоская волна [11]

При подаче необходимого напряжения между одним из выбранных полосчатых электродов и общим электродом в НЖК происходит переход Фредерикса и создается одномерный фазовый сдвиг. Величина угла, на который переориентируется НЖК, зависит от напряжения. Изменяя напряжение, можно получить ступенчатую фазовую решетку (вставка на рис. 10.3). Подбором ступеней напряжения можно создать линейно изменяющийся фазовый профиль. Так создается призма, отклоняющая луч в направлении  $\theta$ , заданным условием:

$$\sin\theta + \sin\theta_{inc} = \lambda_0/\Lambda \quad (10.1)$$

где  $\theta_{inc}$  — угол падения луча,  $\Lambda$  — период решетки. При нормальном падении луча формула (10.1) упрощается. Отклонение луча зависит от периода решетки и величины напряжения. Дифракционная эффективность  $\eta$  такой решетки в первом порядке связана с числом ступеней  $N$  [11]:

$$\eta = [\sin(\pi/N)/(\pi/N)]^2 \quad (10.2)$$

ДЭ быстро растет с увеличением  $N$  и достигает значения примерно 95% при восьми оптических элементах. Поэтому на практике обычно используются решетки с восемью электродами.

Периодическая решетка в слое ЖК может быть создана и другими способами: доменами Вильямса с постоянным периодом, флексоэлектрическими статическими доменами с периодом, зависящим от величины управляющего напряжения, возбуждением ультразвуковых волн и слоистыми структурами в ХЖК.

Дефлекторы на ультразвуковых волнах, создаваемых пьезоэлементом, формируют в слое ЖК дифракционную структуру. В соответствии с распределением пучностей волны произойдет частичная переориентация молекул ЖК и, в зависимости от частоты звука и толщины слоя ЖК, будет сформирована дифракционная решетка с определенным периодом, что позволит осуществить непрерывное отклонение светового луча.

Схемы рефракционных дефлекторов с плавным отклонением лучей показаны на рис. 10.4 [12]. Дефлектор, использующий клиновидную деформацию слоя НЖК, позволяет осуществлять плавное отклонение светового луча на значительный угол. Он состоит из двух стеклянных подложек 1 и 2 с прозрачными электродами 3 и слоя НЖК 4 с  $\Delta\epsilon > 0$ . В исходном состоянии НЖК имеет планарную

ориентацию. При подаче напряжений с полярностью, показанной на рис. 10.4а, входное излучение 5 проходит сквозь слой НЖК без изменения исходного направления 6. При изменении комбинации управляющих напряжений (рис. 10.4б) часть слоя НЖК переориентируется, другая сохраняет исходную ориентацию, и возникает область с промежуточной ориентацией. В этой области показатель преломле-

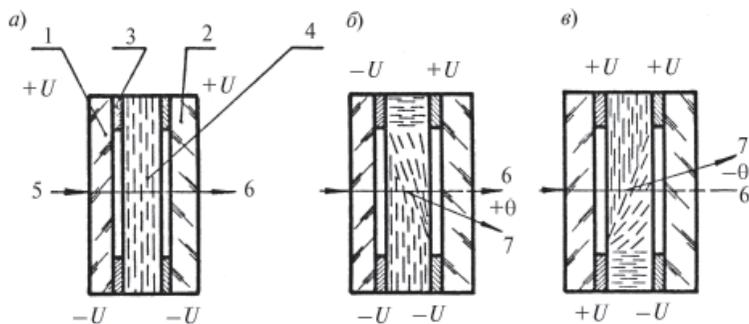


Рис. 10.4. Дефлектор на клиновой деформации: а — исходная планарная ориентация;  $\Delta\epsilon > 0$ ; б, в — при комбинации напряжений для отклонения на углы  $\pm\theta$ . 1, 2 — стеклянные подложки с прозрачными электродами 3; 4 — слой НЖК; 5 — направление падающего излучения; 6 — исходное направление излучения; 7 — направление отклоненного излучения [12]

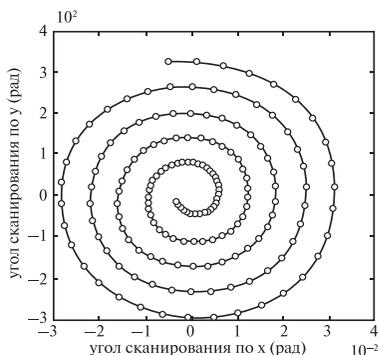
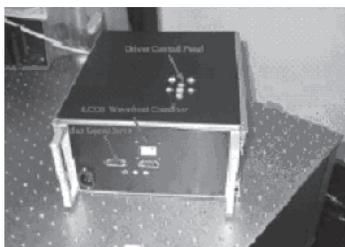


Рис. 10.5. Дефлектор на основе PDLC с отклонением луча по осям  $x$  и  $y$  [13]

ния слоя плавно меняется, формируя призму, отклоняющую излучение в направлении 7. Угол отклонения определяется углом призмы и разностью показателей преломления призмы и ЖК. В зависимости от разности потенциалов при неизменных геометрических размерах параметры «призмы» несколько меняются, изменяя и угол отклонения. Экспериментальный образец при толщине слоя  $d = 1\text{--}2$  мм, расстоянии между электродами 3–4 мм и  $U = 300\text{--}1000$  В обеспечил отклонение в одну сторону на  $20^\circ$  при скорости  $200^\circ/\text{сек}$ ; потери на поглощение и рассеяние составили 40%. Система из 8 электродов отклоняет луч по 2-м координатам.

Пример дефлектора с отклонением луча одновременно по осям  $x$  и  $y$  показан на рис. 10.5 [13].

Устройство также позволяет разделять падающее излучение на 2 или 4 луча и осуществлять их независимое отклонение.

### 10.1.2. Призменные дефлекторы

Дефлектор, использующий призму с углом клина  $\alpha$  и твистовую ячейку, осуществляющую поворот плоскости поляризации на  $90^\circ$ , представлен на рис. 10.6 [7]. В отсутствие электрического поля  $U = 0$  твистовая ячейка поворачивает падающий линейно поляризованный луч на  $90^\circ$ . Луч отклоняется на угол  $\theta_e$ . При подаче напряжения на твистовую ячейку директор молекул ЖК поворачивается перпендикулярно подложкам и вращение плоскости поляризации исчезает. В результате падающий линейно поляризованный оказывается обычным лучом (показатель преломления  $n_o$ ) для призмы и отклоняется на угол  $\theta_o$ .

Из закона Снеллиуса можно определить углы  $\theta_e$  и  $\theta_o$ :

$$n_e \sin \theta_{in} = \sin \theta_e \quad (10.3)$$

$$n_o \sin \theta_{in} = \sin \theta_o \quad (10.4)$$

Угол отклонения луча определяется разницей между углами  $\theta_e$  и  $\theta_o$ . Призма с большим двулучепреломлением обеспечит больший угол отклонения луча. Как видно на рис. 10.6 оба луча отклоняются от направления исходного луча. Для устранения этого недостатка была изготовлена двулучепреломляющая/изотропная бипризма (рис. 10.7) [14]. Коэффициент преломления верхней изотропной призмы был выбран равным  $n_e$  двулучепреломляющей призмы. Тогда падающий обыкновенный луч не отклоняется, в то время как необыкновенный луч будет отклоняться. Аналогично твистовая ячей-

ка используется для управления поляризацией. Следуя закону Снеллиуса, можно связать угол отклонения  $\delta$  с углом призмы и коэффициентом преломления двулучепреломляющей призмы:

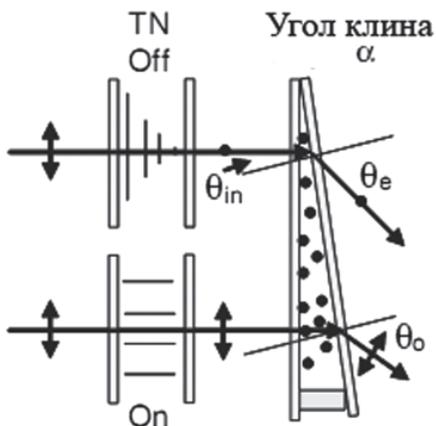


Рис. 10.6. Призменный дефлектор: в отсутствие поля из призмы выходит необыкновенный луч под углом  $\theta_e$ ; в электрическом поле — обыкновенный луч под углом  $\theta_o$  [7]

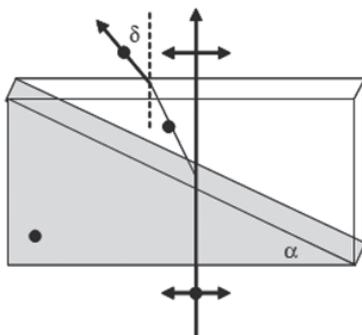


Рис. 10.7. Схема двулучепреломляющей/изотропной бипризмы для отклонения луча [14]

$$\delta = \sin^{-1}\{n_0 \sin[(\sin^{-1}((n_e / n_o)\sin\alpha)) - \alpha]\} \quad (10.5)$$

Если коэффициенты преломления двулучепреломляющей призмы  $n_e = 1,7$  и  $n_o = 1,5$ , то для получения угла отклонения в  $1^\circ$  требуемый угол призмы будет  $5^\circ$ . Используя ряд элементов, углы  $\alpha$  которых находятся в бинарном отношении, можно получить  $2^N$  отклонений.

### 10.1.3. Дефлекторы света на явлении полного внутреннего отражения в НЖК и С\*ЖК

Большой класс дефлекторов основан на явлении полного внутреннего отражения (ПВО) (рис. 10.8). При заданных соотношениях показателей преломления подложек и ЖК свет  $p$ -поляризации испытывает полное внутренне отражение от планарно ориентированного слоя ЖК, в то время как свет  $s$ -поляризации испытывает ПВО от гомеотропно ориентированного слоя ЖК. На этом принципе были созданы оптические дефлекторы на НЖК и С\*ЖК (рис. 10.9а и б) [15]. Устройство состоит из двух однородных стеклянных призм 1, на внутренней стороне которых нанесены прозрачные электроды. В зазоре между электродами размещен тонкий слой ЖК. Входящее излучение направляют под углом падения  $i > \theta_k$ , где  $\theta_k$  — критический угол, определяемый соотношением  $\sin\theta_k = n_0/n_{ст}$  ( $n_{ст}$  — показатель преломления стекла).

При использовании НЖК (рис. 10.9а), если показатель преломления  $n_{||} > n_{ст}$ , то в отсутствии управляющего напряжения  $p$ -поляризованный луч не испытывает полного внутреннего отражения от гомеотропно ориентированного слоя: свет проходит через верхнюю призму, слой НЖК, нижнюю призму и попадает на экран 4 в точку

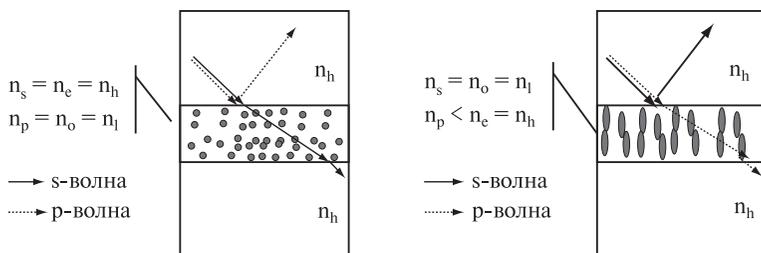


Рис. 10.8. Схема дефлектора, работающего на явлении ПВО

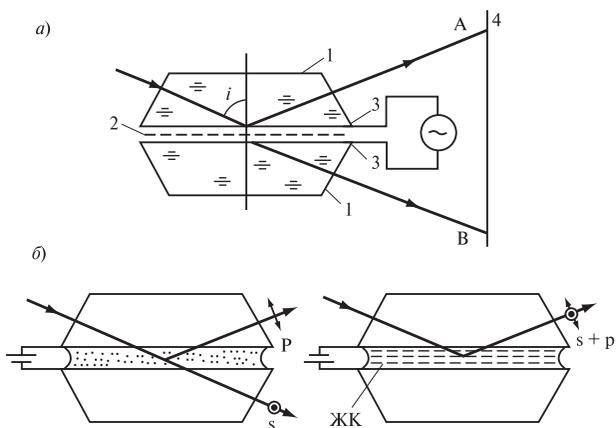


Рис. 10.9. Дефлекторы света на НЖК (а) и С\*ЖК (б): 1 — стеклянная призма; 2 — слой ЖК; 3 — прозрачные электроды; 4 — экран

В. При подаче напряжения выше порогового, на границе раздела призмы и НЖК происходит полное внутреннее отражение, так как  $n_{\perp} < n_{\text{ст}}$ ; свет отражается в точку А. Получены времена переключения  $t_{\text{вкл.}} = 35$  мкс,  $t_{\text{вык.}} = 88$  мкс; контрастное отношение — 50:1.

При использовании С\*ЖК (рис. 10.9б) при управляющем напряжении  $U = \pm 45$  В, времена переключений составили 20 мкс, контрастное отношение — 8:1. Дефлектор работал в диапазоне длин волн 400–1600 нм. По методике, описанной в работе [15], было получено ослабление сигнала до 500000 в отсутствии напряжения.

## 10.2. ЖК элементы в системах телекоммуникации

В системах телекоммуникации жидкокристаллические ЭУ ПМС используются в качестве оптических аттенуаторов, переключателей и фильтров в видимом и ИК диапазонах длин волн.

### 10.2.1. Оптические аттенуаторы

Оптические аттенуаторы являются элементами, осуществляющими плавную регулировку мощности оптического излучения по каждому каналу независимо. Жидкокристаллические электрически уп-

равляемые оптические attenuаторы были разработаны для оптической связи на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм. Они характеризуются большим динамическим диапазоном ослабления сигнала, низкой стоимостью, малыми потерями и низкой потребляемой энергией [16–18]. Для большинства применений необходимо обеспечивать малые времена переключения и динамический диапазон ослабления более 30 дБ. Разработаны attenuаторы на нематиках и хиральных смектиках. Использование С\*ЖК обеспечивает времена переключения порядка микросекунд, однако имеет ряд проблем: элементы на их основе являются бистабильными и требуют использования сверхмалых толщин ячейки. Они нуждаются в наличии остаточного напряжения и повышении надежности и долговечности. Для обеспечения шкалы серого в этих устройствах применяются импульсные методы управления. Кроме того, ориентация С\*ЖК может быть нарушена механическими воздействиями. С другой стороны, attenuаторы на нематиках легко изготавливать и просто обеспечивать шкалу серого. Их основным недостатком являются большие времена переключения. Для повышения быстродействия используют различные приемы: малый зазор ЖКЯ [19], температурное воздействие [20], ЖКМ с двухчастотным управлением [21–25], повышенное напряжение [26] и использование полимерной структуры [27]. Attenuаторы на НЖК имеют характерные времена отклика 5–15 мс, что больше времени отклика механических модуляторов (порядка 1 мс). При использовании нематика с инверсией знака  $\Delta\epsilon$  и двухчастотным режимом управления (низкая частота — 1 кГц, высокая — 30 кГц) при  $T = 21^\circ\text{C}$  был обеспечен динамический диапазон 30 дБ на длине волны 1,55 мкм и время отклика порядка 1 мс.

На рис. 10.10 показана схема ЖК оптического attenuатора (ОА): два поляризационных делителя и ЖК ячейка размещены между двумя одинаковыми волоконно-оптическими коллиматорами на расстоянии 80 мм. Свет из входного световода проходит через первую коллиматорную линзу с градиентом показателя преломления. Когда световой луч падает на первый делитель, кристалл кальцита толщиной 10 мм, вырезанный под углом  $45^\circ$  к оси, расщепляет его на обыкновенный и необыкновенный лучи. Кварцевая полуволновая пластина, находящаяся в контакте с делителем, осуществляет поворот плоскости поляризации верхнего луча. Тогда оба луча имеют одинаковую поляризацию при падении на планарную ЖК ячейку с толщиной слоя 3,7 мкм и направлением ориентации  $45^\circ$  относительно направления поляризации падающего луча.

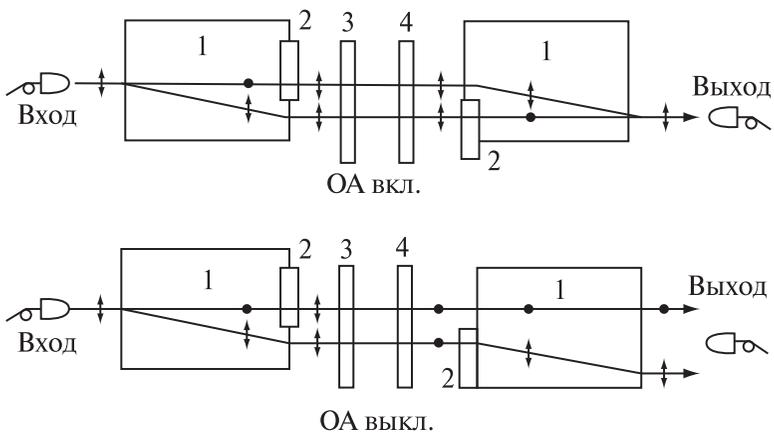


Рис. 10.10. Схема ЖК оптического аттенюатора ОА на основе С\*ЖК с двухчастотным управлением: 1 — поляризационный делитель луча; 2 — полуволновая пластинка; 3 — ЖК ячейка; 4 — компенсатор фазы [7]

Возникающая фазовая задержка ( $\delta = 2\pi d\Delta n/\lambda$ ) составляет примерно 1,2 $\pi$  на  $\lambda = 1,55$  мкм. Для обеспечения высокого пропускания при  $U = 0$  позади рабочей ЖК ячейки с целью ее фазовой компенсации располагалась идентичная ЖК ячейка с тем же зазором, материалом и ориентацией, но без приложения поля. Направление натирания компенсирующей ячейки было ортогонально направлению рабочей ячейки, чтобы фазовая задержка при  $U = 0$  была равна нулю. При этих условиях верхний и нижний лучи изменяются делителем и полуволновой пластинкой, после чего поступают в волновод (рис. 10.10, вверху). Это состояния максимального пропускания аттенюатора. При подаче необходимого напряжения на рабочую ячейку для создания фазовой задержки на величину  $\pi$ , падающий луч не сохраняет исходную поляризацию. В результате они разделяются вторым делителем. Свет не поступает в волновод, что соответствует выключенному состоянию (рис. 10.10, внизу). Подачей различного напряжения на рабочую ячейку можно получить градацию шкалы серого. Если зазоры в ячейках одинаковы, аттенюаторы не будут иметь поляризационных потерь и дисперсионных мод.

Характеристики аттенюаторов в основном определяются используемым ЖК материалом. При использовании ЖК с двухчастотным управлением важным параметром является критическая час-

тога ЖК материала  $f_c$ : в области  $f < f_c$  диэлектрическая анизотропия  $\Delta\epsilon > 0$ , в то время как в области  $f > f_c - \Delta\epsilon < 0$ . В области низких частот электрическое поле поворачивает молекулы ЖК вдоль вектора поля. Это способствует уменьшению времени включения. В момент выключения на ЖК подается высокочастотный электрический сигнал, и отрицательное значение  $\Delta\epsilon$  способствует сокращению времени выключения. В результате время выключения уменьшается. В качестве примера приведем параметры двухчастотной смеси, состоящей из 30% бифенилов и 70% дифлуоротоланов, при температуре 21°C:  $f_c \approx 4$  кГц,  $\Delta n = 0,25$  при  $\lambda = 1,55$ ;  $\Delta\epsilon = 4,73$  на  $f \approx 1$  кГц и  $\Delta\epsilon = -3,93$  на  $f \approx 30$  кГц. Результаты измерения ослабления интенсивности света attenuатором в зависимости от управляющего напряжения пилообразной формы с частотой 1 кГц приведены на рис. 10.11. Благодаря положительному знаку  $\Delta\epsilon$  в области низких частот управляющего напряжения молекулы ЖК ориентированы параллельно вектору электрического поля при достижении порогового значения 2,5 В. При достижении 6В происходит фазовый сдвиг на величину  $\pi$ , что соответствует ослаблению на величину 43 дБ. Это состояние является стабильным. При изменении напряжения на величину  $\pm 0,3$  В ослабление остается в пределах 30 дБ.

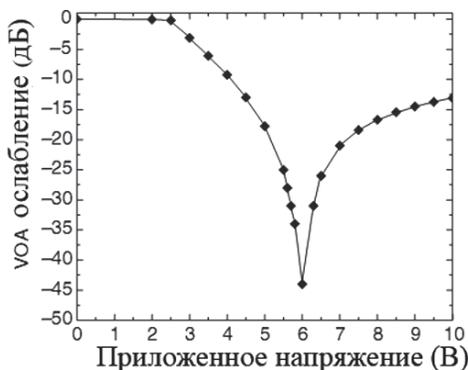


Рис. 10.11. Зависимость ослабления интенсивности света attenuатором от управляющего напряжения пилообразной формы с частотой 1 кГц [7]

На рис. 10.12 показаны времена включения и выключения ячейки с двухчастотным С\*ЖК. Коммерчески используемые ЖК материалы обычно управляются переменным напряжением 20 В. Управляющее напряжение для двухчастотного С\*ЖК также ограничено напряжением 20 В. На рис. 10.12а показана форма управляющего сигнала и соответствующий оптический отклик. Низкочастотный импульс амплитудой 20 В подается в течение 2 мс между сигналами с амплитудой 2 и 6 В. В процессе релаксации постоянное напряжение

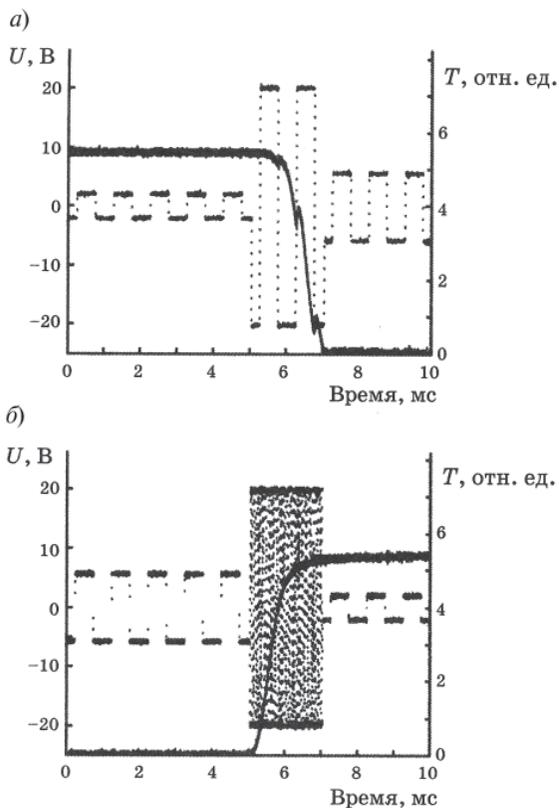


Рис. 10.12. Времена включения (а) и выключения (б) аттенуатора на двухчастотном С\*ЖК на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм

ние смещения создает момент, препятствующий возвращению молекул в исходное состояние. Для преодоления этого подается высокочастотное напряжение ( $f = 30$  кГц) в промежутке между подачей управляющего напряжения (рис. 10.12б). Время включения, соответствующее изменению сигнала от 90 до 10%, составило 0,73 мс для ячейки с двухчастотным С\*ЖК толщиной 3,7 мкм. Это примерно на порядок меньше, чем время выключения обычных смесей. Времена отклика, показанные выше, находятся из ослабления излучения между положениями «включено—выключено». Двухчастотный режим управления позволяет осуществлять быстрый переход и между градациями серого в двух положениях. Высоковольтный импульс (20 В) соответствующей частоты может подаваться между исходным и конечным положениями для ускорения переориентации директора при включении или выключении.

В работе [28] сообщается, что благодаря использованию четверть волновой пластинки и полного внутреннего отражения света достигнут динамический диапазон ослабления света в 53 дБ. Полученный аттенуатор представляет интерес для высококачественных систем телекоммуникации.

### ***10.2.2. Переключатели 2×2 световодов на основе поляризационных эффектов в С\*ЖК***

Переключатели волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) на ЖК являются альтернативой существующих микромеханических устройств. Их развитие непосредственно связано с использованием быстродействующих оптических элементов на С\*ЖК [29–33]. Основным назначением этих переключателей является изменение направления распространения светового сигнала при управлении электрическим сигналом. На рис. 10.13 приведен оптический переключатель (2×2) селективных длин волн. Простейший переключатель 2×2 каналов состоит из С\*ЖК ячейки, осуществляющей поворот поляризации, и оптических элементов, образующих два разделенные поляризационно-независимые каналы для  $s$  и  $p$  поляризации [34]. Для простоты ограничимся рассмотрением работы только  $s$  канала для 2×2 переключения (рис. 10.14), после чего распространим этот принцип на работу всего переключателя. Основными оптическими компонентами, приведенными на рис. 10.14, являются два устройства вращения плоскости поляризации на С\*ЖК 3 и 9, которые в положении «включено» изменяют  $s$  поляризацию

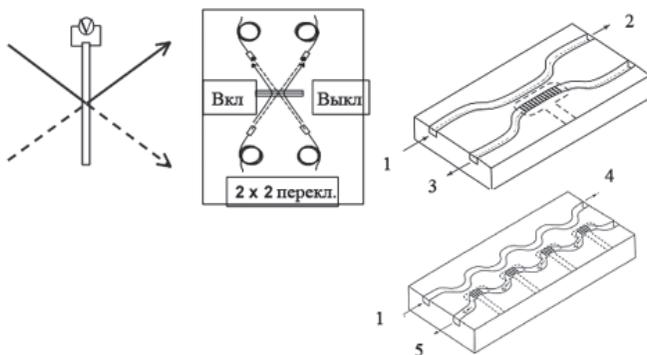


Рис. 10.13. Схемы переключения прохождения светового сигнала в оптическом переключателе: 1 — длины волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ; 2 —  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4$ ; 3 —  $\lambda_3$ ; 4 — проходящий сигнал; 5 — сигнал выбранной длины волны

на  $p$  поляризацию; поляризационный светоделитель 4, отражающий свет  $s$  поляризации и пропускающий свет  $p$  поляризации; четвертьволновая пластинка 7, полуволновая пластинка 8 и призма полного внутреннего отражения 5. Входной сигнал имеет  $s$  поляризацию от ВОЛС и  $s$  поляризатора 2. Если устройство 3 выключено, а 9 включено, то переключатель осуществляет прямое прохождение мод ( $1 \rightarrow 1'$ ,  $2 \rightarrow 2'$ ). Лучи  $s$  поляризации не испытывают воздействия устройства 3 и отражаются светоделителем 4. Они проходят сквозь четвертьволновую пластинку 7, отражаются верхним зеркалом и во второй раз проходят сквозь четвертьволновую пластинку 7. При этом их поляризация изменяется на  $p$ , позволяя им теперь проходить сквозь светоделитель 4. Устройство 9 преобразует их вновь в состояние  $s$  поляризации, и они достигают выходов  $1'$  и  $2'$ . Если устройство 3 включено и 9 выключено, переключатель изменяет прохождение мод света ( $1 \rightarrow 2'$ ,  $2 \rightarrow 1'$ ). Лучи с  $s$  поляризацией света в каналах 1 и 2 становятся  $p$  поляризованными после включения устройства 3 и проходят сквозь светоделитель 4. В призме полного внутреннего отражения 5 они изменяют свое положение и становятся после прохождения полуволновой пластинки 8 вновь  $s$  поляризованными. Их состояние поляризации не изменяется устройством 9 и они достигают выходов 22 и 12. Сочетание устройства 9 и  $s$  поляризатора 10 позволяет осуществить обмен информацией между каналами.

На входе и выходе каналов расположены линзы с градиентом показателей преломления для соединения лучей в волокнах.

Переключатель, изменяющий интенсивность поляризованного света, можно создать с помощью второго канала для  $p$ -поляризованного луча, аналогичного описанному. Для этого используются еще два поляризационных делителя. Первый делитель расщепляет входящий поляризованный свет на  $s$  и  $p$  компоненты, которые направляются к соответствующим  $s$  и  $p$  каналам. Второй делитель соединяет выходы  $s$  и  $p$  каналов с выходом переключателя. Такой переключатель, основанный на использовании С\*ЖК, обеспечивает переключение каналов с ослаблением 34,1 дБ, быстродействием 35 мкс и потерями порядка 6,9 дБ, из которых 4,4 дБ теряются на соединение волокон.

Более сложные переключатели можно создать на основе Баньян сети с числом положений  $\log_2(N)$ , где  $N$  — число входов/выходов.

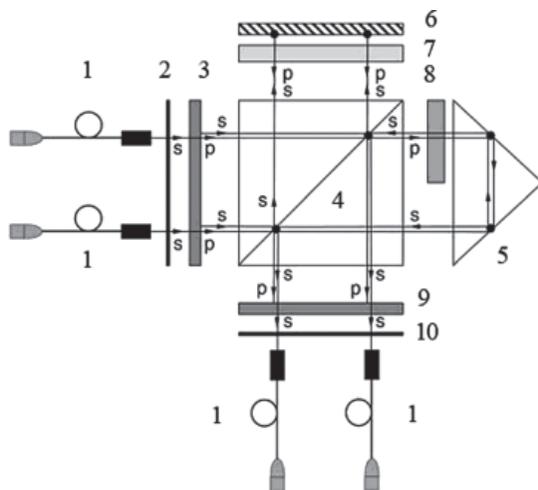


Рис. 10.14. Схема устройства для переключения поляризованного света в  $2 \times 2$  волокнах: 1 — ВОЛС; 2, 10 — поляризаторы; 3, 9 — устройства вращения плоскости поляризации; 4 — поляризационный светоделитель; 5 — призма полного внутреннего отражения; 6 — зеркало; 7 — четвертьволновая пластинка; 8 — полуволновая пластинка

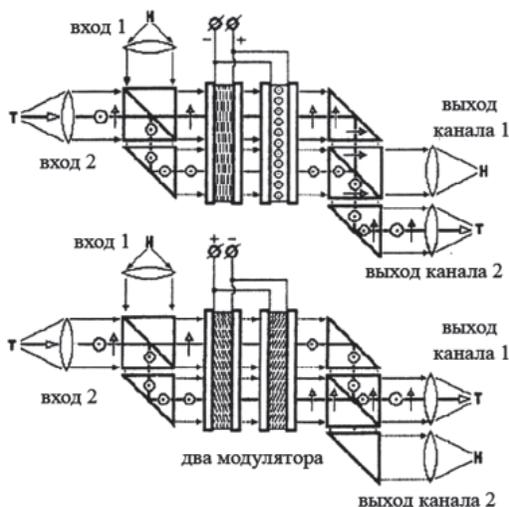


Рис. 10.15. Схема переключателя, иллюстрирующая прохождение сигналов  $1 \rightarrow 1$ ,  $2 \rightarrow 2$ ,  $1 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 1$  в зависимости от амплитуды и знака напряжения, приложенного к модуляторам на основе электроклинного эффекта

В работе [35] предложен переключатель на  $4 \times 4$  положения двухступенчатой конструкции на основе переключения С\*ЖК с 4-мя независимыми пикселями. Устройства поворота плоскости поляризации обладают высокой стабильностью рабочих характеристик при сдвиге по спектру на 40 нм на длине волны 1,55 мкм. Схема переключателя на основе С\*ЖК с электроклинным эффектом приведена на рис. 10.15 [36]. При напряжениях  $\pm 30$  В было получено время переключения порядка 5 мкс.

### 10.2.3. Голографические оптические переключатели для $1 \times N$ положений

Одним из возможных способов пространственного переключения одного входа на  $N$  выходов является использование ПМС на С\*ЖК в качестве управляемого дифракционного элемента. В простейшем случае устройство содержит полосы и работает как пере-

страиваемая одномерная дифракционная решетка [37]. Типичная четырехфокусная схема приведена на рис. 10.16. Вход одномодового световода расположен вдоль оптической оси переключателя, а выходные световоды представляют собой линейный одномерный массив, расположенный в кремниевых V-образных бороздках. Входная линза формирует волновой фронт световой волны, идущей от входного световода. Создаваемая на ПМС дифракционная решетка отклоняет луч на определенный угол. Вторая линза фокусирует отклоненный луч на один из выходных световодов. Желательно получить профиль решетки с максимальной дифракционной эффективностью в первом порядке: бинарная природа С\*ЖК предполагает бинарную фазовую решетку  $(0, \pi)$  с 50% режимом цикла. В этом случае возможно достижение максимума теоретической дифракционной эффективности  $4/\pi^2$  (40,5%). Следует подчеркнуть, что свет симметрично отклоняется в положительные ( $m = +1, +2, \dots$ ) и отрицательные ( $m = -1, -2, \dots$ ) моды, испытывая потери 3 дБ. Это означает, что для минимизации потерь при перекрестном переключении из-за симметричности дифракционных порядков, выходные световоды надо размещать по одну сторону от оси переключения.

Этот подход был реализован для переключения на  $1 \times 8$  положений в С\*ЖК с большим углом наклона ( $\approx 45^\circ$ ) в ПМС с разрешением  $256 \times 1$  при размере пикселя 22 мкм (рис. 10.17).

ПМС на С\*ЖК осуществляет изменение интенсивности поляризованного света, а использование полуволновой пластинки приводит к оптимизации параметров. Изменение интенсивности поляри-

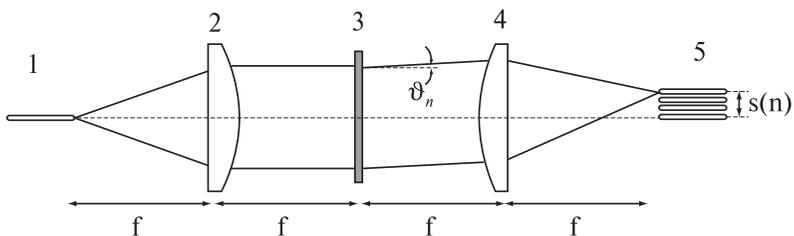


Рис. 10.16. Четырехфокусная схема голографического оптического переключателя для  $1 \times N$  положений на основе ПМС на С\*ЖК в качестве управляемого дифракционного элемента: 1 — вход одномодового волокна; 2 — коллимированная линза; 3 — ПМС на С\*ЖК; 4 — Фурье линза; 5 — выход одномодовых волокон

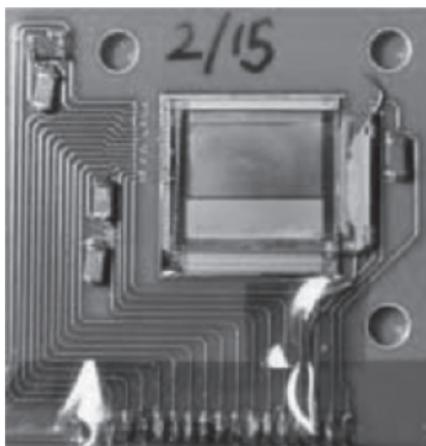


Рис. 10.17. Внешний вид ПМС для переключения на  $1 \times 8$  положений (мощность сигнала на входе 1 мВт на длине волны 1550 нм) [38]

зованного света крайне желательно, поскольку характер поляризации света, проходящего световод, не известен и может изменяться во времени. Характерные потери в вставке на  $\lambda = 1,55$  мкм составили примерно 7,7 дБ, из которых 5,2 дБ связаны с потерями в ПМС (ДЭ составила 27% вместо теоретического значения 40,5%), а 2,5 дБ вызвано потерями в световоде. Скорость переключения равна 400 мкс.

Аналогичный двухфокусный переключатель с изменением интенсивности поляризованного света, использующий отражательный ПМС с разрешением  $540 \times 1$  на С\*ЖК, изготовленный по технологии ЖК на кремнии (LCOS) [37] с шагом 20 мкм, описан в работе [38]. Семейство световодов, выполненных в технологии кремний на кварце, были использованы для переключения каналов. Потери во вставке составили 16,9 дБ на длине волны 1,55 мкм, а потери на переключение — около 20 дБ. Потери в 3 дБ соответствовали спектральной полосе в 60 нм.

Однако одномерная топология не оптимальна для переключения лучей: оказалось сложным осуществить переключения на  $1 \times 16$  положений. Двумерная топология позволила существенно увеличить

число переключений. В этом случае ПМС отображает двумерную структуру, и выходные волокна представляют собой двумерный массив. Вместо простой одномерной решетки ПМС формирует компьютерно-генерируемую голограмму (КГГ), осуществляющую отклонение света к выбранным выходным каналам. Для расчета такой голограммы пригодны стандартные методы, основанные на бинарном поиске [39], генетическом алгоритме [40] и стимулированном травлении [41]. Другие проблемы относились к точному позиционированию световодов в двумерном массиве. Для ПМС, работающего на просвет, четырехфокусная схема показана на рис. 10.18а вместе с более компактной двухфокусной схемой (рис. 10.18б), работающей на отражение. Четырехфокусная схема с выходом на 16 каналов на длине волны  $\lambda = 780$  нм описана в работе [42]. При использовании изменения интенсивности поляризованного света всегда существует некий нулевой порядок не отклоненного света. Этот свет направлялся к одному из выходных каналов, осуществляя  $1 \times 15$  переключений и способствуя выравниванию системы и контролю потребления энергии. Выходные каналы представляли собой матрицу  $4 \times 4$  световода с шагом 200 мкм. Нерегулярности в матрице компенсировались сканированием повторяющейся точки в ожидаемом положении волокна с последующей селекцией КГГ, обеспечивающей прохождение максимального сигнала. Было использовано  $320 \times 320$  прозрачных элементов ПМС на  $S^*JK$  с шагом 80 мкм и зазором в 5 мкм для формирования бинарной фазовой КГГ. Возникшие потери объясняются неидеальной фазовой модуляцией, связанной с угловым переключением, фазовой задержкой, дифракционной эффективностью КГГ, различными оптическими аберрациями системы и потерями при передаче сигнала между волокнами. Средняя величина потерь для различных волокон составила около 30 дБ. Однако она может быть существенно уменьшена, поскольку ДЭ ПМС была мала. Время переключения ограничено временем формирования «кадра».

В двухфокусной схеме (рис. 10.18б) входные волокна расположены вдоль оптической оси переключения и связаны с оптическим изолятором во избежание дифракции в нулевом порядке при интерференции с источником. Выходные волокна расположены в той же плоскости, что и входные, обеспечивая более компактную и стабильную систему по сравнению с четырехфокусной схемой. Отражательный ПМС, формирующий КГГ, обычно основывается на быстро ад-

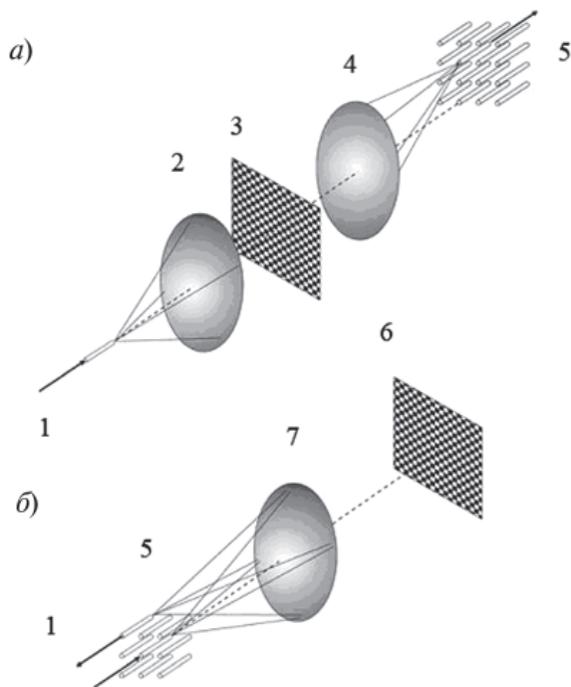


Рис. 10.18. Голографический оптический переключатель на  $1 \times N$  положений с двумерной топологией, использующий бинарную фазовую компьютерно-генерируемую голограмму (КГГ): а — четырех фокусная схема с ПМС, работающим на просвет; б — двухфокусная схема, работающая на отражение. 1 — вход волокна; 2 — коллимирующая линза; 3 — ПМС на С\*ЖК с бинарной фазовой КГГ; 4 — Фурье линза; 5 — выход волокон; 6 — отражательный ПМС на С\*ЖК с бинарной фазовой КГГ; 7 — коллимированная Фурье линза

ресуемом устройстве на кремнии LCOS с использованием С\*ЖК. Хотя голографическое переключение сопровождается потерями во вставке, оно обладает рядом достоинств: отсутствуют движущиеся части, КГГ является помехоустойчивой к дефектным пикселям и позволяет передавать сигналы к многим выходным волокнам, а перекрестная

изоляция достигает значения более 30 дБ. Можно предполагать, что потери во вставке можно уменьшить до 10 дБ за счет оптимизации параметров ПМС и оптических компонентов.

Голографический переключатель на  $1 \times 48$  положений был описан в работе [43]. Анализу фазовых голограмм с обеспечением ряда фазовых уровней посвящены публикации [44, 45].

#### ***10.2.4. Голографические оптические переключатели для $N \times N$ положений***

Описанный выше подход к созданию голографических оптических переключателей для  $1 \times N$  положений может быть распространен на создание переключателей для  $N \times N$  положений. Одна из возможных схем приведена на рис. 10.19 [28]. Свет, идущий от каждого световода 1 на входе, коллимируется индивидуальной линзой 2 и попадает на соответствующую зону ПМС 5, использующего С\*ЖК. Эта зона за счет соответствующей ККГ и Фурье линзы отклоняет входящий луч в один или несколько световодов 4 на выходе. При этом воз-

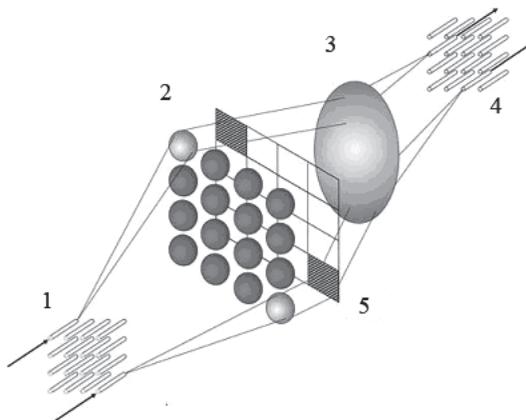


Рис. 10.19. Голографический переключатель на  $16 \times 16$  положений с использованием ПМС на С\*ЖК, формирующем ККГ. Каждый входной световод 1 связан со своей линзой 2, а каждый луч отклоняется в определенную зону ПМС 5. Каждая Фурье линза 3 фокусирует отклоненный луч на выходные световоды 4

никают значительные потери, ухудшающие возможности распределения передаваемого светового пучка.

В работе [46] описан голографический переключатель на  $16 \times 16$  положений на длине волны  $\lambda = 850$  нм с использованием ПМС на С\*ЖК технологии LCOS с разрешением  $256 \times 256$ . Входной сигнал поступает от семейства  $4 \times 4$  лазеров и согласованной матрицы микролинз. ПМС разделен на 16 секций, каждая из которых служит для адресации от одного из входов. Другие схемы голографических переключателей построены на использовании двух ПМС, каждый из которых формирует голограммы, как это объяснено ранее.

Переключатель  $3 \times 3$  положения описан в работе [40]. В нем использовался ПМС с большим углом наклона С\*ЖК и без применения поляризаторов. На длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм достигнуто переключение с уровнем 35,5 дБ и потерями 19,5 дБ.

### 10.3. Управляемые фильтры

#### 10.3.1. Фильтр с плавным управлением типа Фабри-Перо

В волоконно-оптическом интерферометре Фабри-Перо интерференция происходит за счет частичного отражения на сколе волокна и внешним отражателем. Размер чувствительного элемента датчика перемещений, основанного на этом принципе, сопоставим с диаметром волоконного световода и составляет около 0,1 мм, а его чувствительность может достигать долей ангстрема. При этом сам чувствительный элемент помехоустойчив к внешним электромагнитным наводкам. Принцип действия торцевого волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо показан на рис. 10.20. Излучение лазерного диода 1 вводится в световод 2 и через делитель 3 передается на оптическое волокно 4. При этом часть излучения отражается от торца световода 4, а другая его часть высвечивается в воздух, отражается от зеркала 5 и возвращается обратно в волоконный световод 4. Луч, отраженный от торца световода, интерферирует с лучом, отраженным от зеркала, и на фотоприемнике 5 регистрируется интенсивность излучения, изменяющаяся периодически в зависимости от расстояния  $x_0$  между торцом световода и зеркалом:

$$I = 2I_0 \left( 1 + \cos \left( \frac{4\pi}{\lambda} x_0 + \varphi_0 \right) \right) \quad (10.6)$$

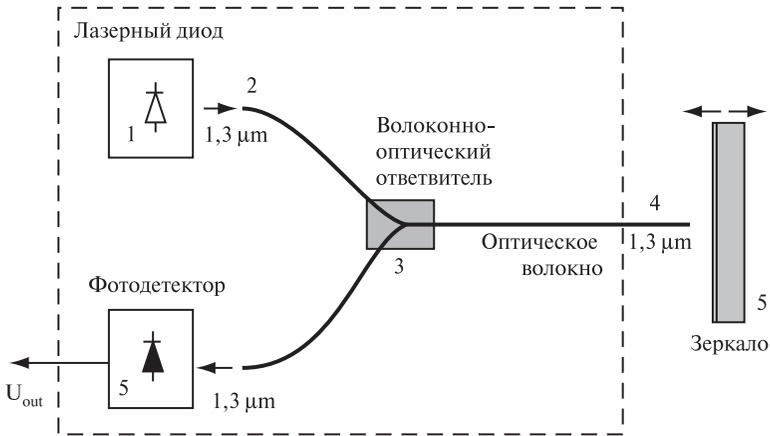


Рис. 10.20. Схема волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо

При этом смещение зеркала на половину длины волны света изменяет разность фаз интерферирующих лучей на  $2\pi$ , что соответствует одному периоду изменения интенсивности излучения на фотоприемнике. Интенсивность проходящего излучения зависит от длины волны излучения [47]:

$$I^{(t)} / I^{(i)} = T^2 / (1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2) \quad (11.7)$$

Здесь  $R$  и  $T$  соответственно коэффициенты отражения и пропускания зеркала, а фазовая задержка  $\delta$  равна:

$$\delta = (4\pi / \lambda_0) n d \cos(\nu') + \varphi \quad (11.8)$$

В уравнении (11.8)  $n$  — коэффициент преломления пластины,  $\nu'$  — угол между направлением прохождения света и нормалью к пластине,  $\varphi$  — дополнительный фазовый сдвиг, вызванный отражением.

Из уравнений (11.7) и (11.8) следует, что резонансный пик произойдет на длине волны, отвечающей условию  $\delta = 2m\pi$ , где  $m$  — целое число. Изменение длины волны можно осуществить изменением показателя преломления пластины, для чего можно использовать подходящий электрооптический эффект в ЖК. В этом случае реализуется фильтр, и ЖК выполняет функции активного материала в резонаторе.

Первоначально предпринимались попытки создания Фабри-Перо фильтра на нематиках [48]. Хотя эти фильтры позволяют осуществлять управление в широких пределах, их времена переключения достаточно велики (десятки-сотни миллисекунд). Для повышения быстродействия используют С\*ЖК. В двухволновом фильтре был применен материал с двойным углом переключения в  $45^\circ$  [49]. В нем направление директора изменяется при изменении поляриности внешнего поля. В случае произвольно поляризованного света на двух резонансных длинах волн, обозначаемых как  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , проходящий свет будет поляризован вдоль одного направления для  $\lambda_1$  и в перпендикулярном направлении для  $\lambda_2$ . При изменении направления приложенного к С\*ЖК поля изменяется направление директора, вследствие чего для  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  изменяется направление поляризации. В Фабри-Перо фильтре на С\*ЖК диэлектрическое зеркало размещалось на ИТО покрытии, нанесенном на стеклянную пластину. Ориентирующий слой наносился на зеркало, и две пластины натирались в ортогональном направлении для обеспечения симметричного переключения между двумя положениями. Эксперименты показали, что для ячейки с толщиной слоя С\*ЖК (CS 2004) 6,5 мкм на длине волны 1,55 мкм ослабление составило отношение 100:1 при времени переключения порядка 2 мс [49].

Мультиплексная по длине волны оптическая система связи представляет собой ключевую технологию, используемую в широком диапазоне полосы пропускания ВОЛС. Один из важнейших компонентов, обеспечивающих реализацию этой технологии, является управляемый фильтр на приемном конце. Подобный управляемый фильтр на С\*ЖК в виде Фабри-Перо резонатора, осуществляющего быстрое и плавное управление, крайне желателен для такой технологии [50]. Параллельно натертая ячейка с шевронной структурой или антипараллельно натертая ячейка с квазиориентацией типа «книжная полка» при малой толщине слоя могут обеспечить модуляцию показателя преломления. Экспериментально исследовался фильтр с толщиной слоя С\*ЖК (CS 1014) 16 мкм на  $\lambda = 1,55$  мкм. В резонаторе Фабри-Перо использовалось диэлектрическое зеркало. Фильтр с антипараллельным натиранием для ориентации С\*ЖК осуществлял плавное изменение длины волны в диапазоне 14 нм с точностью 0,84 нм (половина максимума полной ширины) при изменении напряженности электрического поля 0–4 В/мкм. Потери в фильтре составили 0,7 дБ, время

включения — 400 мкс. Использование электроклинного эффекта в хиральном смектике А позволяет уменьшить время изменения длины волны в диапазоне 30 нм до 10 мкс [51, 52]. В таком фильтре электрическое поле направлено в поперечном направлении (рис. 10.21), ортогонально обычному направлению вдоль фильтра. Это следует из уравнения, связывающего  $\delta\lambda$  с модуляцией показателя преломления

$$\delta\lambda = \lambda \delta n / n \quad (10.9)$$

Для обеспечения управляемого диапазона  $\lambda$  необходимо учитывать, что электроклинный эффект изменял ориентацию молекул на  $8\text{--}10^\circ$ , что требует задания значительного угла наклона молекул на поверхности фильтра. Косое напыление  $\text{SiO}_x$  создавало угол наклона порядка  $30^\circ$ , обеспечивая необходимое значение показателя преломления.

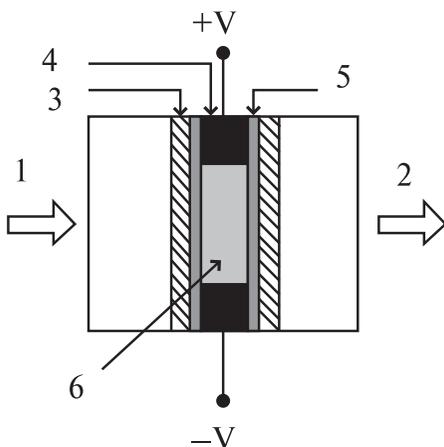


Рис. 10.21. Схема электроклинного ЖК-фильтра Фабри-Перо. Приложенное поле, управляющее фильтром, направлено перпендикулярно направлению распространения света: 1 — падающий луч; 2 — прошедший луч; 3 — диэлектрическое зеркало; 4 — металлический электрод; 5 — ориентирующий слой; 6 — ЖК, обладающий электроклинным эффектом

В результате исследований фильтра Фабри-Перо с использованием электроклинного эффекта был достигнут диапазон 10,5 нм при подаче поля с напряженностью от  $-8\text{В/мкм}$  до  $+8\text{В/мкм}$  и времена переключения 9 мкс.

Компактный вариант такого устройства был изготовлен применительно к ВОЛС. Два одиночных волокна на  $\lambda = 1,55$  мкм были соединены обжимом, их концы отполированы и покрыты диэлектриком с широкой полосой пропускания в качестве зеркал. Для уменьшения потерь на дифракцию внутри резонатора отрезок волокна был присоединен к одному из концов световода. Косонапыленный слой  $\text{SiO}_x$  использовался для задания ориентации на концах световода. Для подачи напряжения использовалась поперечная конфигурация электродов. Резонатор с полостью 17 мкм, из которой 10 мкм приходилось на отрезок световода, имел полосу пропускания 0,68 нм. Изменяемый диапазон достигал 13 нм при подаче поля напряженностью 5 В/мкм. Измеренные потери составили 7 дБ. Теоретически было показано, что потери во вставке могут быть существенно уменьшены при улучшении качества поверхности зеркала. При температуре 35 °С время включения было уменьшено до 6 мкс.

Преимущества Фабри-Перо фильтров с электроклинным эффектом достигаются ценой высокого напряжения. Можно использовать меньшее напряжение, например, в устройствах на кремнии (LCOS). Эффект деформации геликоида (DNF) также требует меньшего напряжения и обеспечивает высокие скорости переключения [53]. Геликоидальная структура ориентирована перпендикулярно нормали к ячейке (направление распространения света) и благодаря малому шагу спирали осуществляет модуляцию показателя преломления. Характерная величина напряженности поля порядка 1 В/мкм, изменяемый диапазон — около 10 нм в видимом диапазоне длин волн. Скорость переключения составляет сотни микросекунд, что существенно меньше скорости фильтров на электроклинном эффекте, но выше, чем в устройствах на  $\text{C}^*\text{ЖК}$  с большим углом наклона.

### *10.3.2. Дискретные управляемые оптические фильтры*

Дисперсию света на КГГ можно эффективно использовать для создания дискретных управляемых оптических фильтров [54–56]. Основным элементом устройства является ПМС на  $\text{C}^*\text{ЖК}$ , работающий как управляемая фазовая решетка с различным периодом. Такой фильтр основан на четырехфокусной схеме (рис. 10.22).

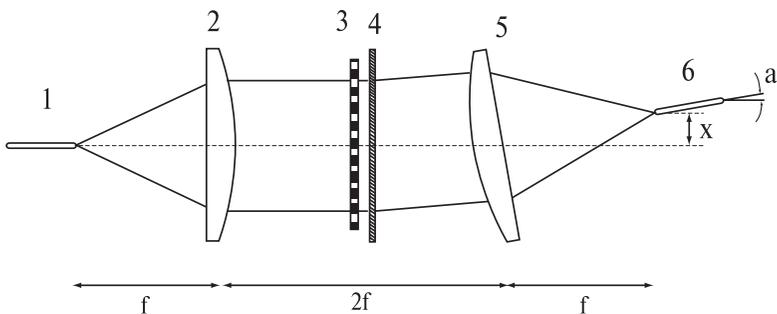


Рис. 10.22. Схема дискретного управляемого оптического фильтра на основе бинарного фазового ПМС на С\*ЖК и фиксированной дифракционной решетки. Схема позволяет осуществлять фильтрацию в излучении как отдельных, так и нескольких длин волн: 1 — вход одномодового световода; 2 — коллиматор; 3 — ПМС; 4 — фиксированная решетка; 5 — Фурье линза; 6 — выход одномодового световода

Свет от одномодового световода на входе коллимируется первой линзой и затем испытывает дифракцию на бинарном ПМС, создающем одномерную решетку. Поскольку размер пикселя существенно больше длины волны света, это существенно ограничивает управляемое разрешение для использования в системах связи. Разрешение можно увеличить, если расположить по соседству с ПМС фиксированную фазовую решетку со значительно большей пространственной частотой. Она осуществляет разложение света, выходящего из ПМС. Линза, расположенная позади решетки, осуществляет преобразование углового распределения длин волн в пространственное разделение. В зависимости от решетки, создаваемой ПМС, излучение отдельных длин волн будет отклонено в фиксированные выходные световоды, расположенные в фокальной плоскости второй линзы. Световоды наклонены на несколько градусов к оптической оси системы для оптимизации эффективности в передаче света.

Можно с небольшим приближением показать, что резонансная длина волны для первого порядка дифракции определяется из уравнения:

$$\lambda \cong \frac{x}{f \left( \frac{1}{d_{\text{SLM}}} + \frac{1}{d_{\text{fixed}}} \right)}. \quad (10.10)$$

где  $x$  — отклонение в расположении выходного световода,  $d_{\text{fixed}}$  — период фиксированной решетки,  $d_{\text{SLM}}$  — период перестраиваемой решетки, создаваемой ПМС. Минимальная величина адресации  $d_{\text{SLM}} = 2D$ , где  $D$  — размер пикселя ПМС.

ПМС с низким разрешением ( $128 \times 128$ ), работающий на просвет, с размером пикселя 165 мкм использовался с фиксированным периодом решетки 18 мкм [57]. Был достигнут широкий диапазон управления в 82 нм относительно 1,55 мкм одновременно с дискретным управляющим шагом порядка 1,3 нм и с точностью 2 нм — половина максимума полной ширины. Точная локализация составила 20 дБ на 3 нм от центра полосы пропускания, однако потери во вставке были велики (22,8 дБ) из-за малого угла отклонения, создаваемого С\*ЖК. Отличительная особенность дискретного управляемого фильтра по сравнению с аналоговым состоит в возможности фильтрации нескольких длин волн одновременно за счет создания соответствующей решетки. Бистабильность С\*ЖК означает, что фильтр работает даже в случае, если напряжение отсутствует, хотя управление при этом уже невозможно. Был предложен и более компактный двухфокусный фильтр, основанный на комбинации С\*ЖК, работающем на пропускание, и фиксированной отражательной решеткой или прозрачной фиксированной решеткой, выполненной по технологии С\*ЖК на кремнии (LCOS) [58].

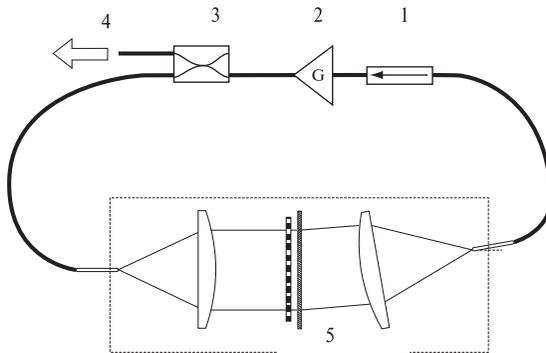


Рис. 10.23. Управляемый лазер 4 на волокне с использованием дискретного перестраиваемого фильтра 5; 1 — оптический изолятор; 2 — усилитель; 3 — оптический переключатель

Перестраиваемый лазер для мультиплексирования длин волн можно создать, объединив фильтр (рис. 10.22) и усилитель в петле на эрбиевом волокне (рис. 10.23). Решетка, формируемая ПМС, может по выбору либо использовать для генерации одну или несколько длин волн. Возможность плавного изменения длин волн было показано для всего эрбиевого окна шириной 38 нм по центру от 1,55 мкм, используя перестраиваемые шаги величиной 1,3 нм.

Измеренная ширина линии генерации составила около 3 кГц. К другим применениям фильтра можно отнести выравнивание или усиление сигнала в системе плавного изменения длин волн [57].

### ***10.3.3. Дискретно переключаемый фильтр на основе композита ЖК-фотонный кристалл***

Переключаемый оптический фильтр на основе фотонного кристалла с наноразмерными полостями, заполненными НЖК (5ЦБ), описан в работе [59]. При комнатной температуре планарно ориентированный 5ЦБ, находящийся в жидкокристаллическом состоянии, обладает оптической анизотропией. При нагревании образца выше температуры просветления (для 5ЦБ 35,5°C) НЖК переходит в изотропную фазу, что сопровождается изменением параметра порядка и показателя преломления. При достаточном заполнении полостей фотонного кристалла жидким кристаллом происходит изменение оптических характеристик устройства. В работе приведено описание конструкции устройства и результаты изучения его оптических характеристик. Максимум светопропускания, наблюдающийся на длине волны 1,55 мкм, сдвигается при переходе НЖК из изотропного состояния в мезофазу на величину  $\Delta\lambda = 13$  нм, что подтверждает теоретические вычисления.

### ***10.3.4. Управляемые цветные фильтры***

Оптические фильтры с изменяемыми в широких пределах спектральными характеристиками представляют интерес для обработки информации, получения цветных изображений и для создания проекционных дисплеев. Одна из конструкций цветных фильтров для проекционных дисплеев была основана на селективном отражении циркулярно-поляризованного света (рис. 10.24) [60]. Белый неполяризованный свет, содержащий 50% право- и 50% лево-поляризованного света, проходит через три двойных холестерических филь-

тра, содержащих расположенную между ними пленку с управляемым двулучепреломлением. Каждая пленка работает как пластинка  $\lambda/2$ , изменяя направление вращения поляризации во включенном положении, и сохраняя поляризацию неизменной в выключенном положении. Холестерические фильтры в блоках являются лево- и правовращающими структурами, полностью отражающими циркулярно-поляризованный свет того же направления вращения. Длины волн центров селективных полос рассеяния для красной (R), зеленой (G) и синей (B) составляющих белого света (630, 530 и 470 нм соответственно) специально выбраны так, чтобы охватить весь видимый диапазон. Рис. 10.25 показывает один из селективных спектров для зеленого холестерического фильтра [59]. Так, например, для получения левозакрученного циркулярно поляризованного света на выходе системы мы должны включить двулучепреломляющую пластинку в центральном блоке G, сохраняя состояние пластинок в блоках R и B неизменным. Аналогичная операция должна быть сделана с блоками R и B для получения красного и синего левозакрученного циркулярно поляризованного света на выходе системы (рис. 10.24).

Пластинка с электрически управляемой фазой может быть выполнена на основе твистовой ЖКЯ с двумя пластинками  $\lambda/4$  (рис. 10.25) или на основе эффекта деформации геликоида в АМ ЖКЯ [60]. Такой фильтр является компактным и имеет минимальные потери. Кроме того, отраженный поляризованный окрашенный свет может быть собран опять, в результате чего общая эффективность системы увеличивается.

Была показана возможность создания перестраиваемых цветных фильтров, основанных на электрически управляемом двулучепреломлении в смектике А [61] и хиральных смектиках С\*ЖК [62].

На рис. 10.26 показан фильтр, состоящий из пяти ячеек, на хиральных смектиках с толщиной слоев от 1,7 до 6,1 мкм. Каждая ячейка может быть ориентирована в двух положениях: либо под углом  $\alpha = 0^\circ$ , либо  $\alpha = \pi/4$  (угол наклона молекул С\*ЖК равен  $22,5^\circ$ ). В зависимости от значения  $\alpha$  могут быть реализованы три главных цвета (R, G и B), а также черный и белый. Характерный вид спектров показан на рис. 10.26б. Устройство компактно, имеет времена переключения 350 мкс при напряженности поля менее 10 В/мкм, размер апертуры 2 см.

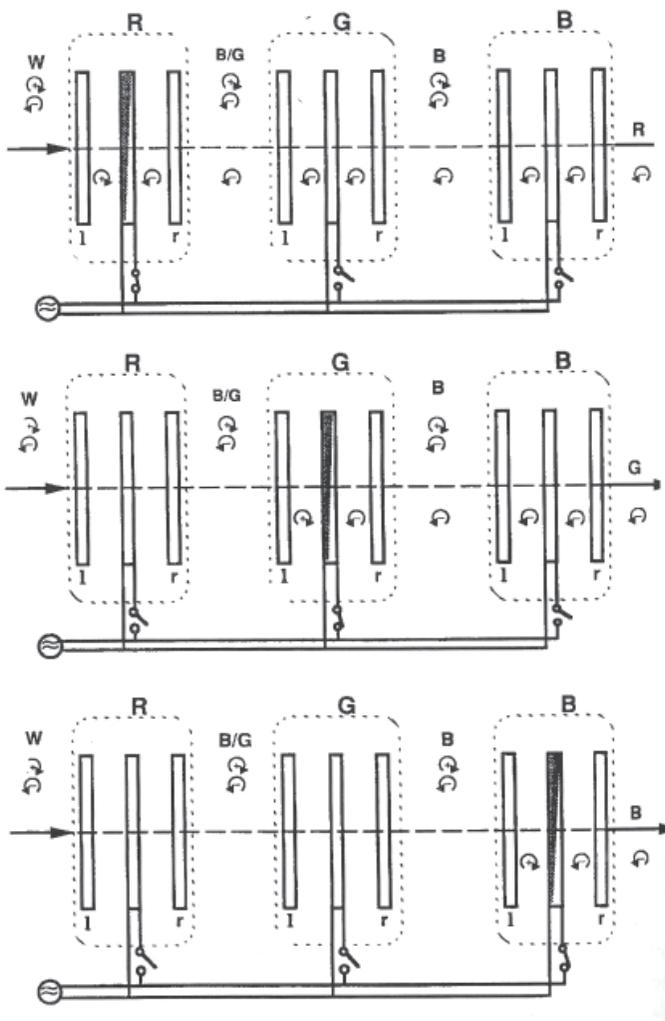


Рис. 10.24. Цветной фильтр на основе холестерических лево- и правозакрученных структур и пластинки  $\lambda/2$  [60]

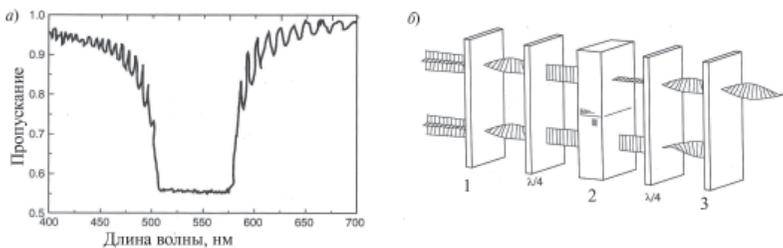


Рис. 10.25. Цветной фильтр на основе ХЖК: а — спектр селективного отражения для фильтра G (рис. 10.24); б — одна из возможных реализаций электрически управляемой пластинки  $\lambda/2$  на основе двух пластинок  $\lambda/4$  и твистовой ЖКЯ: 1 — фильтр 1 на основе ХЖК; 2 — твистовая ЖКЯ; 3 — фильтр 2 на основе ХЖК

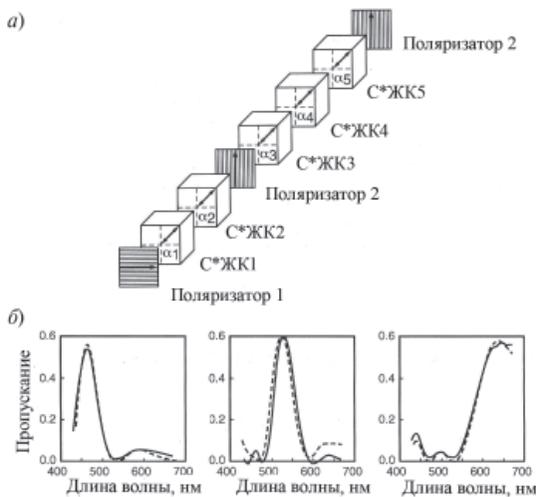


Рис. 10.26. Цветной фильтр на С\*ЖК: а — конструкция фильтра; б — типичный спектр для трех основных цветов

## 10.4. Оптические световоды, переключатели и модуляторы

В предыдущих разделах были рассмотрены оптические переключатели, в которых свет проходит от оптических элементов к ЭУ ПМС через открытое пространство. ЖК материалы также могут использоваться для создания элементов интегральной оптики, в которых сигнал распространяется только через оптические компоненты. Обычно они предназначены для введения или вывода светового луча в световод, переключения сигналов или управления интенсивностью излучения. Все они основаны на изменении прохождения света в слое ЖК при подаче напряжения. Уже в первой работе по использованию НЖК в качестве световодов было показано, что световые потери в них имели порядок 1 дБ/см, а время переключения составило несколько миллисекунд [58]. Были рассмотрены разные схемы использования ЖК как активного (рис. 10.27а) и как пассивного элемента (рис. 10.27б). Эксперименты показали, что затуха-

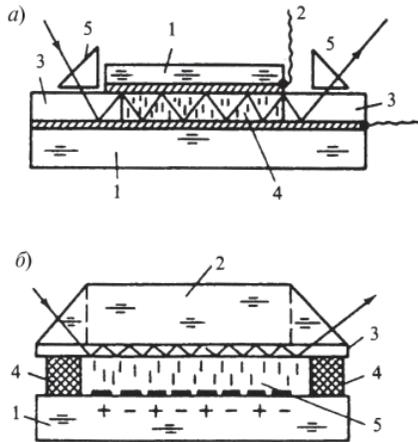


Рис. 10.27. Схемы использования модуляторов на ЖК в интегральной оптике: а) ЖК как активный световод: 1 — подложка; 2 — электрод; 3 — полимерная пленка; 4 — гомеотропный слой ЖК; 5 — призмы; б) ЖК как пассивный световод изменяет граничные условия: 3 — световод; 5 — ЖК

ние при прохождении света в НЖК, ХЖК, С\*ЖК и СЖКА составляет величины 18, 5, 3.5 и 1,7 дБ соответственно, что для практического использования не применимо. Возможным оказалось лишь создание электрически управляемых вставок. Простой трехслойный световод состоит из прозрачной диэлектрической среды с показателем преломления  $n_2$ , ограниченной с двух сторон материалами с показателями преломления  $n_1$  и  $n_3$ , меньшими, чем  $n_2$ .

Излучение, распространяющееся в среде, будет испытывать полное внутреннее отражение при угле падения  $\theta$ , удовлетворяющем условиям:  $\sin\theta > n_1/n_2$  и  $\sin\theta > n_3/n_2$ . Фазовая скорость света, распространяющегося по световоду, определяется выражением:  $v = c/n_2 \sin\theta$ , где  $c$  — скорость света в вакууме. Отсюда следует, что волновой режим возможен для фазовых скоростей, ограниченных диапазоном  $c/n_2 < v < c/n_1$ .

Если угол  $\theta$  мал, то помимо волноводного режима наблюдаются потери при каждом отражении от границы раздела, когда часть излучения выводится из волновода. Кроме того, существенна толщина волноводного слоя: если она больше длины волны излучения, то применимы законы геометрической оптики, если сравнима — необходимо учитывать интерференционные явления. В этой связи перспективна возможность пассивного использования ЖК слоев на границе со стеклянным световодом. ЖК как пассивный световод изменяет граничные условия прохождения света при меньших световых потерях. Экспериментально в волоконно-оптических линиях связи длиной 1 см и диаметром 5 мкм с использованием С\*ЖК были получены времена включения — 10 мкс, выключения — 24 мкс. Такие устройства представляют интерес в качестве дефлекторов и селекторов частоты в тонкопленочных лазерах.

#### ***10.4.1. Оптические световоды на С\*ЖК***

В последнее время наметился прогресс в применении С\*ЖК в качестве оптических световодов. Эти материалы характеризуются электрооптическими коэффициентами, которые на порядок выше, чем у других материалов интегральной оптики ( $\text{LiNbO}_3$  или GaAs, использующие эффект Погкельса). С использованием недорогих технологий изготовления кремниевых панелей С\*ЖК материалы оказались привлекательными для создания компактных интегральных оптических устройств. Недостатком хиральных смектиков является их низкое быстроедействие по сравнению с эффектами Погкельса и Штарка в твер-

дых кристаллах, имеющими времена порядка 10 нс. Лимитирующим фактором являются также потери на рассеяние, вызванные флуктуацией в ориентации молекул смектиков. Однако по сравнению с нематиками С\*ЖК имеют более высокую упорядоченность. Это снижает их потери до 2 Дб/см, что позволяет их использовать в качестве материала световода. Дешевые интегральные оптические элементы на С\*ЖК с короткой протяженностью реально осуществимы и имеют приемлемую скорость переключения. Обычно они используют поверхность стабилизированные С\*ЖК с директором, лежащим в плоскости распространения света. В этом случае С\*ЖК может использоваться либо как активный, либо как пассивный световод. Теоретический анализ отклоняющих и выключающих модуляторов для световода на С\*ЖК был проведен в работе [63]. На рис. 10.28 показана схема выключающего модулятора. Свет, поляризованный параллельно слоям (ТЕ), имеет эффективный показатель преломления

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_{\parallel} n_{\perp}}{\sqrt{n_{\perp}^2 \sin^2(\gamma) + n_{\parallel}^2 \cos^2(\gamma)}}, \quad (10.11)$$

где  $\gamma$  — угол между направлением распространения свет и директором ЖК.

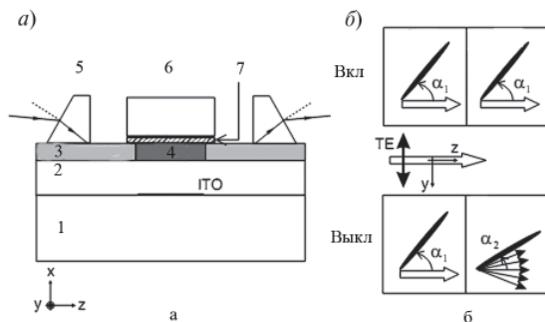


Рис. 10.28. Электрооптический модулятор с активным световодом на С\*ЖК: а — схема устройства; б — схема операции выключения. Устройство может модулировать только ТЕ моды. 1 — стеклянная подложка; 2 — промежуточный полимер; 3 — полимерный световод; 4 — С\*ЖК; 5 — входная призма; 6 — покровное стекло; 7 — ориентирующий слой

Нормаль к смектическому слою направлена вдоль критического угла  $\gamma_c$ , что соответствует значению  $n_{eff}$ , равному показателю  $n_p$  полимерного световода. В положении «выключено» угол между направлением распространения свет и директором ЖК  $\gamma > \gamma_c$ , и условие полного внутреннего отражения на границе световод-С\*ЖК нарушается, приводя к потере управления. В положении «включено»  $\gamma < \gamma_c$ , и условие полного внутреннего отражения восстанавливается. Такое устройство на основе  $S_c^*$  осуществляет бинарную модуляцию с контрастным отношением 40:1. Использование в таком устройстве электроклинного эффекта описано в [64].

Интегральный оптический световод может быть создан при размещении тонкого слоя поверхностно стабилизированного С\*ЖК между двумя планарными световодами (рис. 10.29). В устройстве использован ионно-диффузионный мультимодовый световод и слой С\*ЖК, ориентируемый сдвигом [65]. Нормаль к смектическому слою имеет угол  $\theta$  с направлением распространения света. Это обеспечивает прохождение света в направлении вдоль оптической оси С\*ЖК для одной полярности напряжения, и ТЕ мода будет распространяться как обыкновенная волна. При этом переключатель находится в закрытом положении. Приложение напряжения противоположной полярности увеличивает коэффициент преломления

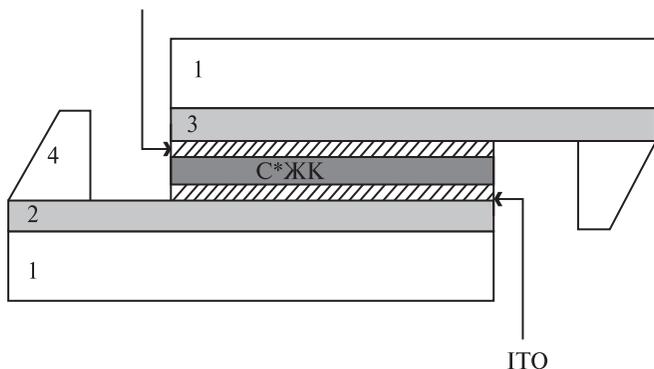


Рис. 10.29. Переключатель интегрального оптического световода на основе стабилизированного поверхностно С\*ЖК: 1 — стеклянные подложки; 2 — световод 1; 3 — световод 2; 4 — входная призма; 5 — ориентирующий слой

слоя С\*ЖК и обеспечивает проникание света в слой С\*ЖК и световод. В ранних разработках напряжение переключения составляло  $\pm 1$  кВ.

Аналогичное устройство с одномодовым световодом в стекле ВК7 с ионным обменом работало от импульсов напряжения 20 В. Ослабление составило 15 дБ со скоростью переключения порядка 300 мкс [66]. Оптимизация параметров оптического переключателя, работающего на длине волны 1,55 мкм, была выполнена в работе [67]. Моделирование выявило возможность ослабления на величину 50 дБ, уменьшение потерь до 1 дБ и обеспечение короткой длины соединения порядка 175 мкм.

#### *10.4.2. Быстродействующий электрооптический призмный ЖК модулятор*

В работе [68] описан опытный образец миниатюрного модулятора с рабочей частотой прямоугольной модуляции не менее 1 кГц, линейной апертурой 5 мм и угловой апертурой более  $10^\circ$ , используемый в спектральном диапазоне 400...1600 нм. Отношение линейной апертуры к длине призмы модулятора не превышало 1:3 (рис. 10.30). В модуляторе использовалась поляризационная призма со слоем С\*ЖК. В отличие от модулятора, использующего ориентированный слой НЖК [69], в устройстве использовался эффект Кларка-Лагерволла в С\*ЖК, позволяющий получать времена нарастания и спада оптического сигнала около 4 мс и частоту модуляции около 150 Гц при обеспечении 100% глубины модуляции. Для обеспечения модуляции сигнала прямоугольной формы (сумма длительностей фронтов светового импульса в несколько раз меньше длительности полупериода импульса), предельная частота модуляции достигает 30...50 Гц.

В экспериментальном макете острый угол призмы модулятора был выбран равным  $23,0^\circ$  для обеспечения максимально возможной угловой апертуры. Толщина слоя С\*ЖК составляла 7 мкм. Полученные результаты свидетельствуют, что разработанные модуляторы позволяют осуществлять модуляцию излучения прямоугольной формы на частотах следования управляющих импульсов не менее 2 кГц со 100%-ой глубиной модуляции. Призмный ЖК модулятор может быть использован для переключения волоконно-оптических линий связи.

Широкое использование модуляторов в лазерных системах поставило вопрос об их лазерной стойкости. В этой связи были прове-

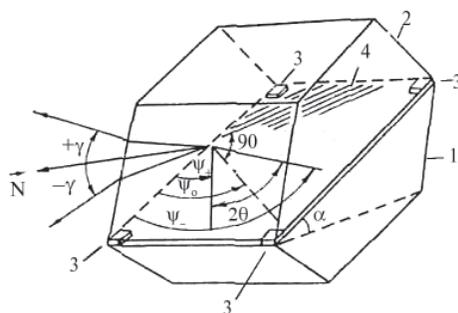


Рис. 10.30. Схема призмного модулятора: 1, 2 — стеклянные призмы; 3 — прокладки; 4 — линии пересечения плоскостей слоев С\*ЖК с плоскостью электродов;  $\alpha$  — острый угол призмы модулятора;  $N$  — направление нормали к входной грани

дены экспериментальные исследования жидкокристаллических модуляторов с продольным приложением электрического поля. Было показано, что их стойкость к лазерному воздействию в первую очередь ограничивается стойкостью прозрачных электродов ИТО, составляющей  $2,5\text{--}2,9 \text{ Дж/см}^2$  на длине волны излучения  $1,06 \text{ мкм}$  при длительности импульса  $15 \text{ нс}$  [70]. Для повышения лазерной стойкости авторы предложили конструкцию модулятора с поперечным приложением электрического поля, что позволило повысить порог лазерной прочности до  $6,7\text{--}6,9 \text{ Дж/см}^2$  [71].

#### 10.4.3. Модуляторы, работающие в неполяризованном свете

В ряде случаев необходимо, чтобы модулятор работал в неполяризованном свете. В работе [72] описан модулятор на основе С\*ЖК, нечувствительный к поляризации света (рис. 10.31). Модулятор состоит из двух поляризационных разделительных призм 1 и 4, размещенных последовательно, прямоугольных призм 2, 3 и полуволновых С\*ЖК ячеек 5 и 6, работающих в асимметричном режиме деформации геликоида — сегнетоэлектрической спирали (ДСС). Призмы 1, 4 и 2, 3 собраны в двухканальную схему. Такая схема позволяет пропускать неполяризованный свет через модулятор без су-

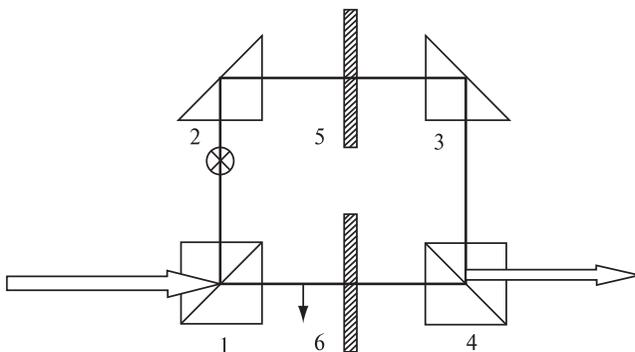


Рис. 10.31. Схема модулятора, нечувствительного к поляризации света 1,4 — поляризационные разделительные призмы; 2,3 — прямоугольные призмы; 5,6 — полуволновые ДСС-ячейки ( $\lambda = 650 \text{ нм}$ )

щественной потери интенсивности. Все потери внутри модулятора связаны только с поглощением, отражением и рассеянием в имеющихся оптических компонентах. Поляризационная призма 1 расщепляет падающий неполяризованный луч на два луча с ортогональной линейной поляризацией. Оба луча, проходя через модулятор, собираются поляризационной призмой 4. Это означает, что пропускание модулятора может управляться фазовой задержкой, создаваемой ячейкой. Для того чтобы выходящие лучи не были поляризованными, оптическая индикатриса должна быть наклонена на один и тот же угол. Для математического описания светопропускания модулятора использовалась матрица Джонса.

Из теории следует, что одновременный поворот оптических осей в плоскости обеих ЖК ячеек приводит к модулированию интенсивности неполяризованного света. Одной из возможностей для получения такого поворота оптической индикатрисы является ДСС-эффект в С\*ЖК. Кроме того, этот эффект позволяет получать шкалу серого.

Для изготовления модулятора использовались призмы размером  $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}$ . Поляризационные разделительные линзы имели коэффициент ослабления 1:100. Были изготовлены две ЖК ячейки, работающие как полуволновые пластинки на  $\lambda \approx 650 \text{ нм}$ . Зазор ячейки составлял примерно  $1,7 \text{ мкм}$  и заполнялся С\*ЖК

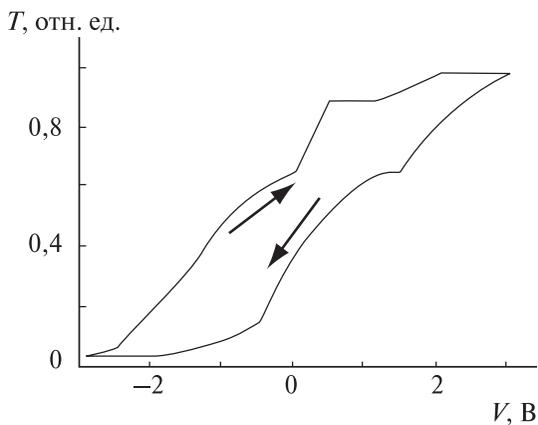


Рис. 10.32. Зависимость пропускания от приложенного напряжения

РВН-9 ( $\Delta n = 0,15$ ). Достоинство ДСС-эффекта при использовании в модуляторе состоит в том, что под действием электрического поля оптические оси поворачиваются в плоскости ячейки. При подаче постоянного напряжения от  $-3$  до  $+3$  В поворот оптических осей достигал  $45^\circ$ . Как следует из теории ДСС-эффекта, зависимость пропускания света от величины приложенного напряжения имеет гистерезис (рис. 10.32). Максимальное значение контраста составляло величину около 300.

#### 10.4.4. Оптические модуляторы на основе капсулированных в полимере С\*ЖК

Капсулированные в полимере С\*ЖК оказались пригодными для создания модуляторов с временами переключения порядка десятка микросекунд [7]. Для формирования необходимой структуры ячейки используется голографический метод. В отсутствие электрического поля ЖК представляет собой хаотически ориентированную структуру (рис. 10.33а), а структура ячейки характеризуется периодически изменяющимся показателем преломления. Если лазерный луч падает под углом  $\theta$ , удовлетворяющим условию Вульфа-Брэгга:  $\lambda = 2d \cos \theta$ , он будет испытывать отражение. При подаче достаточного по амплитуде напряжения, направленного перпендикулярно

чередующимся слоям, ЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  будет ориентирован перпендикулярно слоям (рис. 10.33б). Тогда показатель преломления ЖК становится равным показателю преломления полимера, и лазерный луч проходит через ячейку, не испытывая отражения.

При толщине слоя 10 мкм и напряжении 40 В коэффициент отражения составил  $K_{\text{отр}} = 25\%$ . Примеры использования таких модуляторов в качестве архитектурных стекол приведены на рис. 10.34 и 10.35 [13].

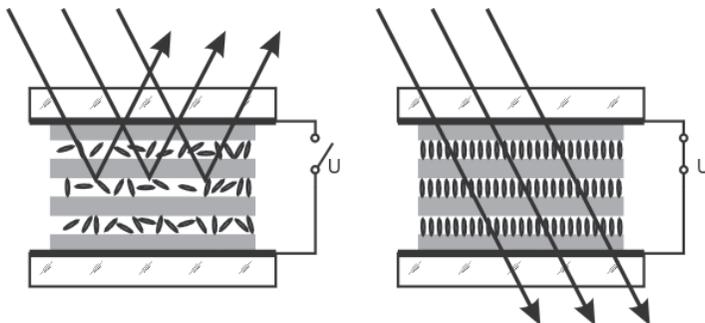


Рис. 10.33. Схема использования голографического капсулированного в полимере С\*ЖК в качестве быстродействующего модулятора [7]



Рис. 10.34. Использование модуляторов на основе PDLC в качестве архитектурных стекол. Времена переключения 5мс при 50 В

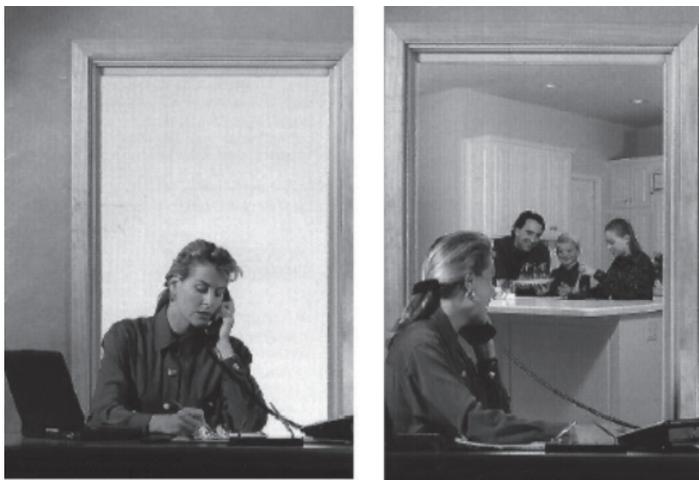


Рис. 10.35. Модуляторы на основе PDLC в качестве архитектурных стекол [13]

*Фото Т. Баннинга, институт ЖК, Кент, США.*

Электрооптические характеристики модулятора на основе PDFLCs приведены в работе [73].

### Литература к главе 10

1. *Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.А.* Пространственные модуляторы света. М., Радио и связь, 1987. 320 с.
2. *Васильев А.А.* Управляемые жидкокристаллические транспаранты для устройств преобразования и кодирования оптических сигналов // Труды ФИАН им. П.Н. Лебедева. 1981. Т. 126. С. 3–75.
3. *Optical Data Processing, Applications / Ed. by D. Casasent. N.-Y. 1978. Topics in Applied Physics. 286 p.*
4. *Spatial Light Modulator Technology: materials, devices and applications / Ed. by Efron U. N.-Y.: Marcel Dekker Inc. 1994. 665 p.*
5. *Chigrinov V.* LC devices: Physics and Application. Artech House. 1999. P. 332.
6. *Kriezis E.E., Parry-Jones L.A., Elston S.J.* Optical properties and applications of ferroelectric and antiferroelectric LCs / Ed. by L. Vicary in Optical Application of Liquid Crystals. IOP Publishing Ltd 2003. 284 p.
7. *Yang D.-K., Wu S.-T.* Fundamentals of Liquid Crystal Devices. John Wiley & Sons. 2006. 387 p.

8. *Томилин М.Г.* Создание и обработка изображений с помощью ЖК // В кн.: Труды ГОИ. 1982. Т. 51. Вып. 185. С. 122–141.
9. *Soms L.N., Tomilin M.G.* New horizons of optical instruments opened by LC elements // Abstracts of 6 ECLC, Germany, Halle, 2001, 9P-22.
10. *Wang X., Wilson D., Muller R., Psaltis D.* Liquid crystal blazed-grating beam deflector // Appl. Opt. 2000. Vol. 39. P. 6545.
11. *McManamon P.F., Dorschner T.A., Corcum D.L., Friedman L.J., Hobbs D.S., Holz M., Liberman S., Nguyen H.Q., Resler D.P., Sharp R.C., Watson E.A.* Optical phased array technology // Proc. IEEE. 1996. Vol. 84. P. 268.
12. *Бахшиев Н.Г., Студенов В.И., Томилин М.Г.* Жидкие кристаллы в оптике лазеров. Аналитический обзор по отечественным и зарубежным материалам за 1970-1985 гг. ГОИ им. С.И. Вавилова. 1985. 113 с.
13. *Bos Ph., Wang X.* Some non-display electro-optical applications of LC // Tutorial Lecture at ILCC. Kent. 2006. 96 p.
14. *Titus C.M., Bos P.J., Lavrentovich O.D.* Efficient accurate liquid crystal digital light deflector // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3633. P. 244.
15. *Meadows M.R., Handschy M.A., Clark N.A.* Electro-optical switching using total internal reflection by FLC // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54. P. 1394–1403.
16. *Mao C., Xu M., Feng W., Huang T., Wu K., Wu J.* LC applications in telecommunications // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5003. P. 121.
17. *Eldada L.* Optical communication components // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. P. 575.
17. *Pan J.J., Wu H., Wang W., Qiu X., Jiang J.* // Proceed of the National Fiber Optics Engineers Conference. Telcordia. Orlando, Fl. 2003. P. 943.
18. *Wu S.T., Efron U.* Optical properties of thin NLC cells // Appl. Phys. Lett. 1986. Vol. 48. P. 624.
19. *Wu S.T., Efron U., Lackner A.M.* Optimal operating temperature of LC modulators // Appl. Optics. 1987. Vol. 26. P. 3411.
20. *Bucher H.K., Klingbiel R.T., VanMeter J.P.* Frequency-addressed LC field effect // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. P. 186.
21. *Schadt M.* Low-frequency dielectric relaxation in nematics and dual-frequency addressing of field effect // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1982. Vol. 89. P. 77.
22. *Xu M., Yang D.K.* Dual frequency cholesteric light shutters // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70. P. 720.
23. *Конишина Е.А., Федоров М.А., Амосова Л.П., Исаев М.В., Костомаров Д.С.* Оптические модуляторы на основе двухчастотного НЖК // Опт. журн. 2008. Т. 75. № 10. С. 73–80.
24. *Амосова Л.П., Васильев В.Н., Иванова Н.Л., Конишина Е.А.* Пути повышения быстродействия электроруляемых оптических устройств на основе НЖК // Опт. журн. 2010. Т. 77. № 2. С. 3–14.
25. *Wu S.T.* A nematic LC modulator with response time less than 100 ms at room temperature // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol. 57. P. 986.
26. *Lu Y.Q., Du F., Lin Y.H., Wu S.T.* Variable optical attenuator based on polymer stabilized TNLC // Optical Express. 2004. Vol. 12. № 17. P. 1221.

27. Wang X.-J., Huang Z.-D., Feng J., Chen X.-F., Liang X., Lu Y.-Q. LC modulator with ultra-wide dynamic range and adjustable driving voltage // *Optical Express*. 2008. Vol. 16. № 17. P. 13168–13174.

28. Crossland W.A., Wilkinson T.D. Handbook of Liquid Crystals: Fundamentals (Volume 1, chapter 2) / Ed. D. Demus, J. Goodby, G.W. Gray, H.W. Spiess, V. Vill. Weinheim: Wiley-VCH. 1998. 763 p.

29. Wilkinson T.D., Crossland W.A., Warr S.T., Yu T.C.B., Davey A.B., Mears R.J. New applications for ferroelectric liquid crystals // *LC Today*. 1994. Vol. 4. № 3. P. 1–4.

30. Mears R.J., Crossland W.A., Dames M.P., Collington J.R., Parker M.C., Warr S.T., Wilkinson T.D., Davey A.B. Telecommunications applications of ferroelectric liquid-crystal smartpixels // *IEEE Journ. of Selected Topics in Quant. Electr.* 1996. Vol. 2. № 1. P. 35–46.

31. Dames M.P., Collington J.R., Crossland W.A., Scarr R.W.A. Three-stage high-performance optoelectronic asynchronous transfer mode switch: design and performance // *Opt. Eng.* 1996. Vol. 35. № 12. P. 3608–3616.

32. Scarr R.W.A., Collington J.R., Crossland W.A., Dames M.P. Highly parallel optics in ATM switching networks // *IEE Proc. Optoelectron.* 1997. Vol. 144. № 2. P. 53–60.

33. Riza N.A., Yuan S. // *Electr. Lett.* 1998. Vol. 34. P. 1341–1342.

34. Riza N.A., Yuan S. // *J. Lightwave Techn.* 1999. Vol. 17. P. 1575–1584.

35. Beresnev L.A., Dultz W., Pikin S.A., Hiller S., Loseva M.V., Chernova N.I., Haase W. Development and properties of electroclinic materials applied for FLC devices with optimized performance // *Proc. FLC'95*. UK, Cambridge. P. 201.

36. Berthele P., Fracasso B., de la Toynaya J.L. Design and characterisation of LC SLM for polarisation-intensive optical space switch // *Appl. Opt.* 1998. Vol. 37. P. 5461–5468.

37. McKnight D.J., Underwood I. Smart SLM using LC on silicon // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1993. Vol. 29(2). P. 699.

38. Crossland W.A., Manolis I.G., Redmond M., Tan K.L., Wilkinson T.D., Parker T.R., Chu H., Croucher J., Handerek V.A., Warr S.T., Robertson B., Bonas I.G., Franklin R., Stace C., White H.J., Woolley R.A., Henshall G. Beam steering optical switching using LCOS: the reconfigural optical switches for aerospace and telecommunications systems (“ROSES”) demonstrator // *J. Lightwave Techn.* 2000. Vol. 18. P. 1845–1854.

39. Seldowitz M.A., Allebach J.P., Sweeney D.W. // *Appl. Opt.* 1987. Vol. 26. P. 2788–2798.

40. Mahlab U., Shamir J., Caulfield H.J. // *Optic Lett.* 1991. Vol. 16. P.648-650.

41. Dames M.P., Dowling R.J., Mc Kee P., Wood D. Efficient optical elements to generate intensity weighted spot arrays: design and fabrication // *Appl. Opt.* 1991. Vol. 30. P. 2685–2691.

42. Warr S.T., Mears R.J. Polarization intensive operation of ferroelectric liquid crossbar devices // *Electronic Letters*. 1995. Vol. 31. P. 714–716.

43. Yamazaki H., Fukushima S. // *Appl. Opt.* 1995. Vol. 35. P. 8137–8143.

44. *Tan K.L., Crossland W.A., Mears R.J.* // J Opt. Soc. Am. A. 2001. Vol. 18. P. 195–204.
45. *Tan K.L., Warr S.T., Manolis I.G., Wilkinson T.D., Redmond M.M., Crossland W.A., Mears R.J., Robertson B.* // J Opt. Soc. Am. A. 2001. Vol. 18. P. 205–215.
46. *O'Brien D.C., McKnight D.J., Fedor A.* / *Ferroelectrics*. 1996. Vol. 181. P. 79–86.
47. *Born M., Wolf E.* Principles of optics. Cambridge: Cambridge University Press. 1999. P. 360, 790.
48. *Patel J.S., Saifi M.A., Berreman D.W., Lin C.L., Andreadakis N., Lee D.* Electrically tunable optical filter for infrared wavelength using LCs in Fabry-Perot etalon // *Appl. Phys. Lett.* 1990. Vol. 57. P. 1718–1720.
49. *Patel J.S.* // *Optics Lett.* 1992. Vol. 17. P. 456–458.
50. *Liu J.Y., Johnson K.M.* // *IEEE Photon. Techn. Lett.* 1995. Vol. 7. P. 1309–1311.
51. *Sneh A., Johnson K.M., Liu J.Y.* // *IEEE Photon. Techn.* 1995. Vol. 7. P. 379–381.
52. *Sneh A., Johnson K.M.* // *J. Lightwave Techn.* 1996. Vol. 14. P. 1067–1080.
53. *Choi W.K., Davey A.B., Crossland W.A.* // *Ferroelectrics*. 1996. Vol. 181. P. 11–19.
54. *Warr S.T., Parker M.C., Mears R.J.* Optically transparent digitally tunable wavelength filter // *Electr. Lett.* 1995. Vol. 31. P. 129–130.
55. *Parker M.C., Mears R.J.* Digital holographic tuning mechanism for WDM // *IEEE Photon. Techn. Lett.* 1995. Vol. 7. P. 1309–1311.
56. *Parker M.C., Cohen A.D., Mears R.J.* // *J. Lightwave Techn.* 1998. Vol. 16. P. 1259–1270.
57. *Parker M.C., Cohen A.D., Mears R.J.* // *IEEE Photon. Techn. Lett.* 1997. Vol. 9. P. 529–531.
58. *Sheridan J.P., Schnur J.M., Giallorenzi T.G.* Electro-optic switching in low-loss liquid crystal waveguides // *Appl. Phys. Lett.* 1973. Vol. 22. № 11. P. 560–561.
59. *Baroni P.-Y., Tan Q., Paeder V., Cosentino A., Roussey M., Scharf T., Herzig H.P., Nakagawa W.* Switchable photonic crystal cavity by LC infiltration // *JEOS – Rapid Publications*. 2010. Vol. 5. P. 10057.
60. *Funfschilling J., Schadt M., Seiberle H.* Videocompatible substructure color projection with cholesteric liquid-crystal band-modulation filter // *Journ. of SID*. 1996. Vol. 4. № 1. P. 41–45.
61. *Sharp G.D., Johnson K.M., Doroski D.* Continuously tunable smectic A\* liquid crystal color filter // *Optics Lett.* 1990. Vol. 15. № 10. P. 523–525.
62. *Sharp G.D., Doroski D., Johnson K.M.* Rapidly switchable optical filter for color generation // *Optics Lett.* 1991. Vol. 16. № 11. P. 875–877.
63. *Walker D.B., Glytis E.N., Gaylord T.K.* // *Appl. Opt.* 1996. Vol. 35. P. 3016–3030.
64. *Ozaki M., Sadohara Y., Uchiyama Y., Utsumi M., Yoshino K.* // *Liquid Crystal*. 1993. Vol. 14. P. 381–387.
65. *Clark N.A., Handschy M.A.* // *Appl. Phys. Lett.* 1990. Vol. 57. № 11. P. 1852–1854.

66. *D'Alessandro A., Asquini R., Ciminelli C.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2001. Vol. 372. P. 353–363.
67. *Asquini R., D'Alessandro A.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2001. Vol. 375. P. 243–251.
68. *Каретников А.А., Онохов А.П., Исаев М.В., Береснев Л.А.* Быстродействующий электрооптический призмный ЖК модулятор // Опт. журн. 1994. № 5. С. 57–61.
69. *Каретников А.А.* Поляризационная призма на основе ориентированного слоя НЖК // Журн. ОМП. 1989. № 7. С. 50–52.
70. *Vladimirov F.L., Pletneva N.I., Soms L.N., Pokrovskiy V.P.* Laser-damage resistance of Liquid Crystal Modulators // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1998. Vol. 321. P. 213–221.
71. *Vladimirov F.L., Pletneva N.I., Pokrovskiy V.P., Soms L.N.* Transverse-electric field induced electro-optical effect in NLCs // European Conference on LCs. Zakopane. Poland. 1997. March 3-8. D-8.
72. *Хаазе В., Подгорнов Ф.* Быстро переключаемые устройства, основанные на сегнетоэлектрических жидких кристаллах // Опт. журн. 2001. Т. 68. № 9. С. 48–54.
73. *Zyryanov V.Ya., Pozhidaev E.P., Smorgon S.L.* et al. Light modulation characteristics of single-polarizer electrooptical cell based on PDFLCs // Liq. Cryst. 2001. Vol. 28. № 5. P. 741–748.

## *Глава 11*

### **АДАПТИВНЫЕ ЛИНЗЫ И ФАЗОВЫЕ КОРРЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**

Адаптивная оптика — раздел оптики, занимающийся разработкой оптических систем с динамическим управлением формой волнового фронта для компенсации случайных возмущений и повышения предела разрешения наблюдательных приборов. Это современное, интенсивно развивающееся научное направление, в котором перспективно использование управляемых элементов и устройств на основе жидких кристаллов [1].

Области применения ЖК элементов определяются возможностями плавного (или дискретного) изменения в широких пределах оптических свойств тонкого слоя материала при малых управляющих напряжениях электрического поля. Они основаны на контролируемой деформации слоя ЖК, осуществляемой либо локально, либо по всему полю зрения.

В настоящей главе рассматриваются два направления адаптивной оптики, основанные на использовании жидкокристаллических материалов: адаптивные линзы и фазовые корректоры.

#### **11.1. Адаптивные линзы**

В адаптивных линзах (АЛ) изменение фокусного расстояния осуществляется не за счет механического перемещения компонентов объектива, а в плоской ячейке без перемещающихся деталей при переориентации молекул ЖК. Принцип работы АЛ состоит в формировании управляемой фазовой задержки слоем ЖК с необходи-

мым пространственным распределением под действием электрического поля. Изменение фокусного расстояния АЛ может быть дискретным или плавным и осуществляется изменением амплитуды напряжения и его частоты.

Первые исследования по созданию АЛ относятся к 1970-м годам [2, 3]. Они представляли собой ЖК ячейку, одна из подложек которой была выполнена в виде линзы, находящейся в контакте со слоем ЖК. Недостатком этих АЛ являлось низкое быстродействие, вызванное большой толщиной слоя ЖК в центре или на периферии. Кроме того, возникла проблема создания однородной ориентации ЖК в относительно толстом слое и на неплоской поверхности. Поэтому они не нашли дальнейшего развития.

Цилиндрические ЖК линзы, содержащие совокупность электродов с индивидуальной адресацией, были разработаны в 1981 г. [4]. Электроды с индивидуальной адресацией были использованы для создания сферических линз [5, 6]. ЖК микролинзы впервые были предложены в работах [7, 8]. Линзы Френеля на основе ЖК описаны в [9]; их модификации проанализированы в обзоре [10].

### ***11.1.1. Теоретические основы***

Создание управляемой фазовой задержки можно разделить на два этапа: формирование необходимой конфигурации электрического поля и вызванную им деформацию слоя ЖК. Обусловленная этой деформацией фазовая задержка обеспечивает фокусирующие свойства линзы. Изменение фокусного расстояния АЛ осуществляется изменением амплитуды и частоты поля.

#### *Способы создания пространственно неоднородных полей и их расчет*

Конфигурация поля в микролинзах (МЛ) задается геометрией электродов. В сферической МЛ для получения аксиально-симметричного поля в электродах создаются круглые отверстия диаметром  $L$ . Различают несимметричные МЛ — отверстия имеются в одном из электродов, и симметричные — совмещенные отверстия имеются в обоих электродах. В цилиндрической МЛ в электродах создается щель. Расчет распределения напряженности в аксиально-симметричном поле несимметричной МЛ проведен в работах [11, 12], симметричной — в работах [13–15]. В работе [11], в частности, учтено влияние диэлектрических свойств подложки на распределение поля. На рис. 11.1 приведена схема несимметричной МЛ.

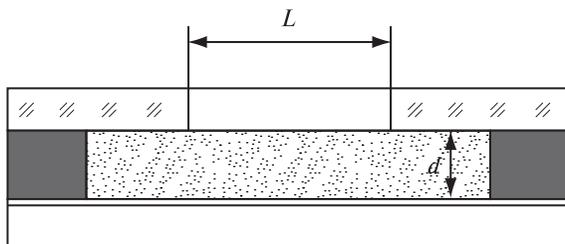


Рис. 11.1. Схема несимметричной микролинзы:  
 $L$  — апертура микролинзы;  $d$  — толщина слоя НЖ

Верхний электрод, изготовленный из хрома, имеет отверстие, нижний электрод — сплошной. Зазор толщиной  $d$  между ними заполняется ЖК. Уравнения, описывающие электрическое поле, имеют вид:  $\operatorname{div} \vec{D} = 0$ ,  $\vec{E} = \operatorname{grad} u$ , где  $D$  — вектор электрического смещения,  $u$  — потенциал электрического поля.

Так как поле потенциала  $u(r, z)$  в МЛ сферически симметрично, уравнение для потенциала в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\epsilon_{\perp} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \epsilon_{\parallel} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (11.1)$$

где  $\epsilon_{\perp}$  и  $\epsilon_{\parallel}$  — диэлектрическая проницаемость в направлениях перпендикулярном и параллельном директору.

Далее формулируются граничные условия для электрического потенциала в окрестности отверстия и уравнение (11.1) решают численными методами. Результаты расчета в виде эквипотенциальных поверхностей для МЛ с  $L = 70$  мкм,  $d = 20$  мкм, ЖК E-7 фирмы Merck приведены на рис. 11.2. Вблизи края отверстия поле наиболее неоднородно. С увеличением  $L$  неоднородность уменьшается, и это приводит к исчезновению фокусирующих свойств.

Создание АЛ с большой апертурой основано на ином формировании электрического поля [16–18]. Известны два подхода: зональный (поле создается с помощью совокупности индивидуально адресуемых электродов) и модальный (при их ограниченном количестве). Модальные линзы в отличие от зональных обеспечивают плавное непрерывное изменение фазового профиля. В этих линзах один из электродов является высокоомным управ-

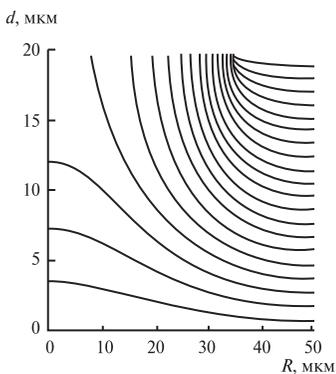


Рис. 11.2. Эквипотенциальные поверхности для микролинзы с  $L = 70$  мкм,  $d = 20$  мкм, ЖК Е-7 фирмы Мек.  $R$  — расстояние от центра линзы до рассматриваемой точки апертуры

ляющим электродом (УЭ), по периферии которого наносятся низкоомные контакты (рис. 11.3). Возникающая система с распределенным сопротивлением (УЭ) и емкостью (слой ЖК) имеет реактивный характер и управляет параметрами АЛ при изменении амплитуды и частоты поля.

Разработаны сферические и цилиндрические АЛ. Характер волнового фронта определяется геометрией контактов: для сферической линзы — кольцевой контакт, цилиндрической — два параллельных полосковых контакта. Слой ЖК помещен между двумя стеклянными подложками с электродами (рис. 11.3б, в). Поверх-

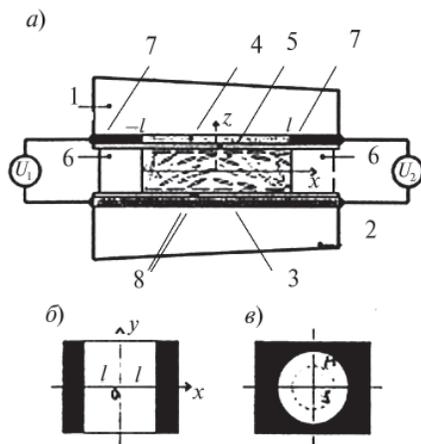


Рис. 11.3. Схема модальной адаптивной линзы (а) и форма электродов для цилиндрической (б) и сферической (в) линз: 1, 2 — стеклянные подложки; 3 — общий электрод; 4 — управляющий электрод; 5 — слой ЖК; 6 — прокладки, задающие толщину слоя ЖК; 7 — контакты; 8 — ориентирующий слой

ностное сопротивление УЭ (1–10 МОм/□) много больше сопротивления сплошного (заземленного) электрода (50–200 Ом/□). Напряжение прикладывается к контактам, расположенным на периферии УЭ. Если к контактам приложить синусоидальное напряжение, то из-за резистивно-емкостного характера системы изменение напряжения в центре будет меньше изменения напряжения на контактных электродах. С увеличением частоты различие растет, приводя к уменьшению среднеквадратичного значения напряжения в центре апертуры. В установившемся режиме реализуется распределение среднеквадратичного значения напряжения в слое ЖК, и в достаточно широкой области изменения параметров управляющего поля это распределение будет квазипараболическим. Уравнение, описывающее распределение напряжения по апертуре  $U(x, y)$ , имеет вид [17]:

$$\nabla^2 U = \rho_s c \frac{\partial U}{\partial t} + \rho_s g U, \quad (11.2)$$

где  $g$  — проводимость слоя ЖК на единицу площади,  $\rho_s$  — поверхностное сопротивление УЭ,  $c$  — емкость на единицу площади УЭ.

Уравнение (11.2) при синусоидальном управляющем напряжении имеет вид:

$$\nabla^2 U = \chi^2 U \quad (11.2a)$$

где  $\chi^2 = \rho_s(g - i\omega c)$ ,  $l$  — характерный размер апертуры (рис. 11.3).

Уравнение (11.2a) применено для расчета поля цилиндрической АЛ:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \chi^2 U, \quad (11.3)$$

Из решения этого уравнения с учетом граничных условий следует, что при  $|\chi|l \ll 1$  зависимость  $U(x, y)$  приобретает вид:

$$U(x) \approx U_0 \left[ 1 - \frac{\chi^2}{2} (l^2 - x^2) \right] \quad (11.3a)$$

Уравнение (11.3a) показывает, что характер распределения напряжения в этом случае будет квазипараболическим, что позволяет создать модальные линзы. В случае сферической линзы при  $|\chi|l \ll 1$  уравнение (11.2a) имеет вид:

$$U = U_0 \left( 1 - \frac{\chi^2}{4} \right) (l^2 - r^2) \quad (11.4)$$

Как и в случае цилиндрических модальных линз, напряжение в сферических изменяется квадратично в зависимости от расстояния до центра. Однако глубина прогиба кривой  $U(r)$  для сферической линзы в два раза меньше, чем в цилиндрической. Это означает, что сферические модальные линзы имеют больший диапазон управляющих частот. Наличие квадратичного поля вызывает такое изменение оптической анизотропии ( $\Delta n$ ) слоя НЖК, при котором фазовая задержка от периферии  $\Delta\Phi_l = \Delta\Phi(r=1)$  к центру  $\Delta\Phi_o = \Delta\Phi(r=0)$  плавно уменьшается, обеспечивая условие фокусировки.

*Деформация нематического ЖК в неоднородном электрическом поле*

Деформация директора  $\vec{n}$  в пространственно неоднородном поле определяется из условия минимизации функционала свободной энергии. Для этого необходимо выполнение условия Эйлера-Лагранжа. В цилиндрических координатах в отсутствие твист-эффекта и в пренебрежении вкладом флекс-эффекта уравнение Эйлера-Лагранжа имеет вид [12]:

$$K_{11} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + K_{33} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \Delta \epsilon \epsilon_0 E_r E_z = 0, \quad (11.5)$$

где  $\theta$  — угол отклонения директора  $\vec{n}$  от исходной ориентации (рис. 11.4),  $K_{11}$ ,  $K_{33}$  — константы упругости соответственно для продольного и поперечного изгибов.  $E_z$  и  $E_r$  — компоненты  $E$ -поля:

$$E_z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad \text{и} \quad E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}.$$

Задача решается в одноконстантном приближении ( $K_{11} = K_{33}$ ). Проведен численный расчет деформации директора нематика в гомеотропной несимметричной МЛ [19, 20] в предположении сильного сцепления молекул ЖК с подложкой. В работе [12] задача решена в приближении малых деформаций ( $n = [\theta; 0; 1]$ ) в работе [11] — для любых деформаций ( $n = [\sin\theta; 0; \cos\theta]$ ). Распределение директора для сферической МЛ с исходной гомеотропной ориентацией представлено на рис. 11.5 [21]. Деформация плавно увеличивается при удалении от центра линзы и достигает максимума вблизи края отверстия. Результаты расчета деформации директора в симметричной планарной МЛ представлены в работе [22]. Численный расчет угла  $\theta$  проведен в одноконстантном приближении в предположении, что твист-деформация в слое ЖК отсутствует. Одновременно рассмотрена динамика переориентации молекул в планарной линзе.

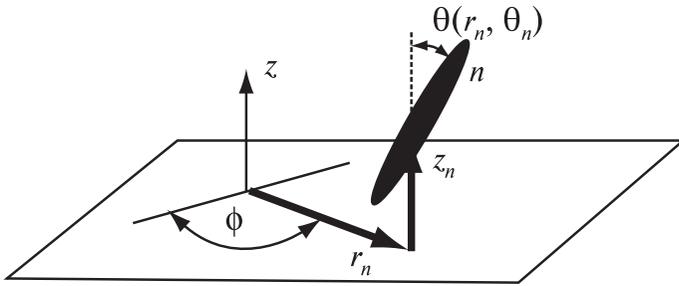


Рис. 11.4. Расположение директора в объеме ЖК при исходной гомеотропной ориентации

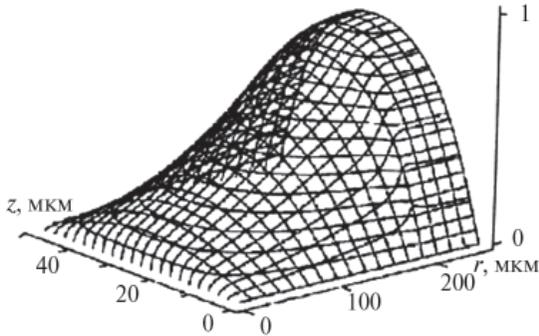


Рис. 11.5. Распределение директора ЖК в гомеотропной МЛ с  $L = 600$  мкм,  $U = 14$  В.

Расчет деформации в АЛ [18] выполнен с использованием уравнения Эриксона-Лесли:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta \right) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - (K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cos \theta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 + \frac{\Delta \epsilon U^2}{4\pi d^2} \sin \theta \cos \theta = 0 \quad (11.6)$$

Уравнения (11.6) и (11.2) описывают распределение угла  $\theta$  по апертуре линзы.

Важной величиной для характеристики АЛ является значение двулучепреломления ( $\Delta n$ ). Пространственное распределение его локальных значений вычисляется по формуле:

$$\Delta n = \frac{1}{d} \int_0^d n(\theta(r, z)) dz - n_0, \text{ где } n(\theta) = \frac{n_o n_e}{(n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta)^{1/2}}, \quad (11.7)$$

$n_e, n_o$  — показатели преломления для необыкновенного и обыкновенного лучей.

Профиль фазовой задержки между обыкновенной и необыкновенной волнами описывается выражением:

$$\Delta\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \int_0^d n(\theta) dz - n_o d \right] \quad (11.8)$$

Распределение фазовой задержки по апертуре линзы определяет оптические свойства линзы. С помощью формул (11.7), (11.8) при известном распределении директора  $\theta(r, z)$  была рассчитана фазовая задержка  $\Delta\Phi(r)$  для гомеотропной [11, 12], планарной [22] МЛ, а также АЛ с планарной ориентацией [18]. Для гомеотропной линзы в центре отверстия фазовая задержка равна нулю, с увеличением расстояния  $r$  от центра она возрастает. Фазовый профиль зависит от приложенного напряжения, в определенном диапазоне напряжений зависимость  $\Delta\Phi(r)$  становится квадратичной и гомеотропная линза оказывается сферической рассеивающей линзой. Это напряжение увеличивается с увеличением размера линзы. Для МЛ с отношением  $L/d \geq 15$  параболический фазовый профиль не наблюдается. У планарной АЛ и МЛ фазовая задержка возрастает от края линзы к ее центру (рис. 11.5) [18, 22] и в определенном диапазоне напряжений имеет форму параболы. В этом случае линза является сферической собирающей.

### 11.1.2. Оптические характеристики микролинз

*Несимметричные МЛ с планарной, гибридной и гомеотропной ориентацией*

В несимметричных МЛ [7, 8, 23] один из электродов представлял собой непрозрачную алюминиевую пленку, в которой с помощью фотолитографии выполнено отверстие диаметром 750 мкм, а противоположный электрод — прозрачный слой ИТО (рис. 11.1). Рассмотрим МЛ с планарной ориентацией ( $\Delta\epsilon > 0$ ). Исследования профиля интенсивности проходящего через отверстие света показали, что структура об-

ладает свойствами собирающей линзы при низких напряжениях и рассеивающей — при высоких, что определяется деформацией ЖК в аксиально-симметричном поле. Она максимальна у края отверстия, где поле наиболее неоднородно. При малых напряжениях деформация в центре мала, в результате чего формируется профиль показателя необыкновенной волны ( $e$ -волны), определяющий фокусирующие свойства микролинзы (рис. 11.6а). При больших напряжениях переориентация молекул происходит и в центре микролинзы, поэтому показатель преломления  $e$ -волны проходит через минимум в центре (рис. 11.6б), и микролинза приобретает дефокусирующие свойства. Поскольку профиль показателя преломления зависит от напряжения, то аналогичная зависимость имеет место для фазовой задержки.

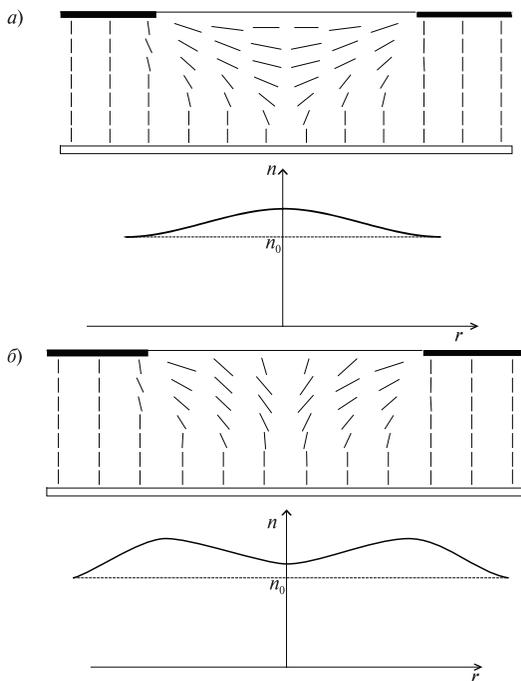


Рис. 11.6. Распределения директора и показателя преломления для необыкновенной ( $e$ ) волны в ЖКМЛ с гомогенной ориентацией (без учета дисклинации): сверху (а) — малые напряжения, внизу (б) — более высокие напряжения

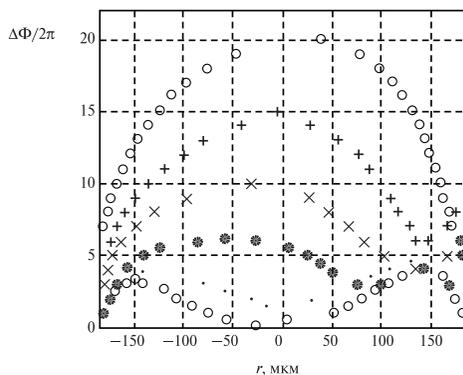


Рис. 11.7. Профили фазовой задержки в планарной МЛ.  
 $L = 370$  мкм, толщина ЖК 50 мкм,  $U = 2, 3, 4, 5, 9, 30$  В

Это подтверждается экспериментальными данными по исследованию структуры фазовых профилей (рис. 11.7). Фазовая задержка при низких напряжениях максимальна в центре МЛ. С ростом напряжения глубина фазового фронта уменьшается и при  $U$  около 40 В (для  $L = 174$  мкм) МЛ становится рассеивающей (фазовая задержка в ее центре становится меньше, чем на краях).

Зависимость фокусного расстояния  $f$  для планарной МЛ от напряжения для фокусирующего режима показана на рис. 11.8а [24, 25].

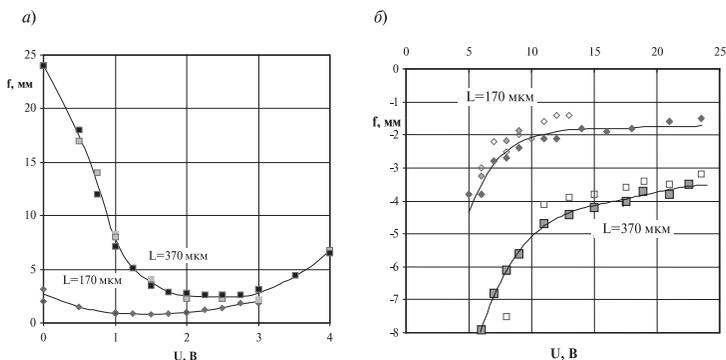


Рис. 11.8. Зависимость фокусного расстояния  $f$  от напряжения для планарной МЛ для фокусирующего (а) и дефокусирующего (б) режимов;  $d = 120$  мкм,  $\Delta\epsilon > 0$  (5СВ)

При увеличении напряжения фокусное расстояние сначала уменьшается, достигая минимума при некотором напряжении  $U_m$ , а потом увеличивается.

С ростом диаметра микролинзы фокусное расстояние увеличивается. Зависимость фокусного расстояния от напряжения для дефокусирующего режима показана на рис. 11.8б. С ростом напряжения фокусное расстояние уменьшается до некоторого значения, а затем не изменяется. Напряжение перехода от фокусирующего к дефокусирующему режиму принимает более высокие значения в микролинзах с большим диаметром.

Исследования интерференционных картин планарной микролинзы в поляризационный микроскоп показали, что с повышением напряжения в линзе формируется дисклинация, ухудшающая ее оптические свойства [7, 24, 25]. На рис. 11.9 представлены интерференционные картины при различных напряжениях. При увеличении напряжения на краю возникает излом фазового профиля (рис. 11.9а). С ростом напряжения область излома растет, пока не появится дисклинация (рис. 11.9б). Способы ее устранения описаны в ряде работ. Например, на границе микролинзы, где формируется дисклинация, создается клинообразная область с гибрид-

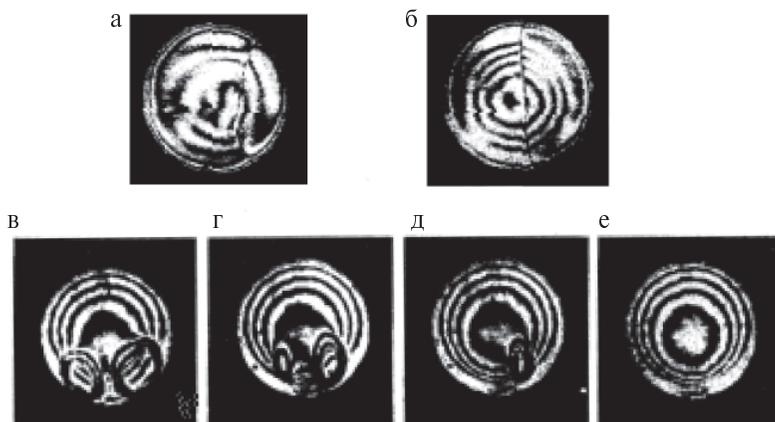


Рис. 11.9. Интерференционные картины планарной микролинзы, показывающие возникновение дисклинации (а, б) и ее исчезновение (в, г, д, е) с течением времени при наличии мультимодеменной структуры: в — через 1 с; г — 10 с; д — 20 с; е — 40 с

ной ориентацией (мультидоменная структура) [26]. Эта область меняет характер переориентации молекул ЖК в МЛ, в результате чего дисклинация уходит из области отверстия (рис. 11.9в, г, д, е).

Исследование зависимости числовой апертуры и разрешающей способности МЛ с планарной ориентацией [25] от напряжения для разных отношений  $L/d$  показало, что наилучшие оптические свойства наблюдаются на ниспадающей ветви зависимости фокусного расстояния от напряжения и в области минимума этой зависимости. Достигнуто уменьшение управляющего напряжения до 6,5–7 В при частоте 10 КГц и использовании ЖК с  $\Delta\epsilon = 2$  при толщине слоя 50 мкм [27].

Молекулы ЖК в гомеопланарной (гибридной) МЛ имеют различную исходную ориентацию вблизи разных подложек: гомеотропную на одной и планарную на другой. Результаты исследований приведены в работах [24, 25, 28–30]. В случае ЖК с  $\Delta\epsilon < 0$  при низких напряжениях МЛ имеет дефокусирующие свойства. При высоких напряжениях (около 80 В) МЛ становится собирающей и имеет хорошие оптические свойства, однако ее фокусное расстояние слабо зависит от напряжения. При использовании ЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  наблюдается обратная ситуация: при малых напряжениях МЛ является собирающей, при высоких — рассеивающей, о чем свидетельствует структура фазовых профилей. Зависимость фокусного расстояния от напряжения для гибридной МЛ в фокусирующем режиме аналогична соответствующей зависимости для планарной МЛ (рис. 11.8б). Измерения времен отклика и восстановления ориентации показали, что для МЛ с  $\Delta\epsilon > 0$  они составляют несколько секунд. При  $\Delta\epsilon < 0$  в фокусирующем режиме нужны более высокие напряжения, и время отклика может быть уменьшено до нескольких миллисекунд. В отличие от планарной МЛ, в гибридной не возникает дисклинации. Недостатком этого типа МЛ является сдвиг центра фазового профиля относительно центра отверстия.

Результаты исследования оптических свойств МЛ с гомеотропно ориентированным ЖК представлены в работах [12, 21, 31]. При приложении напряжения формируется аксиально-симметричное распределение показателя преломления для  $e$ -волны с минимумом в центре (как на рис. 11.6б), т. е. гомеотропная линза должна иметь свойства рассеивающей линзы. Исследованы интерференционные картины (рис. 11.10) и фазовые профили этих МЛ при разных напряжениях. Наблюдается дефокусирующий режим, причем при определенном напряжении  $U_p$  профиль фазовой задержки становится

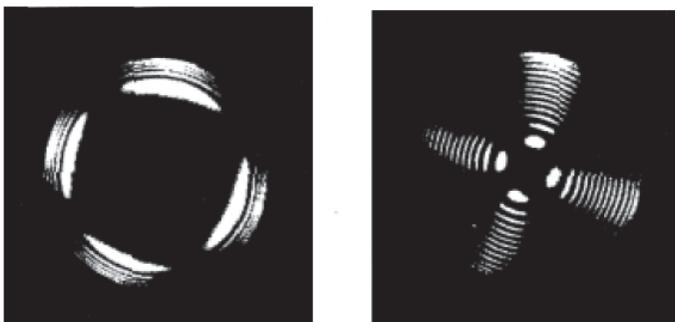


Рис. 11.10. Интерференционные картины гомеотропной МЛ:  
 $L = 600$  мкм;  $U = 6$  и  $14$  В

квадратичным и МЛ также становится сферической.  $U_p$  повышается с увеличением размера линзы. При дальнейшем увеличении напряжения профиль фазовой оказывается становится близким к линейному. Режим перестраиваемой линзы наиболее выражен у МЛ с отношением  $L/d = 3,5$ . При малых напряжениях МЛ обладают двумя фокусами, причем один из них является кольцевым, другой — точечным. Точечному фокусу соответствуют большие значения фокусного расстояния. Когда напряжение становится равным  $U_p$ , точечный и кольцевой фокус сливаются.

Числовая апертура МЛ зависит от отношения  $L/d$ . Максимальная числовая апертура при  $U_p$  наблюдается у МЛ с отношением  $L/d = 3,5$ , она достигает значения  $0,11$ . Разрешающая способность гомеотропных МЛ увеличивается с уменьшением параметра  $L/d$  и достигает значения примерно  $200$  лин/мм, что является высокой величиной для АЛ.

В работе [12] исследована МЛ с ЖК с  $\Delta\epsilon > 0$ , обладающая дефокусирующими свойствами. Однако ее фокусные расстояния на порядок меньше, чем у аналогичных МЛ с  $\Delta\epsilon < 0$ . Теми же авторами приведены величины сферических aberrаций этих линз при напряжении  $6,5$  В и частоте  $10$  кГц, свидетельствующие об относительно высоком оптическом качестве.

#### *Симметричные МЛ*

Симметричная МЛ имеет отверстия одинакового диаметра в обоих электродах, помещенные одно над другим. Результаты ис-

следований представлены в работах [32–36]. Переход к таким МЛ имел целью устранить дисклинации и сдвиг центра интерференционной картины у несимметричных планарных и гибридных МЛ. В симметричных МЛ не наблюдается сдвига центра интерференционной картины относительно центра отверстий, однако при повышении напряжения вблизи края отверстия возникают две небольшие дисклинации. Поле в симметричной МЛ отличается сильной неоднородностью — напряженность поля в центре значительно ниже, чем при несимметричных электродах, а рабочие напряжения по сравнению с несимметричной МЛ повышаются. При малых напряжениях имеется два фокуса. При повышении напряжения фокусное расстояние сначала убывает, достигает минимального значения, а затем растет. При некотором напряжении фокусы микролинзы сливаются и наблюдаются наилучшие оптические свойства. Качество изображения симметричных линз характеризуется полушириной кривой функции рассеяния точки на уровне полумаксимума (FWHM), равной для сферической линзы 2,5 мкм [14], а для цилиндрической 2,2–2,3 мкм [37].

В работах [35, 36] исследована зависимость параметров МЛ от свойств ЖК материала. Максимальное значение числовой апертуры линейно увеличивается с ростом оптической анизотропии  $\Delta n$  и приведенной диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon/\epsilon$ , а напряжение, при котором наблюдается максимум, убывает с ростом диэлектрической анизотропии. В работе [36] проанализирована роль упругих свойств нематика в формировании астигматизма МЛ и показано, что, чем больше анизотропия упругих свойств, тем сильнее астигматизм.

Усовершенствование симметричных МЛ описано в работах [38, 39]. Electroды имеют отверстия и разделены узкими щелями на два (четыре) сектора; на эти секторы могут подаваться разные напряжения. Вследствие различия деформации нематика в разных частях МЛ возникает линейная добавка в фазовый профиль, вызывающая сдвиг луча в поперечном направлении. Появляется возможность управляемого смещения точки фокусировки перпендикулярно к оптической оси: при сохранении параболического фазового профиля смещение составляет 10 мкм (при  $L/d = 3$ ) [38].

В работах [37, 40] предложено помимо обычных управляющих электродов использовать четыре дополнительных, к которым подводятся различные напряжения. При определенных условиях управления удается избежать появления дисклинации в области отвер-

ствия и расширить диапазон напряжений наблюдения фокусирующих свойств. В работе [41] исследована числовая апертура (NA) МЛ при сложении и вычитании полей, созданных парами электродов в слое ЖК. Показано, что  $NA_{\max}$  на 40% выше при вычитании полей, чем в случае их сложения, а также чем в случае обычной МЛ. В работе [15] теоретически и экспериментально показана возможность уменьшения сферической аберрации и астигматизма при подборе напряжений на электродах.

Рассмотрев известные типы МЛ на нематиках, можно констатировать, что при малых напряжениях МЛ с планарной и гибридной ориентацией обладают фокусирующими свойствами, а с гомеотропной – дефокусирующими. Сравнение оптических свойств МЛ проведено в работе [30]. Зависимость фокусного расстояния от напряжения схожа для всех типов МЛ: при повышении напряжения оно сначала уменьшается, достигая минимума при некотором  $U_m$ , а затем возрастает. При дальнейшем увеличении напряжения происходит инверсия оптических свойств МЛ: у гибридной и планарной МЛ наблюдаются дефокусирующие свойства. Максимальная числовая апертура для всех МЛ является наибольшей в случае, если отношение  $L/d = 3$ . Сравнение  $NA_{\max}$  у различных МЛ показывает, что наибольшая фокусирующая способность достигается при планарной ориентации ( $NA_{\max} = 0,21$ ), а дефокусирующая – при гомеотропной ( $NA_{\max} = 0,22$ ). Диапазон напряжений, в котором можно управлять фокусным расстоянием, зависит от типа МЛ и от величины параметра  $L/d$ . Более широким он будет у гомеотропных микролинз. Максимальная разрешающая способность планарных и гибридных МЛ наблюдается при  $U_m$ , причем она выше у планарных. В дефокусирующем режиме наибольшая разрешающая способность у гомеотропной МЛ.

Оптические свойства симметричной и несимметричной МЛ с планарной ориентацией схожи. Однако создание симметричных МЛ связано с большими технологическими трудностями. Наблюдаемая в несимметричных планарных МЛ дисклинация возникает при напряжениях, в полтора раза превышающих напряжения максимума числовой апертуры  $U_m$ , и потому в рабочем диапазоне напряжений она мало влияет на оптические свойства МЛ.

Для увеличения апертуры предложено расположить управляющий электрод на внешней поверхности одной из стеклянных подложек. В этом случае фокусирующие свойства реализуются для отверстий большего диаметра (5–7 мм) [42]. Это приводит к увеличению рабо-

чего напряжения до 40–100 В, что снижает применимость линз. В цилиндрических линзах с шириной щели 2 мм аналогичное решение увеличило напряжения до 120–180 В [43]. В работе [44] в эту линзу над верхней подложкой был добавлен еще один слой ЖК (управляющий электрод один и находится в центре). Рассмотрены два случая взаимной ориентации молекул ЖК: оптические оси параллельны и ортогональны. Оптическая сила линз в этих случаях мало отличается (около  $6 \text{ м}^{-1}$  при  $U = 100 \text{ В}$ ), но она существенно выше, чем у линзы с одним слоем (около  $4 \text{ м}^{-1}$  при  $U = 100 \text{ В}$ ). Диапазон рабочих напряжений для линз с двумя слоями 90–120 В, что выше, чем для линз с одним слоем ЖК.

Общим недостатком АЛ на нематиках является большое время их фокусировки, составляющее несколько секунд. В работе [45] предложено использовать нематик с двухчастотным режимом управления позволяет почти на порядок уменьшить времена фокусировки.

#### *Микролинзы на основе сегнетоэлектрических смектиков (С\*ЖК)*

Повышение быстродействия АЛ осуществляется использованием С\*ЖК [46]. Дипольные моменты молекул в С\*ЖК перпендикулярны директору и лежат в плоскости смектического слоя. В электрическом поле все диполи выстраиваются по направлению поля. Поле противоположного знака переориентирует диполи, а вместе с ним и директор, который поворачивается по образующей конуса в плоскости слоя на угол  $2\theta$ , где  $\theta$  — угол наклона молекул относительно оси спирали. Электрооптический отклик зависит от полярности приложенного напряжения, причем время отклика существенно меньше, чем для неполярных ЖК. В работе [46] для создания массива С\*ЖК-МЛ на одной из поверхностей формируется периодическая структура из отверстий глубиной 9 мкм и радиусом 200 мкм. Для этого на поверхность наносится фотополимер и через фотомаску подвергается воздействию УФ излучения. С\*ЖК введен в ячейку капиллярным методом и имеет планарную ориентацию. Принцип работы МЛ показан на рис. 11.11. В зависимости от направления поля реализуется как фокусирующий (рис. 11.11а), так и дефокусирующий (рис. 11.11б) режимы. Исследована зависимость времени отклика от величины поля.

Время переключения из одного режима в другой составляет 100–200 мкс. С увеличением напряженности поля время отклика уменьшается.

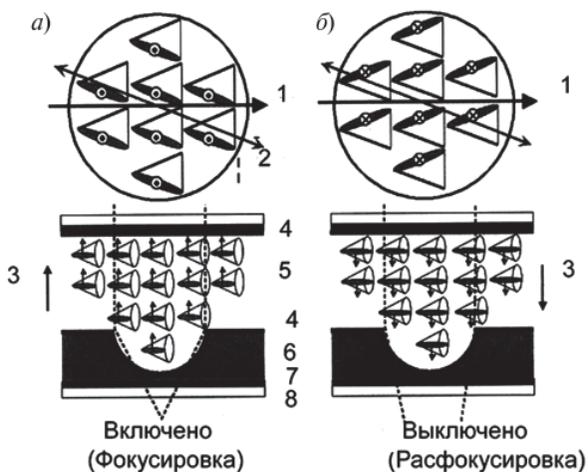


Рис. 11.11. Фокусирующий (а) и дефокусирующий (б) режимы работы МЛ на основе С\*ЖК: 1 — направление натирания; 2 — поляризованный свет; 3 — направление электрического поля; 4 — ориентирующий слой; 5 — слой С\*ЖК; 6 — фотополимер; 7 — прозрачный электрод; 8 — стекло

### 11.1.3. Оптические характеристики адаптивных линз

#### Модальные линзы.

Схемы цилиндрической и сферической модальных АЛ (МАЛ) приведены на рис. 11.3. Ранее описан способ формирования электрического поля и приведены уравнения, описывающие распределение напряжения по апертуре линзы. Численный расчет позволяет находить оптимальные значения частоты и амплитуды управляющего напряжения для получения параболической зависимости фазовой задержки по апертуре линзы [16–18, 47–51]. Однако даже при известных параметрах ЖК и МАЛ вычисленные оптимальные соотношения амплитуда-частота не всегда приемлемы для реальной линзы. Это связано с технологическими особенностями их сборки: калибровочные параметры для каждой линзы индивидуальны. Основные параметры исследованных образцов МАЛ следующие: фокусные расстояния сферических и цилиндрических линз изме-

нялись от 0,5 м до бесконечности; диаметр апертуры сферической линзы составлял 5 мм, размеры апертуры цилиндрической линзы были равны 5×15 мм. Использовался планарно ориентированный нематик фирмы «Merck» с  $\Delta n = 0,26$ . Высокоомный электрод был создан напылением прозрачного резистивного покрытия с сопротивлением около 9 МОм/□. Управляющее напряжение не превышало 10 В, частота — 17 кГц.

В работах [19, 50, 52] сообщается об АЛ с оптическим управлением. Они сочетают в себе все преимущества электрически управляемых адаптивных линз, но имеют дополнительную особенность — зависимость фокусного расстояния от интенсивности падающего на линзу излучения. Эти линзы представляют собой многослойную структуру. Внешними слоями являются стеклянные подложки с нанесенными на них электродами. На одной из них электрод имеет круглое отверстие для случая сферической линзы или представляет собой два полосковых контакта для цилиндрической линзы. Область без электродов играет роль апертуры линзы. На эту подложку наносится слой фотоувствительного полупроводника. Поверхностное сопротивление этого слоя много больше сопротивления сплошного низкоомного электрода при любой интенсивности падающего излучения. Используется планарно ориентированный нематик. Конструкция позволяет создавать в области апертуры емкостно-резистивный делитель напряжения. Управлять в такой системе распределением напряжения можно не только с помощью амплитуды и частоты приложенного поля, но и интенсивности излучения. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что профиль фазовой задержки для пучка света с однородным и гауссовым распределением интенсивности близок к параболическому. Фокусное расстояние монотонно возрастает с увеличением мощности излучения. Приведены примеры простых адаптивных систем этого типа.

#### ***11.1.4. Линзы на основе композита полимер — ЖК***

Одним из способов создания перестраиваемых линз является использование композита НЖК-полимер, облучаемого лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности, обеспечивающим неоднородное распределение показателя преломления [53, 54]. Приложение однородного электрического поля к электродам ячейки формирует линзоподобное распределение показателя преломления, в результате чего формируются управляемые полем длиннофокусные линзы.

В электрически управляемых линзах на основе полимер-диспергированных ЖК (PDLC) градиент показателя преломления создается при изменении размеров микрокапель [55, 56]. Для этого на смесь ЖК-мономер воздействуют ультрафиолетовым излучением (УФ) через фотомаску. Воздействие слабого УФ излучения дает капли более крупного размера и наоборот — чем сильнее облучение, тем меньше размер капель. Области с каплями меньшего размера имеют большую концентрацию полимера, и потому показатель преломления этой области будет меньше, чем область с большими каплями. При воздействии поля переориентация молекул нематика начинается при критическом напряжении  $U_d$ . Зависимость  $U_d$  от размера капли ( $D$ ) выглядит следующим образом:  $U = C / \sqrt{D}$ , где  $C$  — const. Чем больше размер капли, тем меньше управляющее напряжение. Для создания собирающей и рассеивающей линз используются фотомаски с круговым градиентом пропускания. На рис. 11.12 показаны фотомаски и профили показателей преломления для собирающей (а) и рассеивающей (б) линз. Недостатком PDLC-линз является высокое управляющее напряжение (более 100 В). Для уменьшения управляющего напряжения предложено использовать ЖК с полимерной сеткой с градиентом профиля показателя преломления. Концентрация ЖК в этой смеси — 95%, поэтому на-

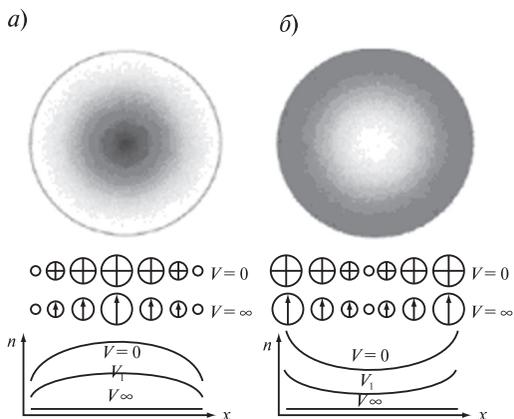


Рис. 11.12. Адаптивные линзы на PDLC для фокусирующего (а) и дефокусирующего (б) режимов

пряжение снижается до 10 В. Фокусное расстояние этой линзы примерно 310 м и для ее работы используются скрещенные поляроиды. Линза с таким большим фокусным расстоянием представляет интерес для астрономии и спутниковой аппаратуры. Для работы в неполяризованном свете предложено использовать два ортогонально ориентированных гомогенных слоя ЖК [56].

В работах [57, 58] описаны линзы, в которых фокусирующие свойства задаются исходным профилем поверхности подложки, выполненным в виде сферических углублений диаметром 450–500 мкм. Нанесенные на них электроды формируют неоднородное поле. При увеличении напряжения до 200 В фокусное расстояние изменяется от 3,3 до 3,5 см, время фокусировки – 200 мкс [57].

В работе [59] предложены АЛ, использующие новый принцип формирования градиента показателя преломления в композиции ЖК-мономер. В отсутствие поля ЖК и мономер в смеси распределены равномерно. При приложении неоднородного поля молекулы ЖК перемещаются в область более сильного поля. С другой стороны наблюдается их диффузия в обратном направлении, вызванная различием концентрации. В итоге возникает градиент концентрации ЖК, что приводит к созданию градиента показателя преломления. Изменение величины управляющего напряжения позволяет изменять распределение показателя преломления, и, следовательно, фокусное расстояние линз. Достоинством таких АЛ являются малые величины астигматизма и светорассеяния. Недостатками – высокие величины управляющих напряжений (до 180 В) и большие времена фокусировки (3 мин при световом диаметре 9 мм, 1 с при диаметре 50 мкм). Данный принцип рекомендован для создания оптических микроэлементов: микролинз, микропризм, линз Френеля. Интересно предложение использовать АЛ для формирования страниц текста в оптических системах памяти [60].

Возможность создания адаптивной линзы Френеля на основе структур жидкий кристалл на кремнии (LCoS) за счет локальной фазовой модуляции при незначительном изменении амплитуды светового сигнала описана в работе [61]. Использовались две ориентации: твистовый нематик, работающий на отражение, и планарно ориентированный слой НЖК. Теоретический анализ показал, что возможностью фазовой модуляции обладают обе структуры, причем оптимальный угол закрутки твистовой структуры составил 52°. Экспериментальное исследование макета линзы Френеля с изменяемым фокусным расстоянием (от 1 до 4 м) показало возможность его применения в качестве лазерного коллиматора.

### 11.1.5. Применение адаптивных линз в оптических системах

#### Устройство записи информации на оптические диски

Бифокальные АЛ (с двумя фиксированными значениями фокусного расстояния) использованы для записи информации на оптические диски [62]. Разработки направлены на увеличение объема памяти носителей. Для этого в толще диска помещен дополнительный регистрирующий слой. Для записи и считывания информации при использовании двух слоев удобна бифокальная оптическая система. Задача была решена с помощью АЛ, выполненной в виде твистовой ЖК ячейки (ТЖКЯ) и осуществляющей переключение между различными модами поляризации (рис. 11.13).

В положении «выключено» ТЖКЯ за счет закрученной структуры ЖК поворачивает линейно поляризованный свет на  $90^\circ$ . В результате свет взаимодействует с ЖК с показателем преломления  $n_o$  и фокусируется в точке на большом фокусном расстоянии (верхняя часть рис. 11.13). В положении «включено» оптическая активность

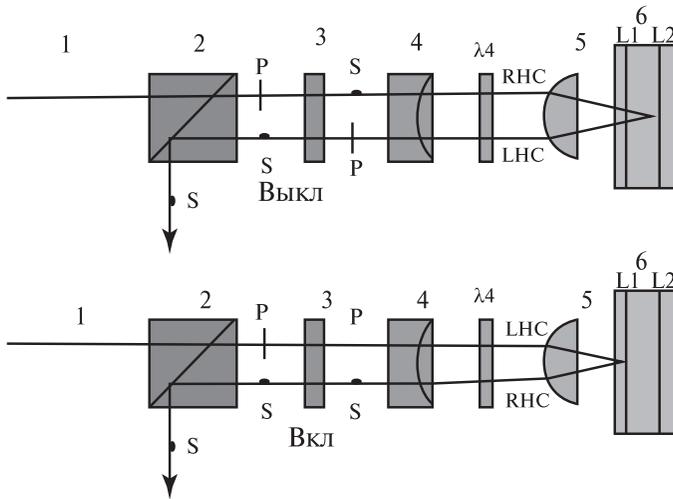


Рис. 11.13. Схема бифокальной АЛ, выполненной в виде ТЖКЯ: 1 — излучение лазера; 2 — делитель пучка; 3 — ТЖКЯ; 4 — АЛ; 5 — объектив; 6 — диск; S, P — ортогональные направления поляризации света; ЛНС, РНС — лево- и правоциркулярный свет; L1, L2 — регистрирующие слои в объеме диска

слоя ЖК исчезает, и плоскость поляризации света не изменяется при его прохождении через слой ЖК с показателем преломления  $n_e$ . При этом свет фокусируется в точке с малым фокусным расстоянием (нижняя часть рис. 11.13), и ТЖКЯ работает как бифокальная переключаемая линза.

Фирмой Philips (Нидерланды) были изготовлены образцы бифокальных АЛ [62]. Материалом служил полимеризующийся ЖК фирмы «Мерк» на основе цианобифенилов с добавкой, увеличивающей диэлектрическую анизотропию. АЛ сферической конфигурации с радиусом 49 мм и диаметром 3,44 мм изготавливались формовкой с последующей фотополимеризацией. Разница в фокусном расстоянии для двух поляризации составила 19 мм.

#### *Оптоволоконный переключатель*

Семейство МЛ предложено использовать в качестве оптических переключателей для волоконно-оптических элементов [23, 63]. Особенностью этого направления является применение не столько фокусирующих свойств МЛ, сколько формирование апертуры выходного светового сигнала, которую согласуют с входной апертурой оптического волокна. Слой ЖК в МЛ имел толщину 50 мкм и размещался на расстоянии 7 мм от торца оптического волокна с сердцевинной диаметром 10 мкм. С помощью ПЗС матрицы измерялось изменение интенсивности проходящего через МЛ и оптическое волокно светового сигнала от He-Ne лазера с диаметром пучка 2 мм при подаче напряжения от 0 до 4 В. Исследовались изменение интенсивности излучения на выходе оптического волокна при изменении напряжения, времена отклика при различных условиях ориентации ЖК и значениях диэлектрической анизотропии. Эксперименты показали, что интенсивность излучения на выходе оптического волокна возросла при оптимальной фокусировке в 210 раз при  $U = 1$  В. Время отклика при двухчастотном режиме управления МЛ составило 5 с.

В работах [64, 65] МЛ использована для управления световым потоком в одномодовом оптическом волокне для эндоскопов. Благодаря фокусирующему действию МЛ интенсивность проходящего сигнала ( $\lambda = 458$  нм) через оптическое волокно с диаметром жилы 3,2 мкм увеличилось более чем в 1100 раз при  $U = 1$  В и расстоянии до оптического волокна 1 см. При толщине слоя ЖК 27 мкм время отклика МЛ составило несколько десятков секунд. Для широкого применения необходимо повышение быстродействия, что осуществляется использованием  $C^*ЖК$ .

### *Системы оптического ограничения*

Массив несимметричных МЛ был использован для ограничения интенсивности светового потока, проходящего через кювету, заполненную нелинейно поглощающей средой — раствором фуллерена  $C_{70}$  в толуоле при концентрации  $2,3 \cdot 10^{-3}$  М [66, 67]. Толщина кюветы подбиралась так, чтобы поглощающая среда оказалась в фокальной плоскости МЛ. Источником излучения служил многоимпульсный Nd:YAG лазер ( $\lambda = 532$  нм) с длительностью импульса 1 нс. Для регистрации ослабления интенсивности излучения использовался калиброванный диод ФД-23 и калориметр ИЭК-1. Измерения производились при параллельной и перпендикулярной ориентации поляризации излучения по отношению к ориентации директора ЖК. Результаты, полученные для излучения выше порога в 3 мДж с параллельной ориентацией поляризации, подтвердили возможность использования МЛ для оптического ограничения.

### *Дефлектор на основе АЛ с разделенными электродами*

Особенность конструкции таких АЛ состоит в том, что система симметричной линзы имеет на верхней и нижней подложке по два независимо управляемых разделенных электрода, параллельных друг другу [33, 38]. Исследования проводились с АЛ, содержащей отверстия диаметром 300 мкм, при толщине слоя ЖК 40 мкм. Измерительная установка содержала He-Ne лазер и CCD камеру, связанную с поляризационным микроскопом. При подаче напряжения, равного 16 В на одну пару электродов и 14,5 В на другую пару, наблюдался сдвиг сфокусированного пучка на 2,7 мкм в плоскости фокусировки. Этот эффект можно использовать в оптических системах связи.

### *Адаптивная линза для объемного дисплея*

В работе [68] описано применение линзы с изменяемым фокусным расстоянием на основе ЖК с двухчастотным режимом управления (рис. 11.14). Пунктиром показано изменение положения изображения при изменении фокусного расстояния [68]. Оптическая сила линзы может изменяться в диапазоне от  $-1,2$  до  $+1,5$  диоптрии. Двухчастотное управление ЖК позволяет формировать изображения в различных сечениях с частотой 60 Гц во избежание мелькания создаваемого изображения. Данная система позволяет получать объемное изображение диаметром 250 мм в угловом поле зрения  $20^\circ$ .

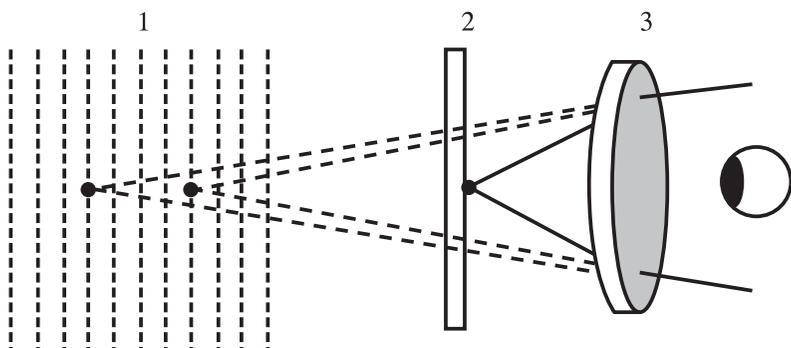


Рис. 11.14. Объемный дисплей, содержащий адаптивную линзу и плоский дисплей: 1 — положения изображения; 2 — плоский дисплей; 3 — адаптивная линза

#### *Дифракционная линза Френеля на жидких кристаллах для бифокальных очков*

Дифракционная линза использует зоны Френеля для обеспечения дифракции света. В работе [69] предложена линза Френеля, содержащая слой НЖК, для управления фокусным расстоянием, осуществляемого электрическим полем за счет изменения двулучепреломления (рис. 11.15). Слой нематика размещен между подложками с прозрачными электродами (рис. 11.15а). Электроды на подложках выполнены в виде колец (рис. 11.15б, в). Гомогенная ориентация достигается натиранием ориентирующего слоя (ПВА). Коэффициент преломления необыкновенного луча изменяется при переориентации молекул ЖК под действием электрического поля. Фазовый профиль по сечению линзы определяется величиной напряжения, приложенного к электродам, и дифракционной эффективностью, являющейся важнейшим параметром дифракционной линзы. Для уменьшения фазовых искажений на границе электродов было предложено использовать двухслойные электроды (рис. 11.15в), разделенные изолирующим слоем  $\text{SiO}_2$ .

Было показано, что адаптивная дифракционная линза позволяет эффективно осуществлять коррекцию зрения [69–72]. На рис. 11.16 показаны результаты использования дифракционной линзы в оптической схеме, содержащей модель глаза. В выключенном состоянии

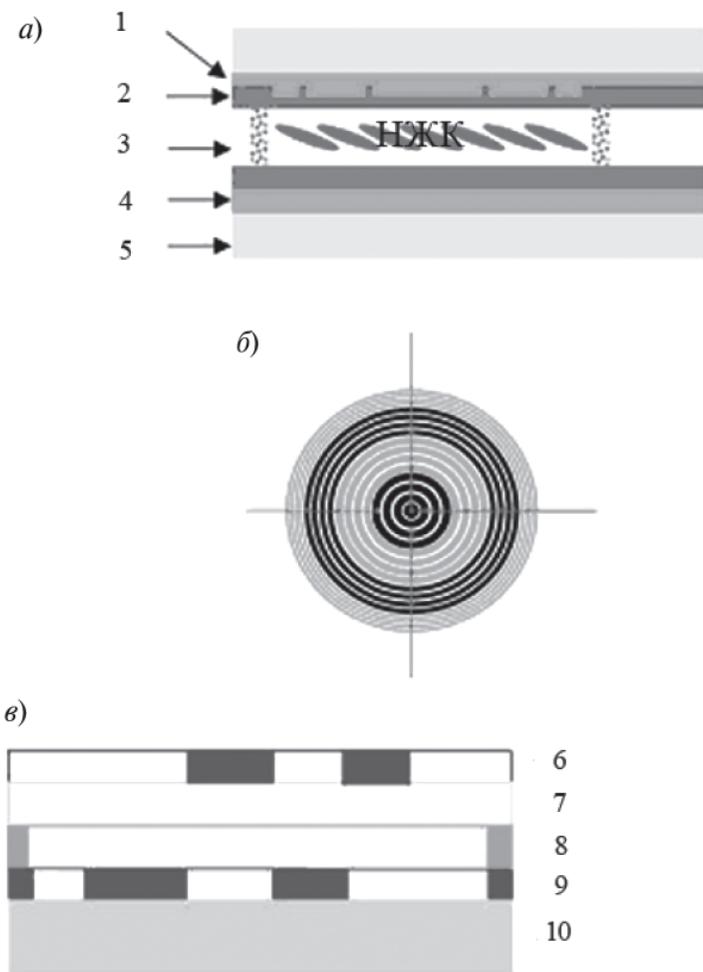


Рис. 11.15. Адаптивная жидкокристаллическая дифракционная линза: а) структура линзы: 1 — электроды; 2 — ориентирующий слой; 3 — спейсер; 4 — общий электрод; 5 — подложка; б) расположение одного слоя электродов; смежные электроды окрашены в разные цвета; каждая шина соединена с одним электродом в каждой зоне; в) структура двухслойного электрода: 6 — четные кольца ITO; 7 — слой  $\text{SiO}_2$ ; 8 — слой хрома; 9 — нечетные кольца ITO; 10 — подложка

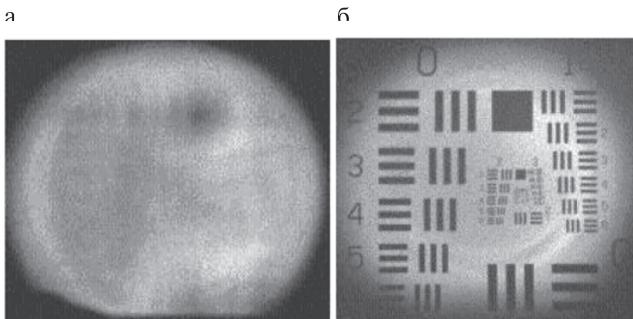


Рис. 11.16. а) в выключенном состоянии дифракционной линзы изображение не сфокусировано; б) во включенном состоянии — сфокусировано

линзы изображение не сфокусировано (рис. 11.16а). При подаче напряжения на дифракционную линзу изображение оказывается резким (рис. 11.16б). При дальнорукости при включенной линзе можно наблюдать объект на расстоянии наилучшего зрения; когда напряжение выключено — объект наблюдается на большем расстоянии. Дифракционная линза на НЖК использует поляризованный свет. В случае неполяризованного света необходимо иметь две ЖК линзы с ортогональной ориентацией. Для уменьшения aberrаций эти линзы должны быть как можно тоньше.

Максимальная дифракционная эффективность составила 90% для 8-профильной конфигурации линзы Френеля [69]. Оптическая сила

линзы в зависимости от приложенного напряжения может быть положительной или отрицательной. Адаптивные ЖК линзы Френеля для бифокальных очков производятся фирмой Pixel Optics (рис. 11.17) [70–72].

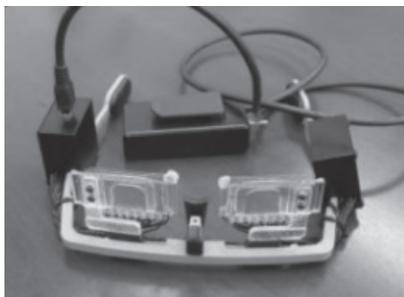


Рис. 11.17. Прототип бифокальных очков разработки фирмы Pixel Optic

Очки предназначены для компенсации дальнорукости, от которой страдает 93% населения старше 45 лет. Для этих целей использованы дифракционные линзы, содержащие

слой НЖК толщиной 5 мкм. При приложении электрического поля к слою НЖК происходит изменение оптической силы линзы на величину 2 диоптрии. Управляющее напряжение — менее 2 В, время отклика — менее 1 с.

#### *Адаптивная контактная линза*

При использовании очков разрешающую способность можно повысить устранением аберраций линз. Компенсация аберраций высшего порядка возможна, если корректирующий элемент оптически сопряжен с очковой линзой. В работах [73–76] предложено использовать ЖК корректор в виде адаптивной контактной линзы, имплантированной в глаз. Это решает проблему оптического сопряжения и в перспективе позволяет компенсировать аберрации непосредственно в глазу. На рис. 11.18 показана адаптивная линза с проводным управлением, а на рис. 11.19 и 11.20 — с беспроводным управлением.

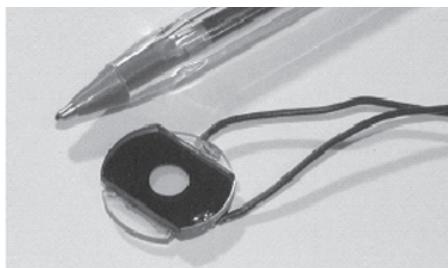


Рис. 11.18. Адаптивная линза с проводным управлением

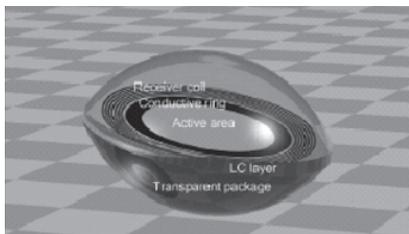


Рис. 11.19. Адаптивная ЖК линза с беспроводным управлением

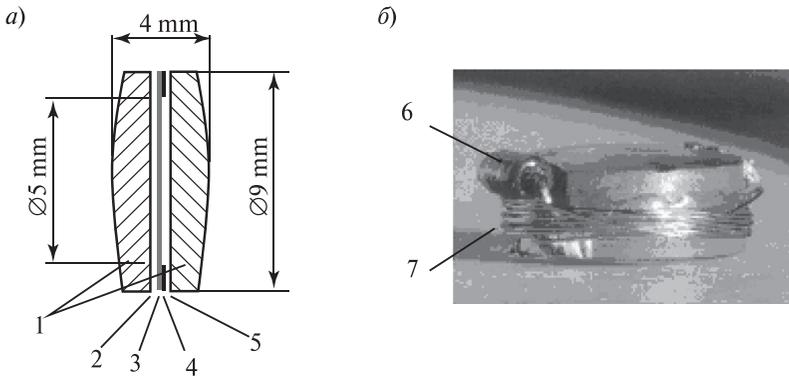


Рис. 11.20. Адаптивная ЖК линза с беспроводным управлением: а) поперечное сечение модального ЖК корректора: 1 — стеклянные подложки, 2 — низкоомный слой ИТО; 3 — слой ЖК; 4 — контакт; 5 — высокоомный слой ИТО; б) фотография линзы: 6 — диод; 7 — антенна

При использовании контактной линзы диаметром 5 мм показана возможность электростатического управления при изменении глубины аккомодации от бесконечности до 30 см, что открывает перспективы динамической коррекции aberrаций высшего порядка для человеческого глаза. АЛ можно использовать и для изменения преломляющей способности глаза. Л. Тибос и А. Брэдли из Калифорнии создали пространственный модулятор света, содержащий 127 ЖК ячеек и расположенный во входном зрачке глаза [77]. Эти ячейки позволяют по программе осуществлять изменения преломления призматического (0,8 диоптр.), сферического (1,5 диоптр.) характера и астигматизма в сечении зрачка диаметром 3 мм. Субдискретизация может быть фактором, ограничивающим диапазон изменения преломления.

Применение АЛ в оптических системах не ограничивается приведенными примерами. Новым является их использование в качестве оптических пинцетов и ловушек при работе с малыми объектами в объемных средах [78].

## 11.2. Фазовые корректоры

Важной проблемой повышения качества изображений, создаваемых оптическими системами, является устранение aberrаций. Вы-

зывая искажения волнового фронта, они приводят к уменьшению разрешающей способности и световой эффективности оптических устройств. Причинами этих аберраций являются несовершенства оптических элементов и влияние внешних условий, таких как, например, турбулентность атмосферы и термические эффекты.

В отображающих системах с большой апертурой и высоким разрешением и лазерных системах, чувствительных к энергетическим потерям, даже при совершенствовании конструкции, птери могут быть существенными. В этих случаях компенсация аберраций является одной из актуальных задач адаптивной оптики [79–81].

Системы адаптивной оптики состоят из двух основных частей: первая осуществляет измерение аберраций и подает управляющий сигнал на вторую часть, осуществляющую их компенсацию. Измерительная часть содержит элемент, чувствительный к форме фронта световой волны, например, датчик волнового фронта Хартмана-Шака. Компенсирующая часть обычно содержит перестраиваемый оптический элемент с обратной связью, например, деформируемое зеркало или ЖК ПМС [82, 83].

Хотя концепция адаптивной оптики (АО) была сформулирована в 1953 г. Г. Бабкоком [82], первые адаптивные системы были созданы только в конце 60-х годов в обсерватории Халеакала на Гавайях. Наиболее динамичное развитие этого направления относится к 70–80-м годам, когда были разработаны теоретические основы АО и получены важные теоретические результаты в обсерваториях [84–86]. За последние десятилетия цена адаптивных систем существенно снизилась, а разработки силиконовых микромеханических зеркал, жидкокристаллических фазовых корректоров и ССД датчиков волнового фронта Хартмана-Шака привели к новым применениям АО в науке, промышленности и медицине. Все это стимулировало развитие офтальмологии, конфокальной микроскопии, сверхкоротких импульсных лазеров и машинного зрения [87]. Компенсация аберраций особенно актуальна в астрономии и офтальмологии.

Значительная роль в развитии этих направлений принадлежит жидкокристаллическим элементам [88–91]. Жидкокристаллические фазовые модуляторы являются альтернативой деформируемым зеркалам для формирования фронта световой волны и его коррекции [88]. Их главное достижение состоит в возможности обеспечения воспроизводимой локально изменяющейся фазовой задержки. При этом они сохраняют преимущества, присущие жидкокристаллическим устройствам, — низкое управляющее напряжение, отсутствие

дифракции и невысокую стоимость. Основными недостатками являются низкое быстродействие и возможные цветовые искажения при использовании полихроматического излучения.

### 11.2.1. ПМС на ЖК для оптической компенсации aberrаций в астрономии

При наблюдении удаленных объектов с помощью телескопа их изображение может искажаться. В частности, световая волна, проходя через атмосферу, испытывает воздействие флуктуаций плотности из-за турбулентности, что вызывает искажение волнового фронта и ухудшение изображения (рис. 11.21а). Для компенсации искажения волнового фронта используются датчик волнового фронта и фазовый корректор, компенсирующий искажения волнового фронта. Координация работы этих элементов осуществляется компьютером (рис. 11.21б). Поскольку искажения волнового фронта меняются со временем, система должна производить измерения и осуществлять коррекцию несколько сотен раз в секунду.

Ключевым понятием адаптивной оптики является волновой фронт. При распространении монохроматического света вектор электрического поля может быть представлен в форме

$$E(r, t) = E(r)e^{i(kr + \varepsilon(r))}e^{-i\omega t}, \quad (11.9)$$

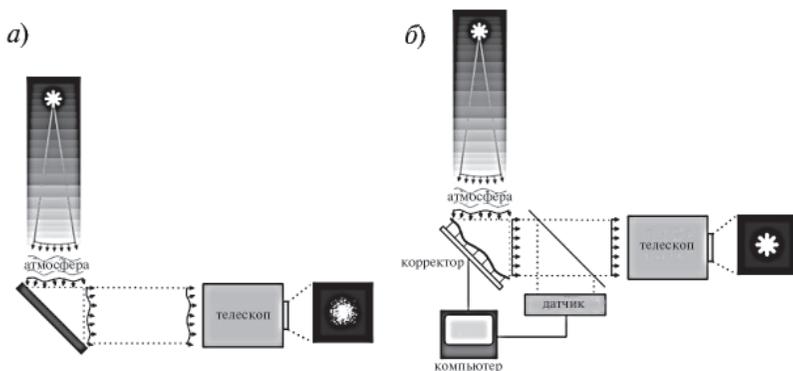


Рис. 11.21. а — ухудшенное изображение объекта за счет искажения волнового фронта при наличии турбулентности атмосферы; б — улучшенное изображение, создаваемое адаптивной оптической системой [82]

где  $k$ -волновой вектор, направленный перпендикулярно электрическому полю и равный  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\omega$  — угловая частота,  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  — амплитуда;  $\varphi(\mathbf{r}) = k\mathbf{r} + \varepsilon(\mathbf{r})$  — фаза волны. Плоскость, содержащая все точки одинаковой фазы, называется волновым фронтом. Она описывается выражением  $\varphi(\mathbf{r}) = \varphi_0$ , где  $\varphi_0$  — постоянная величина.

Формой волнового фронта можно управлять, изменяя оптический фазовый профиль. Основным принципом, используемым для этого, является фазовое сопряжение, означающее, что корректирующий фазовый профиль должен быть оптически сопряжен с измеренными фазовыми аберрациями. Коррекция сопряженным фазовым профилем состоит в обеспечении идеально плоского волнового фронта, как это показано на рис. 11.21б. Если волновой фронт не может быть точно определен или воспроизведен оптической системой, или дифракционные эффекты являются определяющими, то фазовое сопряжение не может быть осуществлено с необходимой точностью. Принцип работы устройств фазовой модуляции основан на определении оптической фазовой задержки  $\Delta\Phi = n\Delta z$ , где  $n$  — показатель преломления,  $\Delta z$  — расстояние, на которое перемещается волна.  $\Delta\Phi$  связано с фазой  $\varphi$  соотношением  $\varphi = 2\pi\Delta\Phi/\lambda$ .

Деформируемые зеркала, являющиеся основными элементами для коррекции волнового фронта, изменяют  $\Delta z$ , управляя отраженной модой. Жидкокристаллические фазовые модуляторы, работающие в режиме на просвет или отражение, представляют собой недорогую альтернативу механически управляемым зеркалам. Их работа основана на модуляции показателя преломления слоя ЖК под действием приложенного электрического поля (электрически управляемые) или оптического сигнала (оптически управляемые).

Электрически управляемые корректоры волнового фронта разделяют на два типа в зависимости от характера компенсации: зональные и модальные. Зональные корректоры как сегментные клапаны и локально деформируемые зеркала позволяют осуществлять индивидуальное изменение фазы в зоне нескольких апертур, осуществляя пошаговую фазовую компенсацию. Модальные корректоры, в отличие от зональных, обеспечивают плавное, непрерывное изменение фазового профиля.

В настоящее время изготавливаются ЖК корректоры в виде отдельных пикселей, работа которых аналогична зеркальным сегментным клапанам. Далее рассмотрены фазовые корректоры, работающие в статическом режиме. Различают три модификации жидкокристаллических корректоров [92]: модальные корректоры на основе делителя на-

пряжения; гибридные корректоры на основе кремния и модальные корректоры с толстой диэлектрической подложкой.

#### *Модальные корректоры на основе делителя напряжения*

Модальные корректоры были предложены А.Ф. Наумовым в 1993 г. [92]; экспериментальные результаты и технология их изготовления приведены в работах [93, 94]. Схема отражательного многоканального жидкокристаллического модального корректора волнового фронта (LC-MWC) показаны на рис. 11.22а. Модальные корректоры, обеспечивающие плавное, непрерывное изменение фазового профиля, основаны на использовании высокоомного слоя, введенного в стандартную ЖК ячейку. Этот слой играет определяющую роль в формировании локального профиля напряжения, которое управляет распределением фазы по апертуре. Этот слой является управляющим электродом (УЭ). Корректор управляется с помощью переменного напряжения, прикладываемого к точечным контактам УЭ (рис. 11.22б), что обеспечивает плавное изменение напряжение по апертуре. Для обеспечения изменения двулучепреломления по апертуре был использован S-эффект в НЖК.

Эквивалентная электрическая схема корректора и блока управления показана на рис. 11.23.

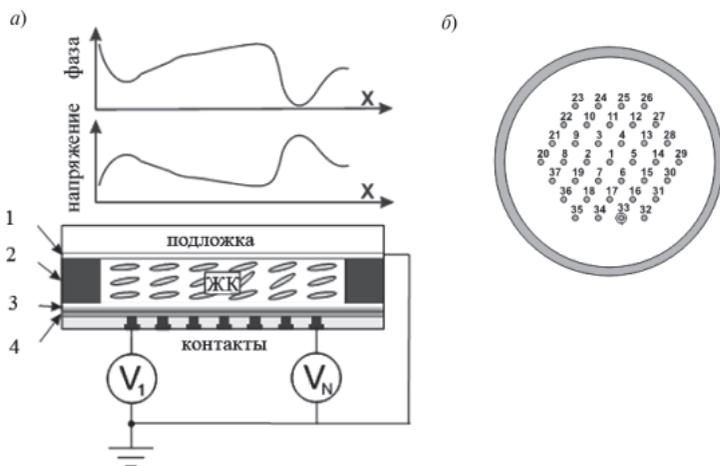


Рис. 11.22. а) схема резистивного модального корректора волнового фронта (LC-MWC): 1 — слой ITO; 2 — спейсер; 3 — диэлектрическое зеркало; 4 — управляющий электрод; б) структура нижней подложки 37-канального корректора с гексагональным расположением контактов [93]

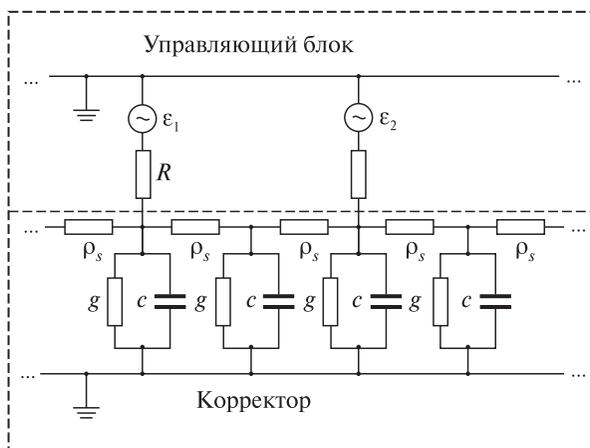


Рис. 11.23. Эквивалентная электрическая схема LC-MWC [93]

Зависимость фазовой задержки, создаваемой ЖК слоем корректора для отраженной волны, была измерена и рассчитана в рамках теории Эриксона-Лесли, что позволило оптимизировать режимы работы корректора. На рис. 11.24 приведен пример использования 37-канального LC-MWC с толщиной слоя ЖК 25 мкм для коррекции волнового фронта. Это позволило уменьшить aberrации с  $0,531$  до  $0,200 \lambda$ .

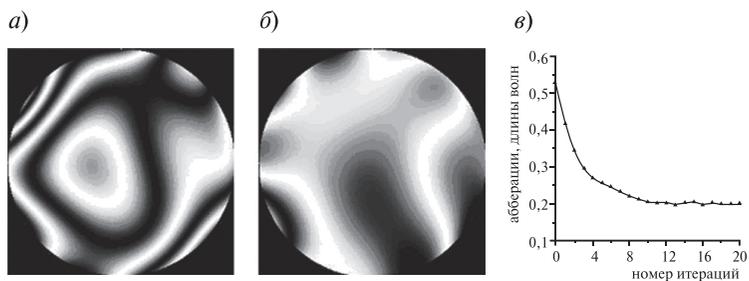


Рис. 11.24. Результаты использования 37-канального LC-MWC с обратной связью. Картины волнового фронта: а — до коррекции; б — после коррекции; в — среднеквадратичные aberrации как функция числа итераций [93]

Использование более тонких слоев ЖК позволяет получить времена коррекции порядка сотен миллисекунд. Недостатком LC-MWC корректоров является возникновение высокочастотных пространственных аберраций, что ограничивает их применение в адаптивных оптических системах. Другим их недостатком является высокая стоимость и сложность изготовления. Это привело к разработке альтернативных технологий на основе кремния.

#### *Гибридные корректоры на основе кремния*

Использование кремниевых технологий для фазовых корректоров волнового фронта на ЖК позволяет снизить их стоимость. При этом были введены некоторые изменения в стандартную кремниевую технологию [94–96]. Непрерывный резистивный слой был заменен матрицей дискретных резисторов и пикселями, соединенными в сеть (рис. 11.25). Управляющее напряжение прикладывается только к некоторым пикселям, называемым активными; остальные пиксели — пассивные. Сеть резисторов обеспечивает плавное изменение напряжения между пикселями. Этот тип корректоров является гибридным (LC-HWC), так как представляет собой комбинацию и зональных и модалных устройств.

Для оптимизации параметров LC-HWC был проведен численный расчет и выполнены экспериментальные исследования устройства, представленного на рис. 11.26 [97]. Подача прямоугольных импульсов с амплитудой напряжения от 2,5 до 4,5 В и частотой 1 кГц на активные пиксели показала, что изменение фазы при использовании матрицы пикселей носит модалный характер. Интерференционные картины, создаваемые ЖК слоем в окрестности пикселей, имели низкий контраст вследствие рассеяния света, вызванного несовершенством ориентации слоя ЖК. Улучшение качества поверхности пикселей может устранить этот недостаток. Рассмотренный гибридный корректор работает только на отражение, что ограничивает его применение.

В работе [98] сообщается о создании электрически управляемого жидкокристаллического устройства на кремнии, содержащего  $512 \times 714$  пикселей. Он предназначен для систем оптической памяти, однако может использоваться и как фазовый корректор с высоким пространственным разрешением, но с ограничением по частоте (50 Гц). Использование жидкокристаллических материалов с меньшей вязкостью позволяет увеличить частоту работы корректора до 250 Гц.

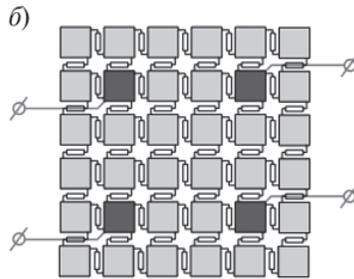
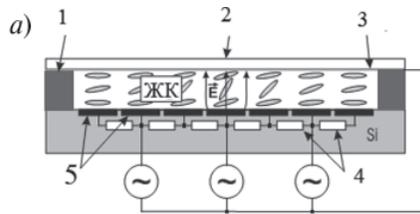


Рис. 11.25. Сечение (а) и структура пикселей (б) гибридного корректора волнового фронта; активные пиксели окрашены в темно-серый цвет; 1 — спейсер; 2 — стеклянная подложка; 3 — ITO; 4 — резисторы; 5 — пиксели

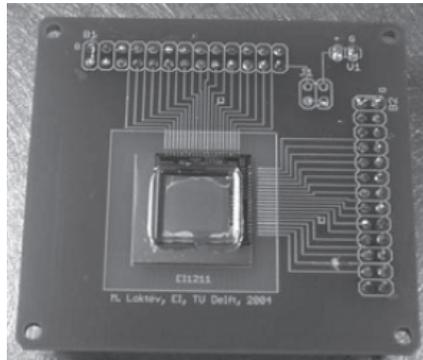


Рис. 11.26. 36-канальный LC-HWC [97]

### Модальные корректоры с толстой диэлектрической подложкой

Для реализации режимов работы на просвет и отражение были предложены модальные корректоры с толстой диэлектрической подложкой [99]. Работа этого устройства основана на распределении электрического поля в толстой диэлектрической подложке с большой диэлектрической проницаемостью (рис. 11.27). Использование такой подложки приводит к расширению области электрического поля по сравнению с полем вблизи электрода. В качестве диэлектрика было предложено использовать керамику с величиной  $\epsilon$  порядка 20000. Результаты проведенного расчета распределения электрического поля и фазовой задержки в ЖК слое при наличии толстой диэлектрической подложки приведены на рис. 11.27.

Схема 19-канального ЖК корректора и устройство управления показаны на рис. 11.28. Использовалась керамическая подложка квадратной формы с поверхностью, отполированной до плоскостности  $\lambda/4$  для  $\lambda = 633$  нм. На нее нанесено многослойное диэлектрическое зеркало, оптимизированное на максимальное отражение для  $\lambda = 633$  нм. Был использован планарно ориентированный слой НЖК толщиной 25 мкм. Максимальное изменение фазы этим модулято-

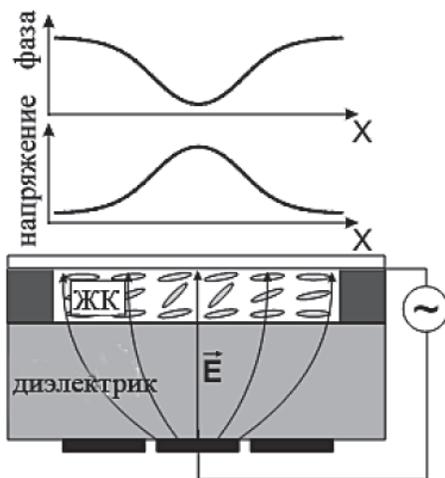


Рис. 11.27. Характер распределения электрического поля и фазовой задержки в модальном LC-MWC с толстой диэлектрической подложкой [97]

ром составило около  $22 \lambda$ . Для работы корректора использовались меандры с амплитудным напряжением 150 В и частотой до 5 кГц. Было исследовано влияние количества электродов и режимов управления на характер фазовой задержки. Достоинством LC-MWC с керамической подложкой явилось устранение aberrаций с высокой пространственной частотой.

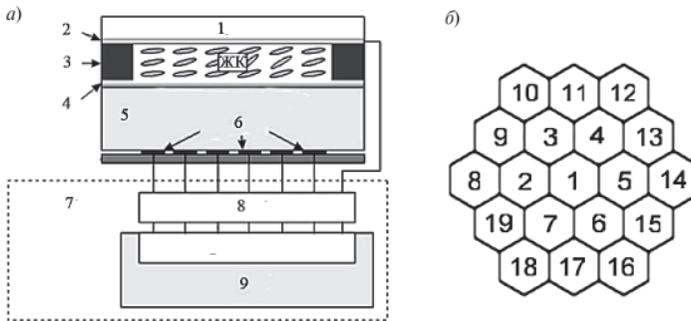


Рис. 11.28. а) схема 19-канального LC-MWC с керамической подложкой: 1 — стеклянная подложка; 2 — ИТО; 3 — спейсер; 4 — диэлектрическое зеркало; 5 — диэлектрическая подложка; 6 — контакты; 7 — блок управления; 8 — блок усилителей; 9 — компьютер; б) расположение и нумерация электродов [99]

Корректоры LC-MWC с керамической подложкой показали лучшие результаты в коррекции статических и слабо изменяющихся фазовых aberrаций.

Большой интерес представляют адаптивные системы, осуществляющие модуляцию фазы неполяризованного света. Это можно осуществить двумя способами. Первый основан на использовании двух ячеек, оптические оси которых ортогональны. Второй основан на использовании пластинки  $\lambda/4$ , расположенной между слоем ЖК и зеркалом [98, 100]. В этой схеме происходит изменение фазы света только одной поляризации. Свет, проходя через пластинку  $\lambda/4$ , отражается от зеркала и снова проходит через эту пластинку, что вызывает поворот поляризации света на  $90^\circ$ . Затем он снова проходит через ЖК слой, и в этом случае ортогональная компонента будет испытывать фазовую задержку. Были созданы устройства с большой апертурой ( $14 \text{ см}^2$ , число корректирующих элементов  $128 \times 128$ ) [81].

В работе [101] проведен анализ нового метода визуализации фазы, использующего нелинейный фильтр Цернике, основанный на оптически управляемом жидкокристаллическом фазовом модуляторе. Возможные применения этого метода для высокоразрешающего адаптивного контроля волнового фронта описаны в работе [102]. Время отклика устройства с использованием НЖК примерно 10 мс. Использование С\*ЖК позволило получить время отклика приемника порядка 0,2 мс для интенсивности света 100 нВт [103].

### *11.2.2. ПМС на ЖК для оптической компенсации аберраций в офтальмологии*

Адаптивная оптика применительно к проблемам зрения человека имеет две области применения: формирование изображений высокого пространственного разрешения на сетчатке и обеспечение на ней изображений с компенсированными аберрациями. Кроме того, адаптивная оптика может изменять аберрации в глазу для выполнения экспериментов по изучению функций зрения [104–106].

Компактная адаптивная оптическая система на основе ЖК ПМС для измерения и компенсации оптических аберраций, обеспечивающая большую глубину модуляции и примерно постоянное светопропускание, предложена в работах [104–108]. Схема адаптивной системы показана на рис. 11.29.

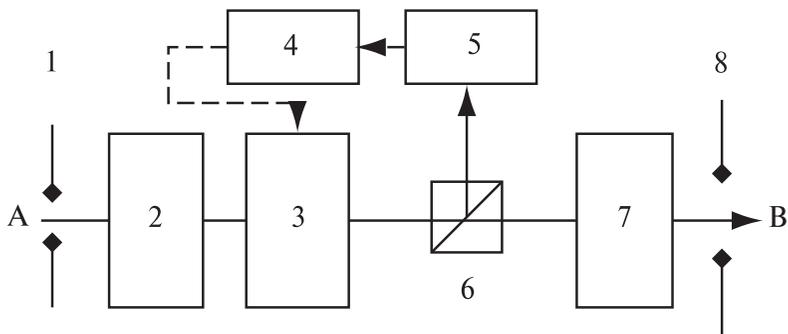


Рис. 11.29. Схема адаптивной системы для измерения и компенсации оптических аберраций [87]: 1 — входной зрачок; 2 — передающий оптический модуль; 3 — ПМС; 4 — персональный компьютер; 5 — CCD-камера; 6 — расщепитель лучей; 7 — передающий оптический модуль; 8 — выходной зрачок

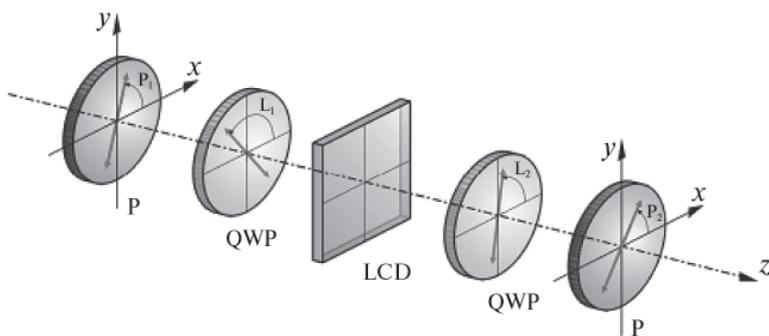


Рис. 11.30. Схема экспериментальной установки, обеспечивающей только фазовую модуляцию твистовым ЖКД: P-поляризаторы, QWP-четверть волновые пластинки. L1 и L2 — углы «медленной» оси четверть волновой пластинки относительно оси x

Главным элементом системы является ЖК ПМС, через который проходит корректируемый световой пучок. Функции ПМС выполняет твистовый ЖКД, пиксели которого представляют собой массив дифракционных микролинз [109]. Световые сигналы, проходящие через массив микролинз, фокусируются и регистрируются CCD-камерой. Изображения фокальных точек обрабатываются по специальной программе компьютером, определяющей их положение относительно эталона. Из этих данных определяются aberrации, что позволяет перейти к их компенсации. В случае изменения aberrаций во времени, эта операция повторяется столько раз, сколько требуется. Оптический модуль 2 осуществляет проецирование входного зрачка системы на ЖКД, а модуль 7 — проецирование ЖКД на выходной зрачок, обеспечивая оптимальное разрешение системы. Время обработки в экспериментах составляло величину около 30 мс. Был использован твистовый ЖКД фирмы «Сони» с числом пикселей  $832 \times 624$  и размером каждого  $26,7 \times 21,3$  мкм<sup>2</sup>, обеспечивающей только фазовую модуляцию [110, 111]. Оптимальная величина фазовой модуляции достигалась за счет использования двух линейных поляризаторов P1 и P2 и четверть волновой пластинки QWP1 и QWP2 (рис. 11.30).

В качестве источника использовался светодиод с излучением на длине волны  $530 \text{ нм} \pm 17 \text{ нм}$ . Установка обеспечивала глубину модуляции примерно  $3\pi/2$  рад. Входной сигнал, содержащий aberrации,

имитирующие aberrации человеческого глаза, создавался фоторезистивной пластинкой, увеличивающей расфокусировку изображения. Используемый в эксперименте массив  $9 \times 9$  микролинз размером  $560 \text{ мкм}$  и фокусным расстоянием  $4,2 \text{ см}$  на длине волны  $530 \text{ нм}$  приведен на рис. 11.31 (слева). На рис. 11.31 (справа) приведена картина фазовой задержки искусственного глаза, предназначенная для компенсации aberrаций. Результаты измерения и компенсации aberrаций сигналов, представляющих собой сфокусированные в точку лучи, прошедшие микролинзы, для трех последовательных этапов приведены на рис. 11.32.

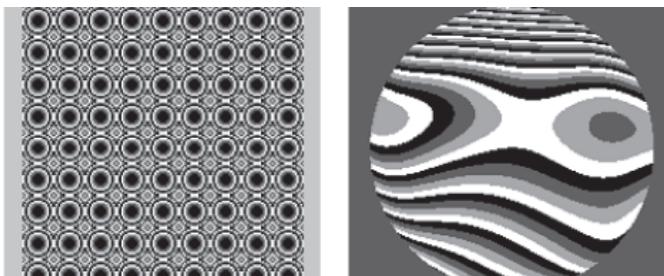


Рис. 11.31. Слева: твистовый ЖКД, создающий массив  $9 \times 9$  микролинз. Справа: картина фазовой задержки искусственного глаза, предназначенная для компенсации aberrаций

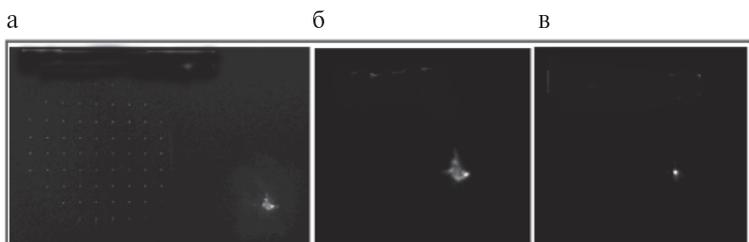


Рис. 11.32. Изображения, записанные CCD камерой, на стадиях измерения и коррекции aberrаций: а — сфокусированные в точку лучи от микролинз (слева) и сигнал от светодиода (справа) в фокальной плоскости микролинз; б — сигнал от светодиода, прошедший через микролинзы, с aberrациями; в — сигнал от светодиода, прошедший через микролинзы, с компенсированными aberrациями

Изображения на рис. 11.32 а получены на этапе измерения и представляют собой сфокусированные в точку лучи от микролинз (слева) и сигнал от светодиода (справа). Увеличенное изображение сигнала от светодиода при его прохождении через ПМС в не активированном состоянии показано на рис. 11.32б. Изображение, полученное при прохождении сигнала через активированный ПМС, создающий вычисленные с помощью компьютера аберрации противоположного знака, приведено на рис. 11.32 в.

Резкое уменьшение аберраций, вызванное воздействием ПМС, хорошо видно. Главным достоинством рассмотренной установки является ее многофункциональность использования, низкая стоимость, гибкая адресация и интеграция с разработанными для оптоэлектроники компьютерными программами.

### Литература к главе 11

1. *Невская Г.Е., Томилин М.Г.* Адаптивные линзы на основе жидких кристаллов // Опт. журн. 2008. Т. 75. № 9. С. 35–48.
2. *Berreman D.W.* Variable focus LC lens system. US patent. 1980. № 4. 190, 330.
3. *Sato S.* LC lens-cell with variable focal length // Jp. Journ. of Appl. Phys. 1979. Vol. 18. P. 1679–1684.
4. *Kowel S.T., Cleverly D.S.* // in Processing of NASA conference «Optical Information Processing for Aerospace Applications». 1981. P. 329–340.
5. *Riza N.A., DeJule M.C.* 3-terminal adaptive NLC lens device // Optics letters. 1994. Vol. 19. P. 1013–1015.
6. *Chan M.C., Kowel S.T.* Imaging performance of the LC adaptive lens with conductive ladder meshing // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. P. 8958–8969.
7. *Nose T., Sato S.* A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field // Liquid Crystals, 1989. Vol. 5. № 5. P. 1425–1433.
8. *Nose T., Sato S.* Optical properties of liquid crystal microlens // Reprinted from Inter. Conf. Optoelectr. Science and Engineering. 1990. SPIE. Vol. 1230. P. 17–20.
9. *Williams G., Powell N.J., Purvis A., Clark M.G.* Electrically controllable LC Fresnel lens // Proc. of SPIE. 1989. Vol. 1168. P. 352–359.
10. *Fowler C.W., Pateras E.S.* LC lens review // Ophthalmic and Physiological Optics. 1990. Vol. 10. P. 186–194.
11. *Гвоздарев А.Ю., Юдин И.Б., Невская Г.Е., Юдин Б.И.* Расчет деформации директора в аксиально-симметричном электрическом поле ЖК микролинзы // Труды IV Межд. конф. АПЭП-98. 1998. Т. 6. С. 17–22.
12. *Scharf T., Fontannaz J., Bouvier M.* et al. An adaptive microlens formed by homeotropic aligned LC with positive dielectric anisotropy // MCLC. 1999. Vol. 331. P. 235–243.

13. *Ye M., Sato S.* Dynamic director's behavior in LC microlens // MCLC, 2000. Vol. 368. P. 113–120.
14. *Yanase S., Ouchi K., Sato S.* Molecular orientation analysis of design concept for optical properties of LC microlenses // Jpn. J. Appl. Phys. 2001. Vol. 40. Part 1. № 11. P. 6514–6521.
15. *Honma M., Nose T., Sato S.* Improvement of aberration properties of LC microlenses using the stacked electrode structure // Jpn. J. Appl. Phys., 2001. Vol. 40. Part 1. № 3A. P. 1322–1327.
16. *Naumov A.F., Loktev M.J., Guralnik I.R.* et al. Modal LC adaptive lenses // Preprint № 36. General Phys. Inst. of Russian Academy of Sciences. 1998. 28 p.
17. *Вдовин Г.В., Гуральник И.П., Котова С.П.* и др. Жидкокристаллические линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием. I. Теория // Квантовая электроника, 1999. Т. 26. № 3. С. 256–260.
18. *Вдовин Г.В., Гуральник И.П., Котова С.П.* и др. Жидкокристаллические линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием. II. Численная оптимизация и эксперимент // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 3. С. 261–264.
19. *Гуральник И.П., Самаргин С.А.* Электрофизические и оптические свойства жидкокристаллических линз с оптическим управлением // Квантовая электроника. 2004. Т. 434. С. 673–678.
20. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Nematic deformation in homeotropically aligned liquid crystal microlens and its optical properties // MCLC. 2001. Vol. 4. P. 364–368.
21. *Гвоздарев А.Ю., Невская Г.Е.* Оптические характеристики ЖК микролинз с гомеотропной ориентацией // Опт. журн. 2001. Т. 68. № 9. С. 61–65.
22. *Ye M., Sato S.* Transient properties of a LC microlens // Jpn. Appl. Phys. 2001. Vol. 40. Pt. 1. № 10. P. 6012–6018.
23. *Nose T., Sato S.* Application of a LC microlens to an optical fiber switch // Electr. and Commun. in Japan, 1992. Part 2. Vol. 75-C-1. № 3. P. 155–163.
24. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Optical properties of homogeneously — and hybrid-aligned LC microlenses // MCLC. 1999. Vol. 329. P. 81–89.
25. *Гвоздарев А.Ю., Невская Г.Е.* Перестраиваемые ЖК микролинзы с планарной и гомеопланарной ориентацией // Опт. журн. 2001. Т. 68. № 9. С. 55–60.
26. *Морозов А.В.* Исследование электрооптических свойств мультидоменных ЖК структур, полученных с использованием поверхностно-активных веществ. Автореферат канд. диссер. 2005.
27. *Scharf T., Kipfer P., Bouvier M., Grupp J.* Diffraction limited LC microlenses with planar alignment // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. P. 6629–6636.
28. *Nose T., Masuda S., Sato S.* Optical properties of a hybrid-aligned LC microlens // MCLC. 1991. Vol. 199. P. 27–39.
29. *Nevskaya G.E., Gvozdev A.* Analysis of phase retardation profiles in LC-microlenses with different nematic alignment // Proceed. of the 4-th Korea-Russia Int. Symp. on science and technology, 2000. Part 1. P. 126–130.

30. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Comparison of electrooptical properties of asymmetrical LC microlenses // MCLC. 2001. Vol. 4. P. 358–363.
31. *Gvozdev A., Nevskaya G.E.* Optical properties of homeotropical aligned LC microlens // MCLC. 1997. Vol. 304. P. 423–429.
32. *Nose T., Masuda S., Sato S.* Optical properties of a hybrid-aligned LC microlens with a symmetric electrode structure // Jpn. J. of Appl. Phys., 1991. Vol. 30. № 12 B. P. 2110–2112.
33. *Masuda S., Ito H., Nose T.* et al. Optical properties of a LC microlens with a deflection function // Photonics in Switching. Sendai. 1996. P. 21–25.
34. *Nose T., Masuda S., Sato S.* A liquid crystal microlens with hole-patterned electrodes on both substrates // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. Vol. 31. P. 1643–1646.
35. *Masuda S., Fulioka S., Honma M.* et al. Dependence of optical properties on device and material parameters in LC microlenses // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. Vol. 35. P. 4668–4672.
36. *Masuda S., Honma M., Nose T., Sato S.* Influence of elastic constants on the optical properties of liquid crystal microlenses // Jpn. J. Appl. Phys. 1997. Vol. 36. Part 1. № 5A. P. 2765–2770.
37. *Sato S., Nose T.* Improvement of optical properties and beam steering function in LC microlens with an extra controlling electrode by a planar structure // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. Part 1. № 11. P. 6383–6387.
38. *Masuda S., Takahashi S., Nose T.* et al. Liquid-crystal microlens with a beam-steering function // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. № 20. P. 4772–4778.
39. *Ye M., Honma M., Sato S.* Improvement of decay properties of a LC microlens with a divided electrode structure // Jpn. J. Appl. Phys., 1999. Vol. 38. Part 2, № 12A. P. 1412–1415.
40. *Nose T., Yamada J., Sato S.* Molecular orientation effect in LC cell using inhomogeneous electric field with extra controlling electrodes // MCLC. 2001. Vol. 368. P. 231–238.
41. *Honma M., Nose T., Sato S.* Enhancement of numerical aperture of LC microlenses using a stacked electrode structure // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. Vol. 39. Part 1. № 8. P. 4799–4802.
42. *Ye M., Sato S.* New liquid crystal lens // Proceed. of SPIE. 2002. Vol. 4926. P. 75–80.
43. *Lin Y.-H., Ren H., Fan-Chiang K.-H.* et al. Tunable-focus cylindrical LC lenses // Jpn. J. Appl., Phys. 2005. Vol. 44. № 1a. P. 243–244.
44. *Ye M., Sato S.* Liquid crystal lens of two LC layers // MCLC, 2004. Vol. 422. P. 197–207.
45. *Pisnyak O., Sato S., Lavrentovich O.* Electrically tunable lenses based on dual-frequency NLC // Appl. Optics. 2006. Vol. 4, № 45. P. 4576–4583.
46. *Choi Y., Park J.- H., Kim J.- H.* et al. Fabrication of switchable microlens arrays based on a LC // Lasers and Electro-Optics Society. 2001. LEOS 2001. The 14th Annual Meeting of the IEEE. Vol. 2. P. 618–619.
47. *Naumov A.F., Love G.D., Loktev M.Yu, Vladimirov F.L.* Control optimization of spherical modal LC lenses // Optics Express. 1999. Vol. 4. № 9. P. 344–352.

48. *Loktev M.Yu., Belopukhov V.N., Vladimirov F. L.* et.al. Wave front control systems based on modal LC lenses // *Rev. of Sci. Instr.* 2000. Vol. 71. № 9. P. 3290–3297.
49. *Guralnik I.R., Samagin S.A.* High-sensitivity optically addressed LC lens // *Proc. SPIE.* 2003. Vol. 5137. P. 194–200.
50. *Гуральник И.Р., Самагин С.А.* Сферическая жидкокристаллическая линза с оптическим управлением. Теория и эксперимент // *Квантовая электроника.* 2003. Т. 33. С. 430–434.
51. *Naumov A. F., Loktev M.Yu., Guralnik I. R., Vdovin G.* Liquid-crystal adaptive lenses with modal control // *Optics Letters.* 1998. Vol. 23. Issue 13. P. 992–994.
52. *Guralnik I.R., Samagin S.A.* Experimental implementation of the high-sensitivity LC lens with optically controlled focal length // *Proc.SPIE.* 2003. Vol. 4986. P. 673–680.
53. *Fan Y.H., Ren H., Wu S.T.* Electrically controlled lens and prism using nanoscale polymer-dispersed and polymer-networked LCs // *Proc. SPIE.* 2004. Vol. 5289. P. 63–73.
54. *Presnyakov V.V., Asatryan K.E., Galstyan T.V., Torg A.* Polymer stabilized LCs for tunable microlens application // *Opt. Express.* 2002. Vol. 10. P. 865–870.
55. *Presnyakov V.V., Galstyan T.V.* Variable focal length lens based on polymer stabilized NLCs // *MCLC.* 2004. Vol. 413. P. 435–441.
56. *Ren H., Wu S.T.* Tunable electronic lens using a gradient polymer network LC // *Appl.Phys. Letters.* 2003. Vol. 82. №1. P. 22–24.
57. *Fan Y.H., Ren H., Liang X.* et.al. LC microlens array with switchable positive and negative focal lengths // *J. Displ. Techn.* 2005. Vol. 1. P. 151–156.
58. *Ren H., Fan Y.H., Lin Y.-H.* et al. Tunable-focus microlens arrays using nanosize PDLC droplets // *Optics Commun.* 2005. Vol. 247. P. 101–106.
59. *Ren H., Lin YH, Wu ST.* Adaptive lenses using LC concentration redistribution // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 1911116.
60. *Brinkley P.F., Kowel S.T.* Liquid crystal adaptive lens: operation and aberration // *Proc. SPIE.* 1993. Vol. 1773. P. 449–458.
61. *Dai H.T., Liu Y. J., Wang X., Xu K.S.* Characteristics of LCoS phase-only SLM and its application // *Proc. of SPIE.* 2004. Vol. 280. P. 270–276.
62. *Stapert H.R., Versteegen E.J.K., del Valle S.* et al. Photo replicated anisotropic LC lenses for aberration control and dual layer read out of optical disks // *Philips Research Information.* 2002. 1p.
63. *Nose T., Sato S.* Application of LC microlens to an optical fiber switch // *Electronics and communications in Japan.* 1992. Part 2. Vol. 75. № 11. P. 1–10.
64. *Smith P.J., Taylor C.M., McCabe E.M.* et. al. Switchable fiber coupling using variable-focal-length microlenses // *Review of scientific instruments,* 2001. Vol. 72. № 7. P. 3132–3134.
65. *Smith F.J., McCabe E.M., Taylor C.M.* et al. Variable-focus microlenses as a potential technology for endoscopy // *Proceed. of SPIE.* 2000. Vol. 3919. P. 187–192.
66. *Грязнова М.В., Данилов В.В., Кузнецов Ю.А.* и др. Жидкокристаллические линзы в системе оптического ограничения // *Письма в ЖТФ.* 2001. Т. 27. Вып. 2. С. 24–29.

67. *Gryaznova M.V., Danilov V.V., Belyaeva M.A.* et al. Optical limiters based on LC microlens // *Optics and Spect.* 2002. Vol. 92. № 4. P. 614–618.
68. *Suyama S., Date M., Takada H.* Three-dimensional display system with dual-frequency LC varifocal lens // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. Vol. 39. P.480–484.
69. *Peyghambarian N., Li G., Mathine D., Valley P., Schwiegerling J., Honkanen S., Ayras P., Haddock J. N., Malalahalli G., Kippelen B.* Electro-optic adaptive lens as a new eyewear // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 454. P. 157–166.
70. *Li G., Mathine D.L., Valley P., Auras P., Haddock J.N., Giridhar M.S., Williby G., Schwiegerling J., Meredith G.R., Kippelen B., Honkanen S., Peyghambarian N.* Switchable electro-optic diffractive lens with high efficiency for ophthalmic applications // *PNAS.* 2006. Vol. 103. № 16. P. 6100–6104.
71. *Li G., Valley P., Giridhar M.S., Mathine D.L., Meredith G.R., Haddock J.N., Kippelen B., Peyghambarian N.* Large-aperture switchable thin diffractive lens with interleaved electrode patterns // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. P. 141120–3.
72. *Li G., Valley P., Auras P., Mathine D.L., Honkanen S., Peyghambarian N.* High-efficiency switchable flat diffractive ophthalmic lens with three-layer electrode pattern and two-layer via structures // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90. P. 111105–3.
73. *Vdovin G., Loktev M., Naumov A.* On the possibility of intraocular adaptive optics // *Optics express.* 2003. Vol. 11. № 7. P. 810–817.
74. *Vdovin G., Loktev M., Zhang X.* Adaptive Optics for Industry and Medicine // *Proceed. of the 4th International Workshop.* Мюнster. Germany. 2003. Oct. 19–24.
75. *Kotova S.P., Kvashin M.Y., Rakhmatulin M.A., Zayakin O.A., Guralnik I.R., Klimov N.A., Clark P., Love G.D., Naumov A.F., Saunter C.D., Loktev M.Y., Vdovin G.V., Toporkova L.V.* Modal LC wavefront correctors // *Opt. Express.* 2002. Vol. 10. P. 1258–1272.
76. *Simonov A.N., Vdovin G., Loktev M.* Liquid-crystal intraocular adaptive lens with wireless control // *Opt. Express.* 2007. Vol. 15. P. 7468–7478.
77. *Thibos L.N., Bradley A.* Use of liquid-crystal adaptive optics to alter the refractive state of the eye // *Optom. Vision Sci.* 1997. Vol. 74. P. 581–587.
78. *Hands P. J. W., Tatarikova S.A., Kirby A.K., and Love G. D.* Modal LC devices in optical tweezing 3D control and oscillating potential wells // *Optics Express,* 2006. Vol. 14, Issue 10. P. 4525–4537.
79. *Воронцов М.А., Шмалгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. М., Наука. 1985.
80. *Tyson R.K.* Principles of adaptive optics. 2<sup>nd</sup> edition. Boston. Academic Press. 1998.
81. *Restaino S.R.* On the use of LC for adaptive optics / In *Optical applications of LCs.* L.Vicari (ed.). Bristol, Philadelphia. Institute of Physics Publishing. 2003. P.128.
82. *Babcock H.W.* The possibility of compensating astronomical seeing // *Publication of the Astronomical Society of the Pasific.* 1953. Vol. 65. P. 229–236.

83. *Roggemann M.C., Welsh B.* Imaging through turbulence // CRC Press. Boca Raton. 1996.
84. *Lukin V.P.* Atmospheric adaptive optics // 2<sup>nd</sup> edition. SPIE Optical Engineering Press. Washington. 1995.
85. *Hardy J.W.* Adaptive optics for astronomical telescopes // Oxford University Press. Oxford. 1998.
86. Optical application of liquid crystals / Ed. by L. Vicary. Institute of Physics Publishing. Bristol and Philadelphia. 2003. 285 p.
87. *Vdovin G., Loktev M., Zhang X.* Adaptive Optics for Industry and Medicine. Proceed. of the 4th Intern. Workshop. Mьnster. Germany. Oct. 19–24, 2003.
88. *Love G.D.* Wave front correction and production of Zernike modes with a LC SLM // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. P. 1517–1524.
89. Adaptive optics in industry and medicine / Ed. by G.D. Love. World Scientific. Singapore. 2000.
90. *Vdovin G., Loktev M.* Deformable mirror with thermal actuators // Opt. Lett. 2002. Vol. 27. P. 677–679.
91. *Vdovin G., Loktev M., Simonov A., Kijko V., Volkov S.* Adaptive correction of human-eye aberrations in a subjective feedback loop // Opt. Lett. 2005. Vol. 30. P. 795–797.
92. *Наумов А.Ф.* Модальные корректоры волнового фронта // Труды ФИАН. 1993. Т. 217. С. 177–182.
93. *Naumov A.F., Vdovin G.V.* Multichannel LC based wavefront corrector with modal influence functions // Opt. Lett. 1998. Vol. 23. P. 1550–1552.
94. *Naumov A.F., Love G.D.* Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses // Opt. Express. 1999. Vol. 4. P. 344–352.
95. *Loktev M., Vdovin G., Sarro P.* Development of silicon-based modal LC wavefront corrector // Proceed. of SPIE. Photonics, Devices and Systems II. 2003. Vol. 5036. P. 558–564.
96. *Loktev M., Vdovin G., Sarro P.* Modal corrector integrated in silicon: possibilities for implementation // Proceed. of SPIE. Optics in atmospheric propagation and adaptive systems V. 2003. Vol. 4884. P. 196–205.
97. *Loktev M., Vdovin G., Nanver L.* Liquid crystal wavefront corrector on silicon // Proceed. of SPIE. Opto-Ireland 2005: Optoelectronics, photonic devices and optical networks. 2005. Vol. 5825. P. 195–202.
98. *Klimov N.A., Kotova S.P., Samagin S.A., Kvashnin M.Yu., Vdovin G.V., Loktev M.Yu.* Modal LC wavefront corrector on a ceramic substrate the single-contact approximation // Quant. Electr. 2007. Vol. 37. № 12. P. 1169–1175.
99. *Kotova S.P., Clark P., Guralnik I.R., Klimov N.A., Kvashin M.Y., Loktev M.Y., Love G.D., Naumov A.F., Rakhmatulin M.A., Saunter C.D., Vdovin G.V., Zayakin O.A.* Technology and electro-optical properties of modal LC wavefront correctors // Journ. of Opt. A: Pure and Appl. Opt. 2003. Vol. 5. S231–S238.
100. *Love G.D.* Liquid crystal modulator for unpolarized light // Appl. Opt. 1993. Vol. 32. P. 13.

101. *Vorontsov M.A., Justh E.W., Beresnev L.A.* Adaptive optics with advanced phase-contrast techniques. 1. High-resolution wave-front sensing // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2001. Vol. 18. № 5.
102. *Vorontsov M.A., Justh E.W., Beresnev L.A.* 2. High-resolution wave-front control // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2001. Vol. 18. № 5.
103. *Beresnev L.A., Vorontsov M.A., Gowens J.* Sub-millisecond phase contrast wavefront sensor based on OA FLC SLM // *SPIE.* 2001. Vol. 4493.
104. *Prieto P., Fernández E., Manzanera S., Artal P.* Adaptive optics with a programmable phase modulator: applications in the human eye // *Opt. Express.* 2004. Vol. 12. P. 4059–4071.
105. *Shirai T.* Liquid-crystal adaptive optics based on feedback interferometry for high-resolution retinal imaging // *Appl. Optics.* 2002. Vol. 41. P. 4013–4023.
106. *Love G.D., Fender J.S., Restaino S.R.* Adaptive wavefront shaping with LCs // *Optics and Photonics News.* 1995. Vol. 10. P. 16–20.
107. *Arines J., Durón V., Jaroszewicz Z., Ares J., Tajahuerce E., Prado P., Lancis J., Baró S., Climent V.* Measurement and compensation of optical aberrations using a single spatial light modulator // *Opt. Express.* 2007. Vol. 15. P. 15287–15292.
108. *Durón V., Climent V., Tajahuerce E., Jaroszewicz Z., Arines J., Baró S.* Efficient compensation of Zernike modes and eye aberration patterns using low-cost spatial light modulators // *J. Biomed. Opt.* 2007. Vol. 12. P. 014037.
109. *Vargas-Martin F., Prieto P.M., Artal P.* Correction of the aberrations in the human eye with a LC SLM: limits to performance // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1998. Vol. 15. P. 2552–2562.
110. *Durón V., Lancis J., Tajahuerce E., Jaroszewicz Z.* Cell parameter determination of TNLCD by single-wavelength polarimetry // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 97. P. 043101.
111. *Duran V., Lancis J., Tajahuerce E., Fernandez-Alonso M.* Phase-only modulation with a TN LCD by means of equi-azimuth polarization states // *Opt. Express.* 2006. Vol. 14. P. 5607–5616.

## *Глава 12*

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИ АДРЕСУЕМЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ**

Оптически управляемые пространственно-временные модуляторы света (ОА ПМС) или транспаранты (ОУТ) на основе структур фотопроводник-жидкий кристалл (ФП-ЖК) являются одним из основных элементов систем когерентно-оптической обработки информации [1–4], нейронных оптических сетей [5–7] и голографических вычислителей, реализующих принципы нечеткой алгебры [8–15]. ОА ПМС используются в них для ввода информации и для оперативной записи Фурье-фильтров, например, в корреляторе совместного преобразования. В голографических устройствах перво-степенное значение имеют зависимости дифракционной эффективности (ДЭ) от интенсивности записывающего излучения и пространственной частоты записываемой решетки [16]. ОА ПМС незаменимы в различных системах оптической обработки изображений. Например, в схемах преобразования некогерентных изображений в когерентные, некогерентный свет используется для записи информации, а считывание и дальнейшая обработка осуществляется в когерентном свете. Возможно получение усиления яркости изображения, когда слабый записывающий сигнал считывается интенсивным излучением. ОА ПМС могут быть использованы для спектрального преобразования изображений, когда запись и считывание осуществляются на различных длинах волн. Так, например, информация записывается в ИК диапазоне, а считывается в видимом диапазоне длин волн. ОА ПМС нашли применение в ди-

намической голографии: картина интерференции от объектного и референтного лучей создается на фотопроводниковом слое, а голограмма формируется при восстановлении картины, записанной в слое ЖК, считывающим излучением.

Достоинствами ОА ПМС является возможность управления мощным излучением с помощью маломощного записывающего излучения (управления света светом, усиление яркости); возможность ввода двумерных изображений с большим числом элементов разрешения без использования сложных технологий полупроводниковых структур, создающих рельеф заряда на поверхности ЖК, и возможность реализации в простой схеме самонаведения лазерного излучения по алгоритму «запись–считывание» [16].

Недостатками является низкая лучевая прочность, ограничение быстродействия процессами образования и переноса заряда в фотопроводнике и его паразитной емкостью, а также недостаточная чувствительность в спектральном диапазоне излучения, близком к длине волны считывания, в отсутствие воздействия считывающего излучения на фотопроводник.

В настоящем разделе рассматриваются примеры использования ОА ПМС в фазовых компенсаторах и системах внутрирезонаторного управления лазерным лучом, для оптической обработки информации, параллельной оптической обработки бинарных изображений, в оптических корреляторах, нейронных сетях, а также системах защиты глаза от слепящих излучений.

### **12.1. Характеристики оптически адресуемых пространственно-временных модуляторов света**

#### *Устройство и принцип действия ОА ПМС*

ОА ПМС на основе структуры ФП–ЖК представляет собой многослойное устройство, заключенное между двумя, как правило, стеклянными подложками. На внутренней стороне подложек имеются прозрачные проводящие покрытия. На одну из подложек нанесен слой ФП. Между слоем ФП и другой подложкой находится слой ЖК. На поверхности, ограничивающие слой ЖК, нанесены ориентирующие покрытия. При подаче на прозрачные токопроводящие покрытия постоянного или переменного напряжения, слой ФП, на который проецируется некое изображение (или пространственная решетка), преобразует распределение освещенности в соответству-

ющий потенциальный рельеф. Этот рельеф локально изменяет двулучепреломление слоя ЖК, что вызывает амплитудную или фазовую модуляцию считывающего излучения. На рис. 12.1 показан модулятор света на основе структуры ФП-ЖК с модуляцией отраженного света. Работа ОА ПМС описывается уравнением непрерывности токов, протекающих через структуру. Токи, протекающие через слой ФП и ЖК, равны и складываются из токов проводимости и токов смещения [17]:

$$j = \sigma_{\text{ФП}} E_{\text{ФП}} + \varepsilon_{\text{ФП}} \varepsilon_0 \frac{dE_{\text{ФП}}}{dt} = \sigma_{\text{ЖК}} E_{\text{ЖК}} + \varepsilon_{\text{ЖК}} \varepsilon_0 \frac{dE_{\text{ЖК}}}{dt}, \quad (12.1)$$

где  $j$  — плотность тока,  $\sigma_{\text{ФП}}$ ,  $\sigma_{\text{ЖК}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ФП}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ЖК}}$  — проводимости и диэлектрические проницаемости ФП и ЖК,  $E_{\text{ФП}}$ ,  $E_{\text{ЖК}}$  — напряженность электрического поля в ФП и ЖК. Приложенное к модулятору на-

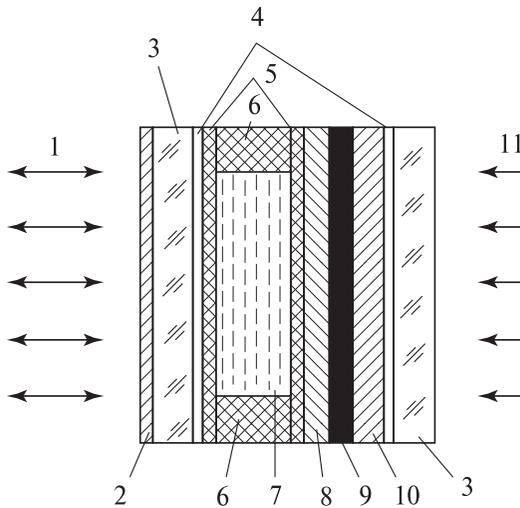


Рис. 12.1. ОА ПМС с модуляцией отраженного света: 1 — считывающий пучок; 2 — просветляющее покрытие; 3 — подложки; 4 — слои ИТО; 5 — изолирующие и ориентирующие покрытия; 6 — прокладки; 7 — ЖК; 8 — диэлектрическое зеркало; 9 — светопоглощающий слой; 10 — фотопроводник; 11 — записывающий свет

пряжение  $U$  распределено между слоями ФП и ЖК следующим образом:

$$U = U_{\text{фп}} + U_{\text{жк}} = E_{\text{фп}} d_{\text{фп}} + E_{\text{жк}} d_{\text{жк}}, \quad (12.2)$$

где  $U_{\text{фп}}$  и  $U_{\text{жк}}$  — напряжения на слоях ФП и ЖК;  $d_{\text{фп}}$  и  $d_{\text{жк}}$  — толщина слоев ФП и ЖК.

В простейшем случае при питании ОА ПМС в стационарном режиме постоянное напряжение на ЖК слое определяется выражением:

$$U_{\text{жк}} = \frac{U}{1 + \frac{d_{\text{фп}} \sigma_{\text{жк}}}{d_{\text{жк}} \sigma_{\text{фп}}}} \quad (12.3)$$

При работе ОА ПМС необходимо, чтобы в отсутствии записывающего излучения напряжение на слое ЖК было меньше порогового напряжения используемого электрооптического эффекта  $U_{\text{п}}$ , а при засветке — больше  $U_{\text{п}}$  (за счет изменения проводимости слоя ФП). Изменение проводимости ФП под действием записывающего излучения обычно описывается степенной зависимостью:

$$\sigma_{\text{фп}} = \sigma_{\text{фп}}^T + aI^\alpha, \quad (12.4)$$

где  $\sigma_{\text{фп}}^T$  — темновая проводимость ФП,  $I$  — интенсивность записывающего излучения,  $\alpha$  — параметры ФП.

В соответствии с уравнениями (12.3) и (12.4) напряжение на слое ЖК в зависимости от  $I$  записывающего излучения можно выразить так:

$$U_{\text{жк}}(I) = \frac{U}{1 + \rho \frac{\sigma_{\text{жк}}}{\sigma_{\text{фп}}^T}}, \quad (12.5)$$

где  $\rho = d_{\text{фп}}/d_{\text{жк}}$ .

Используя выражение (12.5) и зависимость фазовой модуляции в слое ЖК от напряжения  $\Delta\Phi(U_{\text{жк}})$ , можно получить зависимость фазовой задержки от интенсивности записывающего излучения для тех или иных условий.

Для питания ОА ПМС в режиме на отражение используется переменное напряжение, так как наличие зеркальных и других диэлектрических слоев в них препятствует прохождению постоянного

тока. Использование переменного тока увеличивает также долговечность ЖКМ, и поэтому более предпочтительно для структур с модуляцией проходящего света.

Упрощенная эквивалентная электрическая схема ОА ПМС для случая переменного управляющего напряжения приведена на рис. 12.2а [1]. Структура ФП-ЖК содержит последовательно соединенные полные сопротивления слоев ФП ( $Z_{\text{ФП}}$ ), диэлектрического зеркала ( $Z_{\text{Д}}$ ) и ЖК ( $Z_{\text{ЖК}}$ ). В результате освещения фотопроводника его проводимость уменьшается и соответственно изменяется эквивалентное комплексное сопротивление структуры от темнового значения  $Z_{\text{Ф}}^T$  до светового  $Z_{\text{Ф}}^{\text{СВ}}$ .

$$\begin{aligned} Z_{\text{Ф}}^T &= Z_{\text{ФП}} + Z_{\text{Д}} \\ Z_{\text{Ф}}^{\text{СВ}} &= Z_{\text{ФП}}^{\text{СВ}} + Z_{\text{Д}} + Z_{\text{ЖК}}, \end{aligned} \quad (12.6)$$

причем  $C_{\text{ФП}}^T = C_{\text{ФП}}^{\text{СВ}}$ .

Чувствительность структуры к излучению определяется по приращению проводимости  $\Delta\sigma = (\sigma_{\text{СВ}} - \sigma_{\text{T}})$ , соответствующему полуволновому изменению напряжения на слое ЖК:

$$\Delta V_{\text{ЖК}} = V_{\text{ЖК}}^{\text{СВ}} - V_{\text{ЖК}}^T \quad (12.7)$$

В работе [1] показано, что  $\Delta V_{\text{ЖК}}$  определяется выражением:

$$\Delta V_{\text{ЖК}} = \frac{\Delta\sigma V_{\text{ЖК}}}{\gamma_{\text{ФП}} \left[ 1 + (\gamma_{\text{ФП}} + \Delta\sigma)(Z_{\text{ЖК}} + Z_{\text{Д}}) \right]}, \quad (12.8)$$

где  $\gamma_{\text{ФП}}$  — комплексная проводимость фотопроводника.

Анализ выражения (12.8) показывает, что  $\Delta V_{\text{ЖК}}$  монотонно возрастает с ростом  $\Delta\sigma$  и  $V_{\text{ЖК}}$  и падает с ростом  $|Z_{\text{ЖК}}|$ ,  $|Z_{\text{Д}}|$  и  $|\gamma_{\text{ФП}}|$ . Для повышения чувствительности структуры следует уменьшать толщину слоя, увеличивать диэлектрические проницаемости ЖК; увеличивать темновое сопротивление, толщину слоя и уменьшать величину диэлектрической проницаемости ФП.

ОА ПМС может также работать в режиме фотодиода (рис. 12.2б) на  $p-n$  переходе [18]. Для повышения быстродействия ОА ПМС находят применение  $\text{С}^*\text{ЖК}$  [19]. При подаче смещения происходит падение напряжения на слое  $\text{С}^*\text{ЖК}$ , переводя его в положение «выключено». В течение положительного периода подачи напряжения  $\text{С}^*\text{ЖК}$  не оказывает воздействия на записывающий луч. При смене полярности напряжения изменяется смещение на фотодиоде, и в

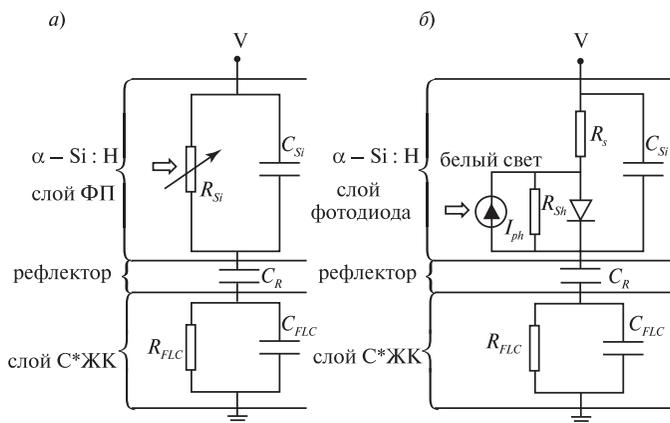


Рис. 12.2. Эквивалентная электрическая схема ОА ПМС: фотопроводниковый (а) и фотодиодный (б) варианты

отсутствие записывающего луча все падение напряжения будет происходить на светочувствительном слое: изменений в слое С\*ЖК не наблюдается. В противном случае, если записывающий луч освещает структуру в течение отрицательного периода напряжения, возникающий фототок приведет к воздействию на С\*ЖК отрицательного напряжения, вызывая его переключение в положение «включено». Бистабильное состояние сохраняется до подачи следующего положительного периода напряжения, возвращающего С\*ЖК в положение «выключено». Токпроводящие слои, как правило, не разделены на пиксели, и пространственное разрешение ОА ПМС обычно выше пространственного разрешения ЭУ ПМС.

#### *ОА ПМС на основе нематиков*

Широкое распространение получили ОА ПМС на основе нематиков при использовании  $S$ -,  $B$ - и твист-эффекта. Их быстродействие определяется вращательной вязкостью ЖК, константами упругости, толщиной слоя ЖК и управляющим напряжением. Типичными для этих ЖК устройств являются времена включения 1...10 мс, времена выключения  $\sim 50$  мс. В литературе описаны модуляторы на НЖК с апертурой до 100 мм [20, 21]. Для увеличения апертуры модуляторов на НЖК от 30 до 100 мм была усовершенствована технология нанесения тонких слоев диэлектриков и фотополупроводника на подложки

большого диаметра; отработана методика ориентации ЖК на больших площадях; получены прозрачные однородные электроды с низким поверхностным сопротивлением; отработаны методы сборки модуляторов, обеспечивающих достижение высокого оптического качества и воспроизводимости характеристик. Фотографии ОА ПМС отражательного типа, предназначенных для корректировки профиля зеркал с использованием голографических решеток с амплитудой до  $2\pi$  в видимом диапазоне, приведены на рис. 12.3 и 12.4; характеристики представлены в работах [20, 21].



Рис. 12.3. Фотография ОА ПМС на ЖК отражательного типа диаметром 100 мм. Толщина фотопроводника  $\sim 3$  мкм, толщина слоя ЖК BL037  $\sim 7$  мкм



Рис. 12.4. Семейство модуляторов с апертурой от 30 до 100 мм, осуществляющих запись голографических решеток в видимом диапазоне длин волн с амплитудой  $2\pi$  и числом интерференционных полос 2000–3000

Важными рабочими характеристиками ОА ПМС являются глубина фазовой модуляции и величина дифракционной эффективности ДЭ. Максимальная глубина фазовой модуляции в ПМС с апертурой 100 мм на длине волны  $\lambda = 532$  нм была равна  $2,6\pi$  [20]. При сканировании зондирующего пучка по сечению ПМС наблюдалось изменение величины фазовой задержки в пределах  $\sim 20\%$ . Указанное изменение обусловлено вариацией как фотоэлектрических и геометрических характеристик фотопроводника, так и неоднородностью толщины слоя ЖК. Дифракционная эффективность ОА ЖК ПМС была определена при изменении пространственной частоты решетки, параметров управляющего напряжения и интенсивности записываемого света. Измерения показали, что максимальная дифракционная эффективность составляла  $\sim 28\%$ , а разброс ее величины по апертуре ПМС от среднего значения — не более 15%.

Зависимость ДЭ решетки от ее пространственной частоты для НЖК приведена на рис. 12.5. При прямой записи голограммы, когда интерференция референтной и сигнальной волн происходит в фотопроводнике (ФП), ДЭ в первом порядке дифракции на синусоидальной решетке составляет обычно не более  $\sim 33\%$ . Из-за неизбежных потерь света в элементах модулятора, величина ДЭ еще меньше. В ОА ПМС отражательного типа при высокой реверсивности записи была получе-

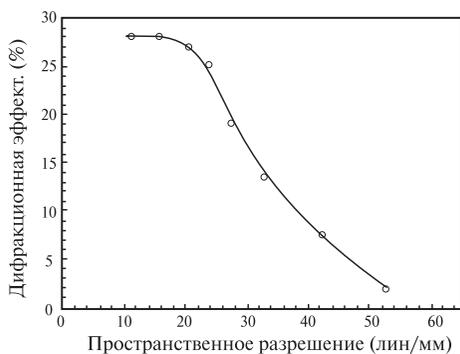


Рис. 12.5. Зависимость ДЭ решетки от ее пространственной частоты при использовании НЖК

на ДЭ  $\sim 20\text{--}25\%$ . ДЭ без учета потерь на пропускание или отражение в модуляторах просветного и отражательного типа равнялась  $\sim 30\text{--}34\%$ . Повышение ДЭ до 100% в теории и до  $\sim 75\%$  в реальных экспериментах при сохранении достоинств тонкой голографической решетки может быть достигнуто при записи голограммы с асимметричным профилем штриха решетки в виде прямоугольных треугольников [22–25]. Такая асимметрия может быть реализована за счет внутренней анизотропии структуры ПМС [22], аналоговым способом с применением обратной связи (рис. 12.6) [23] или цифровым способом методом компьютерной голографии (рис. 12.7) [25].

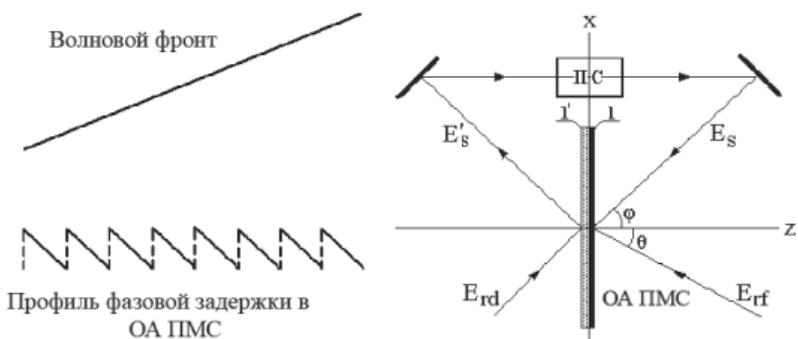
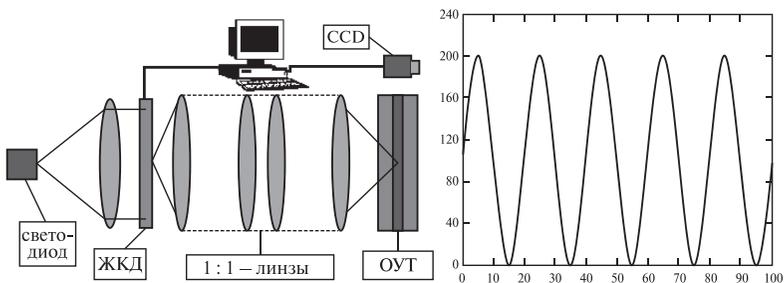


Рис. 12.6. Запись динамических голографических решеток с асимметричным профилем штриха при использовании оптической системы с обратной связью [23]



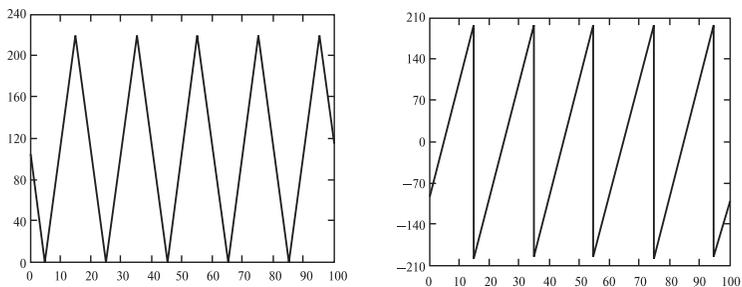


Рис. 12.7. Запись динамических голографических решеток с асимметричным профилем штриха («blazed»-голограммы) с использованием оптоэлектронной системы и компьютера [25]

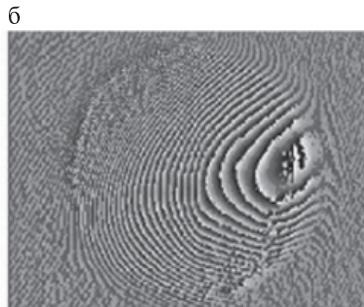
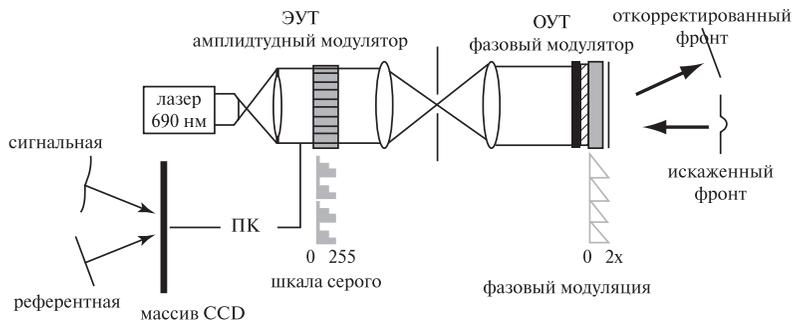


Рис. 12.8. Экспериментальная реализация записи голографической решетки с асимметричным профилем штриха методом компьютерной голографии [25]

Экспериментально запись подобных голографических решеток производилась в ОА ПМС с «серой» шкалой модуляции фазы, глубиной порядка  $2\lambda$  на S-эффекте в НЖК.

#### *ОА ПМС на основе смектиков*

В последнее время наибольшее распространение получают ОА ПМС на С\*ЖК с использованием эффектов Кларка-Лагерволла (SSFLC), деформации геликоида (DNF) и электроклинного. Они обеспечивают пространственное разрешение порядка 20–100 пар лин/мм; контрастное отношение 200:1 при чувствительности 1 нВт на пиксель и существенное уменьшение времени переключения.

По сравнению с другими оптически переключаемыми устройствами (устройствами на квантовых точках или нелинейных эффектах), они позволяют осуществлять параллельную обработку информации и имеют высокую чувствительность, но обладают меньшим быстродействием. В эффекте деформации спирали геликоида (DNF-эффекта) изменение двулучепреломления осуществляется за счет деформации спирали геликоида, когда толщина ячейки  $d$  много больше шага геликоида  $P_0$ . Этот эффект был использован в ОА ПМС, рассмотренном в работе [26]. Время отклика  $\tau$  определяется из соотношения:

$$\tau = \frac{\nu_\phi P_0^2}{K_{11} \pi^2},$$

где  $\nu_\phi$  — вращательная вязкость,  $K_{11}$  — константа упругости.

При превышении порогового напряжения спираль геликоида раскручивается полностью [27–29]. При этом оптическая ось С\*ЖК в раскрученном состоянии совпадает с направлением плоскости поляризации поляризатора, а анализатор повернут на угол  $\pi/2$ . В частности, фотопроводниковый слой на основе ZnSe обеспечил работу ОА ПМС в большей части видимого диапазона длин волн и позволил согласовать его работу с хиральным смектиком по основным параметрам. При напряжении питания 1 В время отклика составляет 100–200 мкс. Оно не зависит от величины поля и характера поляризации. Пороговый характер DNF-эффекта позволил перейти от записи синусоидальной решетки к записи меандра (прямоугольной решетки) с ДЭ до 40%. В отличие от S-эффекта в нематиках, где возможно считывание только линейно поляризованным излучением, С\*ЖК обеспечил практически одинаковую ДЭ для обеих поляризаций света, обеспечив возможность считывания голог-

рамм неполяризованным излучением [30]. Однако применение DHF-эффекта не позволяет реализовывать модуляцию фазы в шкале серого и получение асимметричного профиля.

Наиболее быстродействующим из всех электрооптических эффектов в ЖК является электроклинный эффект в С\*ЖК. Он состоит в изменении угла наклона молекулы и в электрическом поле и характеризуется линейной зависимостью и от величины напряженности электрического поля  $E$ :  $\theta = \epsilon_c E$ ,  $\epsilon_c$  — электроклинный коэффициент. Предельное значение угла —  $\theta_{\max} = 11,25^\circ$ .

Время отклика  $\tau_\theta = \frac{\gamma_\theta}{A}$  в случае электроклинного эффекта не за-

висит от величины поля и составляет 0,6–5 мкс. Электроклинный эффект имеет сильную зависимость и от температуры и низкий контраст. Рассмотренные эффекты представляют практический интерес для использования в устройствах защиты от слепящих источников.

Основные характеристики ОА ПМС с некоторыми фотопроводниками, извлеченные из литературных источников к этой главе, приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1

**Характеристики ОА ПМС с различными типами фотопроводников**

Фотопроводник Параметр	Монокр. ZnSe	Поликр. ZnSe	Поликр. ZnSe	ZnSe	$\alpha$ -Si	Полимер. ФП
Тип ЖК	НЖК	НЖК	С*ЖК	С*ЖК	С*ЖК	С*ЖК
Эффект	S-эффект	S-эффект	-SSFLC	DHF	Электроклинный	DHF
$\lambda$ записи, нм	530	530	белый			
$\lambda$ считывания, нм	633 (белый)	633 (белый)	белый			
Порог светочувств., Вт/см <sup>2</sup>	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-7}$
Диффракц. эффект, $\eta_{\max}$ , %	10	10	—			30

Фотопроводник Параметр	Монокр. ZnSe	Поликр. ZnSe	Поликр. ZnSe	ZnSe	$\alpha$ -Si	Полимер.
Разрешение при $\eta = 0,1 \text{ мм}^{-1}$ при $\eta = 0,5 \text{ мм}^{-1}$	>100 40	150 45	>100 40	70		100
Время включения, мс	10	20	2		0,005	
Время выключения, мс	20	100–500	20		0,005	
Контраст	100:1	100:1	100:1	>100:1	>200:1	
Режим управления	Синусо-идальный	Пост. напр.	Меандр	$\pm 20 \text{ В}$ , 0–200 Гц		

Приведенные сведения дают потребителя эксплуатационных характеристик ОА ПМС с различными типами фотопроводников и используемых электрооптических эффектов.

## 12.2. Применение ОА ПМС в адаптивной оптике

Для фазовой коррекции волнового фронта телескопических систем в астрономии в динамическом режиме разработаны голографические корректоры, основанные на динамической записи интерференционных решеток на ОА ПМС [31–35]. С помощью излучения вспомогательного лазера записывается голограмма-корректор (ГК) как картина интерференции двух волн: референтной волны и сигнальной волны, получаемой из излучения от точечного источника, прошедшего через корректируемую оптическую систему. При освещении такой ГК излучением от изображаемого системой объекта восстанавливаются неискаженные световые волны (рис. 12.9).

Примером использования ОА ПМС в адаптивной оптике является фазовая коррекция волнового фронта главного зеркала телескопа. К ОА ПМС на ЖК в схемах коррекции искажений предъяв-

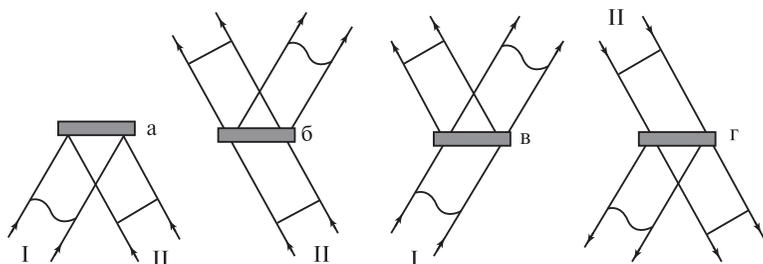


Рис. 12.9. Схемы записи голограммы-корректора (а) и восстановления одного из пучков (б, в, г): I — сигнальная волна, несущая информацию об объекте; II — референтная волна с неискаженным волновым фронтом [36]

ляются ряд требований: высокая чувствительность к записываемому излучению ( $\sim 1\text{--}100$  мкВт/см<sup>2</sup>), отсутствие воздействия считываемого излучения на голограмму, возможность записи голограмм с частотой  $\sim 10\text{--}1000$  Гц, возможность записи голографических решеток с несущей пространственной частотой  $50\text{--}100$  мм<sup>-1</sup>, число штрихов голографической решетки  $\sim 10^3\text{--}10^4$ , низкая угловая и спектральная селективность, высокая дифракционная эффективность в неполяризованном (или поляризованном) свете в первом порядке дифракции ( $\sim 80\text{--}90\%$ ) [36]. В современных устройствах ЖК ОА ПМС широкое распространение получили фоточувствительные слои на основе аморфного гидрогенизированного карбида кремния [37, 38].

Значительные успехи в применении голографической коррекции аберраций были достигнуты при записи ГК в ОА ПМС. Записанные в этом случае ГК являются тонкими, и потому являются свободными от спектральных и угловых ограничений. Принцип однопроходной голографической коррекции искажений оптического телескопа представлен на схеме (рис. 12.10) [39].

Разработанные ОА ЖК ПМС были использованы при коррекции искажений в модельных экспериментах. В качестве примера приведем результаты эксперимента по коррекции искажений профиля главного зеркала в макете телескопической системы в монохроматическом и в «белом» свете. Оптические схемы эксперимента, макет телескопической системы и результаты экспериментов представлены на рис. 12.11 и 12.12 [39–41].

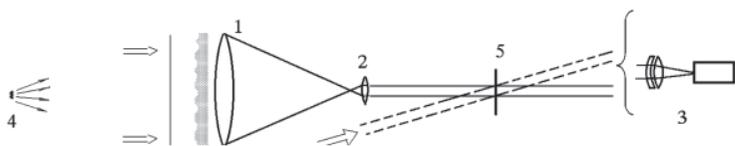


Рис. 12.10. Схема однопроходной голографической коррекции искажений оптического телескопа: 1 — корректируемый объектив телескопа; 2 — окуляр; 3 — система регистрации изображения; 4 — удаленный наблюдаемый объект; 5 — голограмма, записываемая как картина интерференции двух когерентных световых волн от вспомогательного источника, одна из которых прошла через элемент, искажения которого корректируются

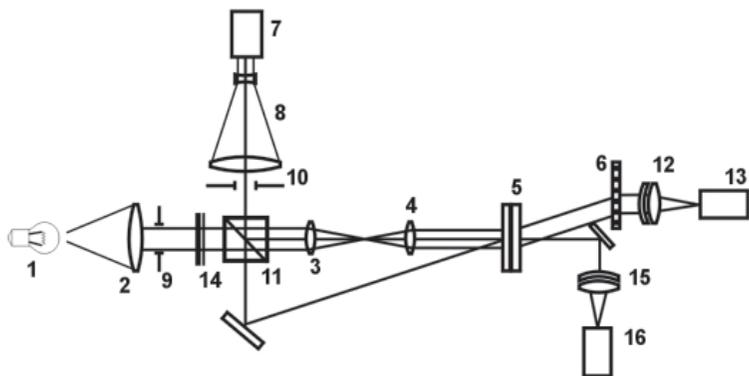


Рис. 12.11. Блок схема установки: 1 — тест-объект; 2 — объектив; 3 — объектив компенсируемого телескопа; 4 — окуляр; 5 — голограмма-корректор; 6 — дифракционная решетка; 7 — лазер для записи голограммы-корректора; 8 — расширительный телескоп; 9, 10 — диафрагмы; 11 — светоделительный куб; 12, 13 — элементы системы регистрации скорректированного изображения; 15, 16 — элементы системы регистрации некорректированного изображения

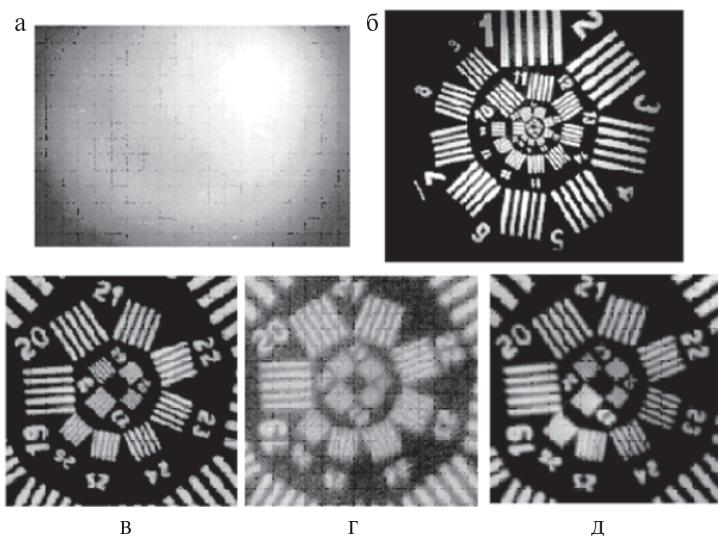


Рис. 12.12. Изображения тест-объекта [39]: а — изображение в некорректированном телескопе при установке перед объективом травленной в плавиковой кислоте стеклянной пластинки (расходимость пучка  $6 \cdot 10^{-3}$  рад); б — скорректированное изображение; в, г, д — центральные зоны скорректированного изображения в различных спектральных диапазонах: в —  $0,53 \pm 0,4$  мкм; г —  $0,63 \pm 0,4$  мкм (видно ухудшение качества из-за сдвига частотного интервала относительно длины волны записи корректора), д — во всем видимом спектральном диапазоне

Для записи в ОА ПМС голограммы искажений объектива линзового телескопа использовалось импульсное излучение второй гармоники Nd-YAP лазера, формировавшего изображение стандартной штриховой миры. Искажения объектива имитировались установленными перед ним травленными стеклянными пластинками. Использование вспомогательной дифракционной решетки для компенсации хроматизма голографического корректора, записанного в ОА ПМС, позволило сформировать скорректированное изображение тест-объекта во всем видимом спектральном диапазоне.

На рис. 12.12 приведено искаженное изображение и скорректированные изображения тест-объекта. Качество коррекции анализировалось по контрасту изображений штрихов миры. Рис. 12.12 свидетельствует, что качество изображения в зеленой области спектра с шириной 50 нм было близко к дифракционному.

В работе [41] исследовалась светосильная телескопическая система, формировавшая изображение штриховой миры в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 50$  нм с центром, совпадавшим с длиной волны записи голограммы ( $\lambda = 540$  нм). В исследованиях использовался модифицированный телескоп, первоначально предназначавшийся для формирования изображений с ОВФ-компенсацией при когерентной подсветке удаленного объекта. Схема эксперимента приведена на рис. 12.13.

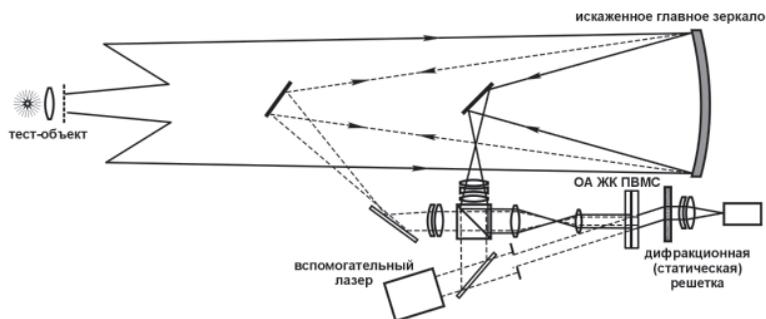


Рис. 12.13. Схема телескопической системы с голографической коррекцией искажений. Штриховой линией обозначен канал записи голограммы, сплошной линией — канал формирования изображения



Рис. 12.14. Интерферограмма деформированного зеркала, записанная на длине волны 0,54 мкм

Хроматизм корректора компенсировался с помощью пропускающей дифракционной решетки с пространственной частотой  $\sim 100$  лин/мм, соответствовавшей несущей частоте голографического корректора. В качестве объектива телескопа использовалось тонкое зеркало с диаметром 300 мм и относительным отверстием 1:4. Отклонения формы поверхности зеркала от сферической составляли  $\sim 2$  мкм. На рис. 12.14 приведена интерферограмма деформированного зеркала, а на рис. 12.15 —

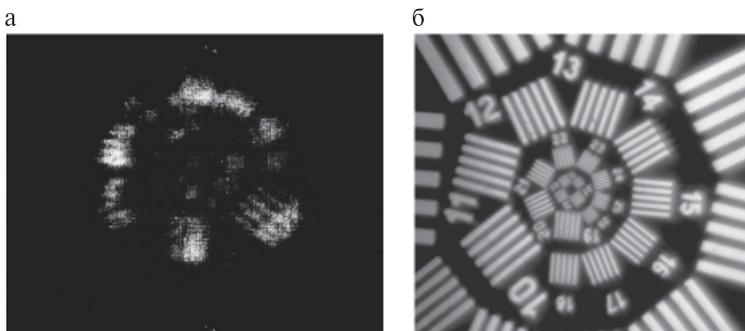


Рис. 12.15. Изображение штриховой миры до (а) и после (б) коррекции [41]

изображения штриховой миры без коррекции и скорректированное изображение.

Приведенные примеры свидетельствуют об эффективности использования ОА ЖК ПМС в адаптивной оптике, в частности для фазовой коррекции волнового фронта главного зеркала телескопа в достаточно широком диапазоне длин волн.

### 12.3. ОА ПМС для внутриврезонаторного управления пространственной структурой лазерного излучения

В данном разделе рассматриваются новые возможности лазерных систем с внутриврезонаторным размещением ОА ПМС для генерации, усиления и преобразования оптических сигналов с широким спектром пространственных частот. Обсуждаются вопросы точной адресации лазерного излучения, усилители с большим полем зрения и схема генерации изображений.

#### *Точная адресация лазерного излучения*

Традиционный подход в наведении лазерного излучения на объект представлен на рис. 12.16. Лазерное излучение адресуется на объект посредством выполнения нескольких операций: приема сигнала оптической системой (2), измерения его координат в некоторой координатной плоскости (1), выработки управляющих сигналов в системе обработки информации (4), приведения в действие дефлекторов (6), определения точки истинного попадания лазерного луча на объект (3), и последующих коррекций этого попадания.

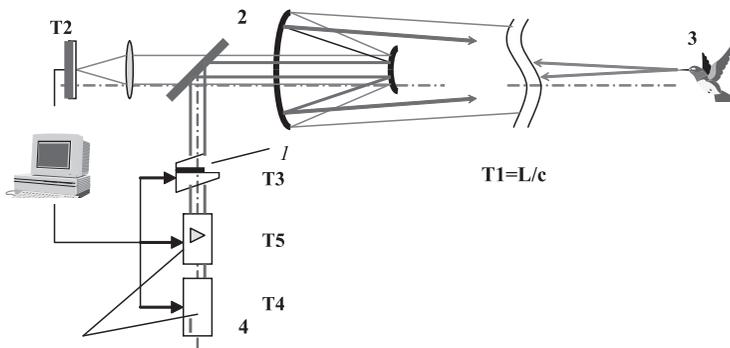


Рис. 12.16. Блок-схема наведения лазерного излучения: 1 — координатный приемник; 2 — приемно-передающая оптическая система; 3 — объект; 4 — компьютер; 5 — лазер; 6 — дефлектор

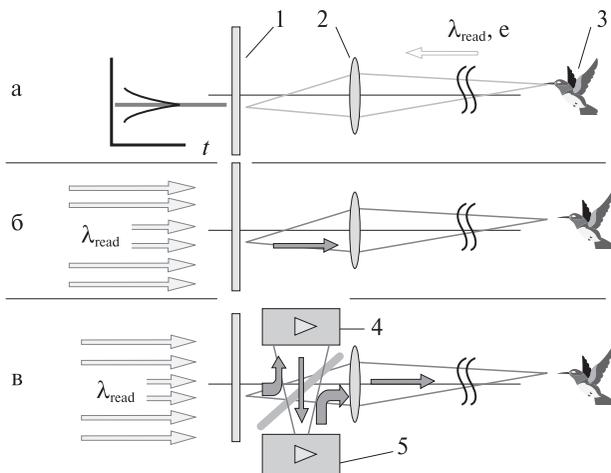


Рис. 12.17. Алгоритм «запись-считывание»: 1 — ОА ПМС; 2 — оптическая система; 3 — объект; 4 — предусилитель и 5 — усилитель с обращением волнового фронта: а — излучение от цели записывается на ОА ПМС; б — лазерное излучение считывает изображение, записанное на ОА ПМС; в — производится усиление считанного с ОА ПМС сигнала

Ошибки наведения в такой схеме (угловая ошибка  $\theta$ ) связаны как с оптическими искажениями в приеме-передающем тракте, так и с временными задержками при распространении и обработке сигнала. Источниками ошибок являются угловые погрешности, связанные с искажениями тракта распространения ( $\Delta 1 \geq 10^{-5}$  рад), оптической системы ( $\Delta 2$ ), дискретностью координатного приемника ( $\Delta 3 \sim \theta_{\text{дифр}}$ ), оптического лазерного тракта ( $\Delta 4 \sim 10 \theta_{\text{дифр}}$ ); динамические, связанные с временными задержками на пути распространения (Т1), в приемном устройстве (Т2) и устройстве обработки сигнала (Т3, Т4  $\sim 0,01$ – $1$  мс), и в управляющем механизме (Т5  $\sim 1$  мс).

Альтернативный подход с использованием ОА ПМС и названный «алгоритм запись-считывание» поясняется на рис. 12.17 [42, 43]. Источником информации о положении объекта является излучаемый или рассеиваемый им свет, который приводится в плоскость изображения оптической системой. ОА ПМС располагается в плоскости изображения и изображение цели записывается на нем так, что пропускание ОА ПМС в области, соответствующей изображению, будет выше, чем в области фона. Это соответствует первому этапу – «запись» (рис. 12.17а). На втором этапе «считывания» ОА ПМС освещается лазерным излучением (рис. 12.17,б). Изображение точечного объекта станет источником сферической волны, распространяющейся к цели, и фокусирующейся на ней той же оптической системой. Длина волны считывающего излучения выбирается такой, к которой ОА ПМС не чувствителен или мало чувствителен. Это позволяет произвести спектральное разделение считывающего и записывающего излучения. Управление возвращаемым на объект излучением производится непосредственно из координатной плоскости, в которую приходит информация о положении объекта. Этим устраняются ошибки, связанные с собственными вибрациями и недостаточной жесткостью системы. Энергия, прошедшая через открытую зону ОА ПМС, не может быть слишком велика, и во многих случаях необходимо усиление излучения лазерными усилителями (третий этап, рис. 12.17в). Их полезно вынести из информационного тракта, где распространяется записывающее излучение. Каскады в такой схеме должны обеспечивать усиление сигнала во всем поле зрения оптической системы и возвращать без искажений усиленный сигнал его первоначальному направлению. Последнее требование реализуется применением обращающих волновой фронт зеркал в каждом из каскадов.

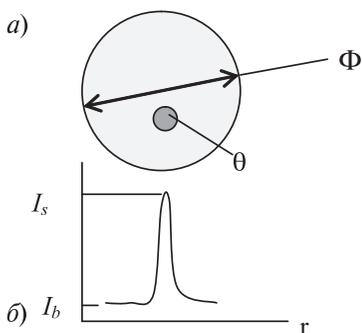


Рис. 12.18. К необходимости повышения контраста при считывании

Особенность использования ОА ПМС при внутррезонаторном считывании связана с наличием усилительной системы, обладающей большим полем зрения. Поле зрения усилителя  $\Phi$  (рис. 12.18) должно быть равно требуемому полю управления положением луча плюс некоторая величина, определяемая величиной искажений в усилительных каскадах. Чтобы энергия, запасенная в усилителе, шла на усиление лишь нужного сигнала, а не паразитного излучения, просачивающегося через ОА ПМС во всем поле зрения усилителя,

требуемый контраст пространственного модулятора (определяемый здесь как  $K = Y_s / Y_b$ ) по порядку величины должен составлять величину поля зрения, выраженную в числе разрешимых положений. Величину этого поля разумно положить близкой к телевизионному стандарту, или  $\sim 10^6$  пикселей. Тем самым величина требуемого контраста ОА ПМС составит  $K \sim 10^7$ , что неосуществимо в настоящее время и проблематично в будущем. Таким образом, возникает задача создания такого способа считывания информации с ОА ПМС, при котором существенно возрастает отношение сигнала к фону. Именно для этой цели и был предложен внутррезонаторный метод считывания. Тогда считывание информации, записанной на ОА ПМС в виде пространственно-модулированного пропускания, производится «изнутри» резонатора (рис. 12.19).

Величина усиления в активной среде подбирается такой, чтобы в области резонатора, соответствующей наибольшему пропусканию, — а это та область, где находится изображение объекта, — выполнялось пороговое условие генерации, в то время как для прочих областей усиление было ниже порогового. Резонатор лазера, в котором производится такое считывание, необычен. В нем размещается оптическая система, выполняющая взаимное проектирование изображений зеркал резонатора друг на друга — оптический ретранслятор. Собственные типы такого резонатора вырождены по частоте и потерям. На рис. 12.19б изображен частный вид такой моды,

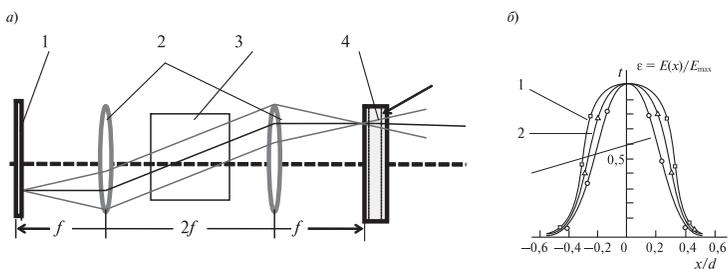


Рис. 12.19. Внутррезонаторное считывание в сопряженном резонаторе для повышения контраста: а) конфигурация сопряженного резонатора: 1 — зеркало; 2 — софокусные линзы; 3 — активный элемент; 4 — пространственный модулятор света; б) распределение интенсивности лазерного излучения от координаты на зеркале для контраста при записи:  $K = 1,2$  (1);  $1,5$  (2);  $K = \infty$  (жесткая диафрагма)

отвечающий открытой зоне на ОА ПМС. Если будут открыты несколько зон на ОА ПМС, генерация будет происходить на нескольких таких модах, и возможна адресация одновременно к нескольким объектам.

Первое упоминание о лазере с вырожденным резонатором приводится в работе [44]. Автор рассматривал проблему генерирования множества точек на поверхности зеркала — генерации изображений. Он использовал различные маски, помещаемые в резонатор — пространственных модуляторов, работающих в реальном масштабе времени, в ту пору еще не было. В работе [45] в эксперименте использовался лазер на парах меди с пространственным модулятором света, модулирующий слой которого был выполнен из электрооптического кристалла, размещенного как экран ЭЛТ. Пространственная модуляция производилась непосредственно электронным пучком, доставляющим заряд в ту или иную точку на поверхности электрооптического кристалла. Целью этих работ было создание лазера со скоростным двумерным сканированием. Были также рассчитаны собственные колебания сопряженных резонаторов для идеализированного безабберационного случая. Анализ влияния aberrаций на структуру мод и потери таких резонаторов был выполнен в работах [46, 47]. Позже та же идея быстрого двумерного сканирования была реализована в  $\text{CO}_2$ -лазерах, использующих модуляторы на основе фазового перехода в тонких пленках окиси ванадия и в сканирующих  $\text{CO}_2$  лазерах с ОА ПМС на ЖК [48, 49]. В работе [50] описан

электроадресуемый ПМС с разрешением 640x480 пикселей и градациями яркости 265, помещенный внутрь лазера на родамине (R6G) без сопряженных резонаторов.

Основные требования к ОА ПМС применительно к внутриврезонаторному управлению пространственной структурой лазерного излучения приведены в таблице 12.2.

Таблица 12.2

### Основные требования к ОА ПМС

Параметр	Характеристики	Примечание
малое время отклика	$\sim 10^{-4}$ с	С*ЖК; НЖК
высокая реверсивность	$< 5 \cdot 10^{-4}$ с	С*ЖК
лазерная прочность	$\sim 1$ Дж/см <sup>2</sup> при 30 нс	мин. прочность у п/п электродов
малые потери в открытом состоянии	$< 1\%$ за 2 <sup>х</sup> проход	рассеяние
контраст	$> 3:1$	
прямой доступ к $\{x_i, y_k\}$	оптические эффекты, линейные по полю	С*ЖК

Требования к контрасту модулятора ослаблены в силу его отмеченного обострения при внутриврезонаторном считывании, а ОА ПМС на смектиках позволили решить проблему быстродействия. Специфическими требованиями являются высокая стойкость к воздействию лазерного излучения и весьма малые потери в открытом состоянии.

#### *Лазерная стойкость ОА ПМС*

Анализ работы ОА ПМС показал, что наименьшей лазерной прочностью обладают полупрозрачные электроды (ИТО), стоящие на пути луча. В них требования электропроводности электродов и малого поглощения находятся в противоречии. Электроды нагреваются проходящим излучением, что было подтверждено интерференционными исследованиями ячеек (рис. 12.20).

При большой мощности этот нагрев приводит к разрушению. Методами многоакурсной эллипсометрии была изучена структура пленок ИТО (рис. 12.21). Она оказалась неоднородной по глубине, и по-

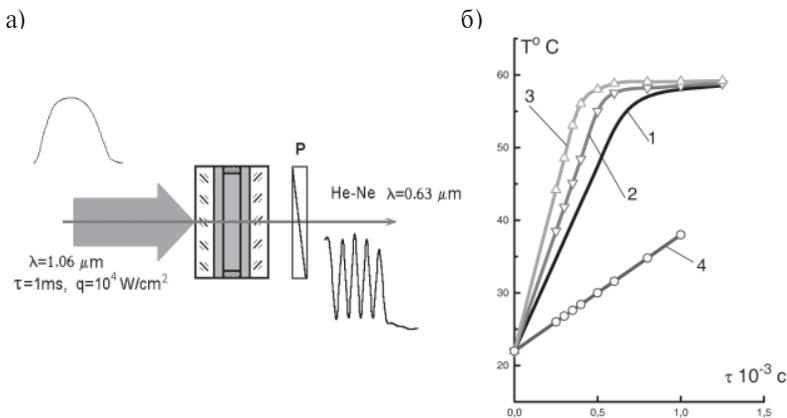


Рис. 12.20. Тепловые эффекты в ЖКЯ при лазерном воздействии: а) Изменение  $D_{\text{л}}$  ЖК при нагреве ИТО слоев; б) Кинетика нагрева ЖКЯ: 1 —  $q = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$  (расчетная); 2 —  $q = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ ; 3 —  $q = 10^4 \text{ Вт/см}^2$ ; 4 —  $q = 5 \cdot 10^2 \text{ Вт/см}^2$

поглощение сильно увеличивается от поверхности к подложке. Лазерным напылением и отжигом в окисляющей атмосфере удалось повысить однородность структуры покрытий и уменьшить коэффициент поглощения, что в сочетании с очень тонкими слоями (до 50 нм) позволило получить приемлемую для практических применений лазерную стойкость при удовлетворительной электропроводности слоев.

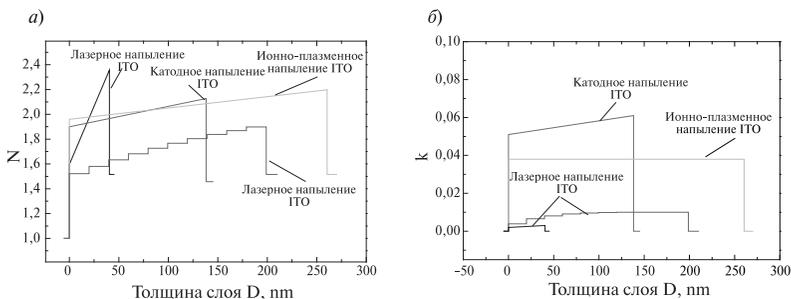


Рис. 12.21. Оптические свойства ИТО пленок. а) показатель преломления различных типов пленок ИТО; б) коэффициент поглощения различных типов пленок ИТО

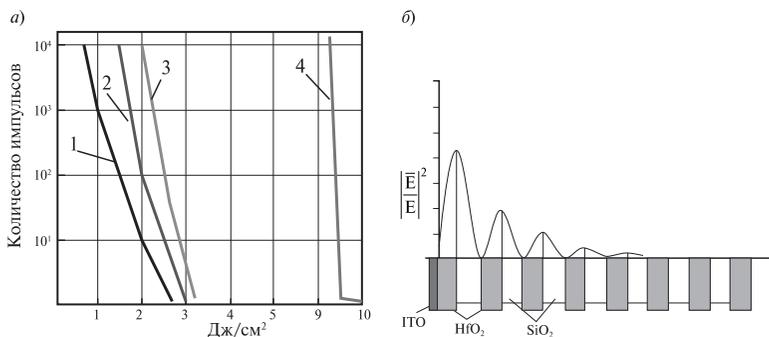


Рис. 12.22. Лазерная стойкость ITO слоев: а) Пороги оптического пробоя) катодное распыление; 2) ионно-плазменное распыление; 3) лазерное напыление; 4) лазерное напыление на диэлектрическое зеркало; б) Распределение интенсивности световой волны в диэлектрическом зеркале. Толщины слоев  $D_{\text{HfO}_2} = 1250 \text{ \AA}$ ,  $D_{\text{ITO}} = 250 \text{ \AA}$ .

Измерения лазерной прочности слоев ITO (рис. 12.22) показали, что допустимыми для работы условиями являются нагрузки в единицы Дж/см<sup>2</sup>. При этом обеспечиваются наработки в десятки тысяч импульсов. Возможна конструкция ЖКЯ, в которой поле прикладывается не вдоль ячейки, а поперек, между смежными электродами. При этом на пути луча электродов нет, и лазерная прочность определяется лазерной стойкостью самих ЖК и прозрачных подложек, составляющих, при тех же условиях, величину на порядок большую [51]. Было установлено, что основными источниками потерь в ОА ПМС является рассеяние в жидкокристаллических слоях и френелевские отражения на многочисленных поверхностях раздела. Аберрации резонаторов с ОА ПМС были скомпенсированы исправленными объективами, обеспечившими равномерность интенсивности лазерного излучения в пределах поля зрения  $\sim 300$  дифракционных углов.

На рис.12.23 представлена блок-схема усилительной системы с широким полем зрения для работы совместно со сканирующими лазерами [42, 51]. Отметим систематическое применение принципа ретрансляции центров активных элементов друг в друга — тем самым удастся избавиться от большого поперечного перемещения луча внутри оптической системы при сканировании луча в задающем генераторе.

Характеристики лазерной системы «сканирующий генератор-усилитель» с использованием активных элементов из кристаллов YAG:Nd, и ОА ПМС на основе НЖК, реверсивность которого обеспечивала частоту следования импульсов  $F = 10$  Гц, приведены в табл. 12.3 [42].

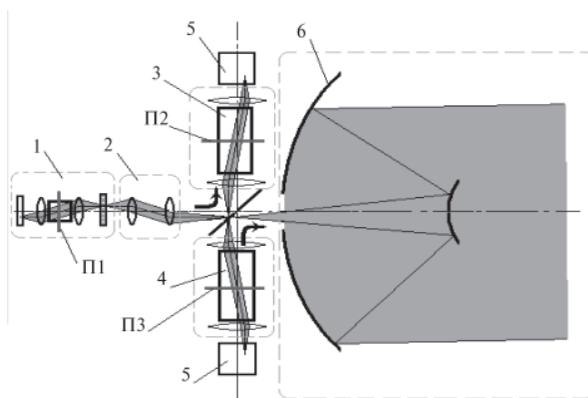


Рис. 12.23. Блок-схема сканирующего лазера с усилительной системой: 1 — сканирующий лазер; 2 — ретранслятор; 3 — предусилитель; 4 — усилитель мощности; 5 — устройства обращения волнового фронта; 6 — формирующая оптическая система; П1, П2, ПЗ — сопряженные плоскости

Таблица 12.3

### Характеристики лазерной системы

<i>Задающий генератор</i>	
Выходная энергия	200 мкДж
Частота следования импульсов	10 Гц
Длительность импульса	15 нс
Поле зрения	100×100 пикселей,
Качество излучения	ТЕМ00 – мода во всем поле зрения
<i>Предусилитель</i>	
Коэффициент усиления	до $10^6$ (при $E_{вх.мин} \sim 150$ нДж)
Число проходов	8
Качество воспроизведения волнового фронта	0,9

<i>Усилитель мощности</i>	
Поле зрения	100×100 пикселей
Выходная энергия	4,5–6 Дж
Расходимость излучения	$0,6 \times 10^{-2}$ рад ( $1,2\theta_{\text{difr}}$ )

Максимальный коэффициент усиления восьмипроходового усилителя при наименьшей величине входного сигнала ( $E_{\text{вх}} \sim 150$  нДж) достигал  $\sim 10^6$ , хотя в рабочем режиме, обеспечивающем упомянутое насыщение усиления, был меньше  $\sim 10^4$ . Применение ОВФ обеспечило высокое качество воспроизведения волнового фронта сканирующего пучка во всем поле зрения. Усилитель мощности включал два параллельных канала, фазиремых с помощью ОВФ-зеркала. Были использованы крупногабаритные (до  $\varnothing 12 \times 120$  мм) активные элементы, энергозапас и усиление в которых позволило достичь на выходе энергию излучения около 5 Дж в дифракционно ограниченном пучке, произвольно адресуемом в поле зрения  $100 \times 100$  пикселей, на частоте следования 10 Гц. Аналогичная функция может быть осуществлена с помощью ОА ПМС.

Исследование лазерной прочности ЖК материалов в среднем диапазоне ИК излучения позволило установить порог, составляющий  $10$  Дж/см<sup>2</sup> [52, 53]. Высокая величина порога лазерной прочности открывает возможности для использования ОА ЖК ПМС без поглощающих слоев в мощных лазерных системах. Исследование показало, что моноимпульсное воздействие в среднем ИК диапазоне ( $\lambda = 2,6\text{--}10,6$  мкм) на ЖК материалы приводит к появлению дополнительного рассеяния света. В определенном интервале плотности энергии ( $5\text{--}10$  Дж/см<sup>2</sup>) оптический отклик имеет обратимый характер до момента появления разрушения. В случае, если излучение представляет собой последовательность импульсов возникают дефекты в ЖК системе: нарушение поляризации лазерного излучения, появление обратимого светорассеяния и обратимой деформации структуры. Все эти нарушения имеют термическую природу, зависящую от механизма нагревания, и осуществляются за счет механизма накопления. В то же время существует порог плотности энергии системы (не более  $10$  мДж/см<sup>2</sup>), для которого долговечность ЖК модулятора не зависит от излучения и является практически неограниченной.

### Применение ОА ПМС в лазерной системе для генерации изображения

Уникальным достоинством применения ОА ПМС в лазерной системе является наиболее эффективное использование объема рабочего тела для осуществления генерации (рис. 12.24) [54–57]. В таком режиме получения изображений возможны иные по отношению к «не лазерным» оптическим системам соотношения для разрешающей способности. Внутри резонатора изображение «строится» из мод резонатора, а не из мод распространения пустого

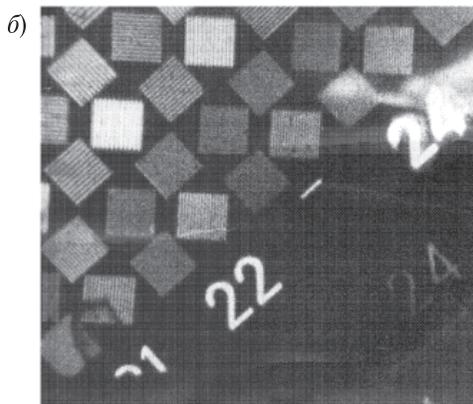
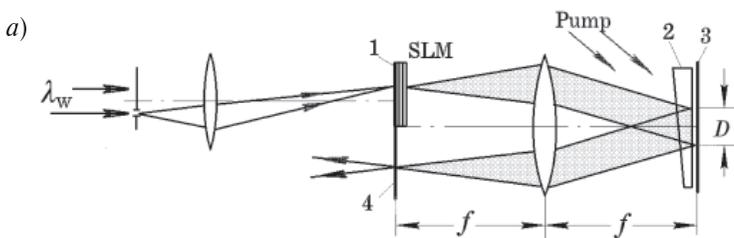


Рис. 12.24. Лазерная генерация изображений. а) схема эксперимента: 1 — ОА ПМС на основе фотослоя AsSe и ХЖК; 2 — усилитель на основе красителя R6G ( $\lambda = 0,56$  мкм), накачиваемый излучением 2 гармоники YAG:Nd лазера, зона накачки  $D = (2-5)$  мм; 3 — зеркало; 4 — выходное зеркало. Число Френеля резонатора  $N = (d_s D) / (\lambda f) = 300$ . Плотность энергии записи  $\sim 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>. Плотность энергии считывания ( $\tau = 20$  нс):  $8 \times 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup>; б) поле излучения лазера

пространства, как во вне резонаторном случае. Далее, в резонаторе присутствует усиливающая среда и связанные с нею существенные нелинейности, что тоже может привести к новым результатам при получении и обработке изображений.

Другим направлением работ является внутррезонаторная обработка изображений. В резонаторе (рис. 12.24) имеются две плоскости изображения (зеркала) и Фурье-плоскость (центр резонатора), в которые можно помещать ПМС и согласованные фильтры, и, комбинируя эти элементы, производить сложение изображений, операции корреляции и т. д.

Одной из проблем, возникающих при лазерном усилении яркости изображений, является обеспечение эффективности усиления. При воздействии оптически неоднородного по интенсивности лазерного излучения в рабочем веществе усилителя возникает дефицит «дырок», часть возбужденных ионов оказывается в областях с малой плотностью излучения, что приводит к падению эффективности усиления. Решение этой проблемы средствами увеличения мощности лазерного излучения чрезвычайно дорого.

Противоречивое требование увеличения эффективности усиления светового сигнала при разумной стоимости может быть решено использованием усилителя, расположенного в Фурье-плоскости оптической системы (рис. 12.25). Создание изображения имеет нелинейный характер. Изображение создается как суперпозиция генерируемых собственных мод лазерного резонатора. Число генерируемых мод определяется из выражения:

$$M = D_{\text{SLM}} D_{\text{FOV}} / \lambda f, \quad (12.9)$$

где  $D_{\text{SLM}}$  — рабочая площадь транспаранта,  $D_{\text{FOV}}$  — площадь рабочего тела резонатора, обеспечивающего генерацию излучения в широком поле зрения.

Если среда усилителя расположена в зоне пересечения мод, то их взаимодействие приводит к оконтуриванию изображения.

В эксперименте для полной блокировки двух соседних пикселей было достаточно, чтобы различие в их потерях составляла <1%.

Схема усиления изображения в Фурье-плоскости показана на рис. 12.26. Изменением профиля сигнала, проходящего через усилитель, можно изменять усиление для низких и высоких пространственных частот и выравнивать усиление для всего спектрального диапазона.

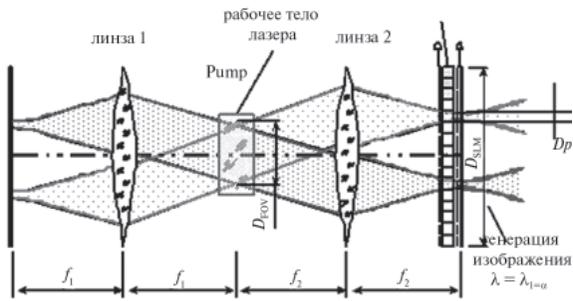


Рис. 12.25. Вверху: схема расположения усилителя в Фурье-плоскости оптической системы. Внизу: процируемое изображение (слева), генерируемое изображение (справа)

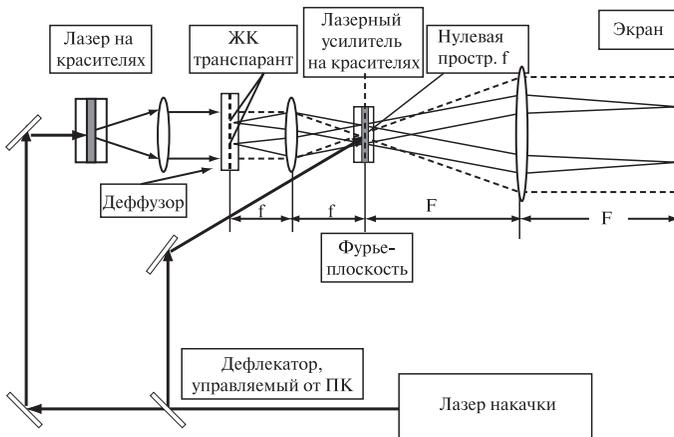


Рис. 12.26. Схема усиления изображения в Фурье-плоскости

ОА ПМС для внутрирезонаторного управления пространственной структурой лазерного излучения иллюстрируют новые возможности лазера не только как генератора остронаправленного излучения (т. е. сигнала с предельно ограниченным угловым спектром), но и как системы, способной генерировать, усиливать и преобразовывать оптические сигналы с широким угловым спектром. С этой целью ЭУТ или ОУТ располагают в полости лазерного резонатора. Это позволяет осуществлять генерацию с ограниченным и угловым распределением. Этот сигнал, кроме того, может усилен специальным усилителем с широким полем зрения. Схема усилителя включает сопряженные по фазе элементы, позволяющие компенсировать искажения и сохранить пространственную информацию в выходном сигнале.

ОА ПМС при внутрирезонаторном управлении пространственной структурой лазерного излучения расширяют функциональные возможности лазерных систем.

#### 12.4. Оптические корреляторы

Корреляторы — это процессоры, осуществляющие автоматическое вычисление корреляционных функций случайных процессов. В оптических корреляторах сопоставляется изображение на входе с эталонным изображением, хранящемся в памяти системы. Применение оптических корреляторов позволяет осуществлять распознавание образов, идентификацию объектов, например отпечатков пальцев, и осуществлять оптический контроль качества изделий. Если обозначить  $s(x, y)$  неизвестное изображение на входе, а  $r(x, y)$  эталон, тогда операцию корреляции можно выразить математическим выражением:

$$s(x, y) * r(x, y) = \text{FT}\{S(u, v) R^*(u, v)\}, \quad (12.10)$$

где  $S(u, v)$  и  $R(u, v)$  — преобразования Фурье соответственно функций  $s(x, y)$  и  $r(x, y)$ . Известны две основные схемы построения таких систем: коррелятор Вандер Люгта и объединенный преобразователь-коррелятор (ЖТС). В обеих схемах нашли применение ОА ПМС на С\*ЖК для внутрирезонаторного управления пространственной структурой лазерного излучения.

Коррелятор Вандер Люгта оперирует, как правило, с Фурье образами изображений, а не с самими изображениями. В корреляторе Вандер Люгта преобразование Фурье входного изображения  $s(x, y)$

осуществляется с помощью линзы, в то время как преобразование Фурье эталонного изображения обычно вычисляется с помощью компьютера [58–61]. Общая схема четырехфокусного коррелятора показана на рис. 12.27.

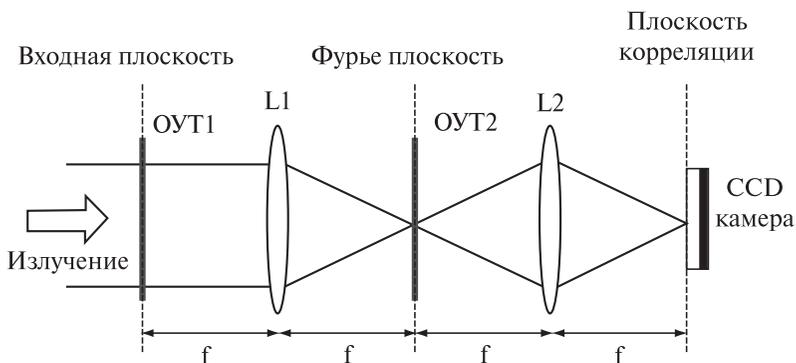


Рис. 12.27. Общая схема четырехфокусного коррелятора с двоичным фазовым фильтром, размещенным в Фурье плоскости. Корреляционные пики регистрируются CCD камерой

ОУТ1 отображает входное изображение в форме двоичного амплитудного сигнала, который преобразуется линзой L1. Эталонное изображение также подвергается преобразованию Фурье  $R^*(u, v)$  и после фильтрации амплитудной информации представляется в качестве двоичного фазового фильтра. Этот фильтр отображается ОУТ2 в двоичной фазовой форме. Свет, прошедший ОУТ2, является результатом Фурье преобразования входного изображения и его фильтрации, и подвергается дальнейшему Фурье преобразованию линзой L2, завершающей операцию. Максимумы интенсивности, появляющиеся в выходной плоскости, показывают положение эталонного изображения относительно входного изображения. Использование двоичного фазового фильтра приносит некоторую погрешность в окончательный результат, вызванную использованием фазы в двоичной форме. Однако из-за удобства использования ОА ПМС этой погрешностью пренебрегают.

Корреляция в принципе инвариантна сдвигу, хотя это не выполняется для других случаев нормировки, основанных на комбинации ряда эталонных изображений, например разных размеров, с фильт-

рами, содержащими характеристики исходных эталонов. В частности была показана возможность использования оптической корреляции на основе двоичного фазового фильтра в распознавании дорожных знаков [59]. Типичная разница в корреляционных пиках составила 6–7 дБ с небольшим колебанием в высоте корреляционного максимума порядка 15% для диапазона от 1,0 до 2,4. В работе [60] коррелятор Вандер Люгта с двоичным фазовым фильтром был модифицирован для осуществления многоканальной обработки, что было продемонстрировано для пространственного мультиплексирования.

В корреляторе совместного преобразования ЖТС входное и эталонное изображения отображаются рядом и разделены промежутком  $2a$  на входной плоскости ЭУТ на основе С\*ЖК. Входное изображение записывается как выражение  $R(x-a, y) + s(x+a, y)$ , а распределение интенсивности  $I(u, v)$  объединенного Фурье преобразования описывается равенством:

$$I(u, v) = |R(u, v)|^2 + |S(u, v)|^2 + R(u, v)S^*(u, v)\exp(-2pj2au) + R^*(u, v)S(u, v)\exp(+2pj2au). \quad (12.11)$$

Отсюда видно, что второе преобразование Фурье описывает параметры интенсивности  $I(u, v)$  будет содержать как соосную автокорреляцию входного и эталонного изображений (члены  $|S|^2$ ,  $|R|^2$ ), так и члены, расположенные вне оси с координатами  $x = 2a$  и  $x = -2a$ . Общая схема коррелятора ЖТС показана на рис. 12.28. Линза L1

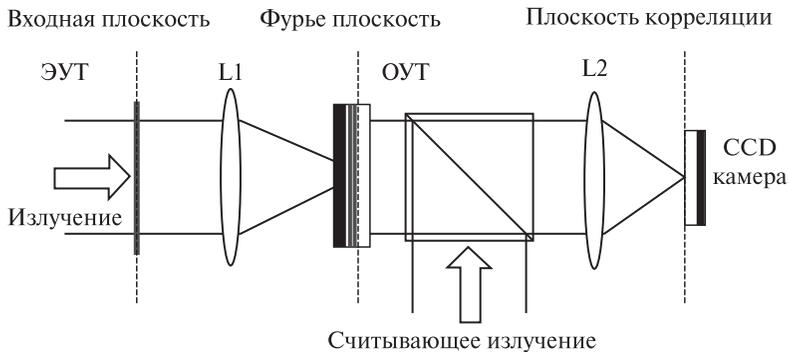


Рис. 12.28. Общая схема коррелятора ЖТС. Входное и эталонное изображения отображаются рядом на входной плоскости ЭУТ

осуществляет объединенное преобразование Фурье изображения со входа ЭУТ и интенсивность  $I(u, v)$  (объединенный спектр мощности) записывается на ОУТ на основе С\*ЖК, расположенном в фокальной плоскости линзы. Второй луч света считается ОУТ, преобразуется линзой L2 и отображается в корреляционной плоскости, где расположена CCD камера. В этой плоскости наблюдается автокорреляционный пик совместно с двумя симметричными пиками, которые являются результатом корреляции между входным и эталонным изображениями, как это было объяснено ранее.

ОУТ управляет нелинейным преобразованием в Фурье плоскости, приводящим к получению острых корреляционных пиков и улучшению соотношения сигнал/шум. Коррелятор ЖТС также был успешно использован для распознавания дорожных знаков [59] и отпечатков пальцев [62]. В случае многоканального пространственного мультиплексирования этот тип коррелятора имеет большую информационную емкость по сравнению с коррелятором Вандер Люгта с двоичным фазовым фильтром.

Пример использования коррелятора Вандер Люгта для идентификации изображений отпечатков пальцев приведен на рис. 12.29. Коллимированный пучок света от источника излучения отражается призмой, проходит через устройство регистрации изображения и управляющее устройство и поступает на ЭЛТ с адресацией информации на ОУТ1 для формирования изображения отпечатка пальца. Эталонное изображение из устройства памяти также проходит управляющее устройство и поступает на ЭЛТ-ОУТ1. Двухмерный Фурье образ суперпозиции двух изображений формируется линзой на другом ОУТ2, расположенный в ее фокальной плоскости. Отраженный луч вторично подвергается преобразованию Фурье, и корреляционный сигнал фокусируется второй линзой на фотоприемник. В случае если изображения идентичны, корреляционные пики наблюдаются вместе с одинаковой интенсивностью корреляционного сигнала. В противном случае интенсивность корреляционных сигналов существенно различается (рис. 12.29). Корреляционные пики идентифицируются управляющим устройством на выходе системы.

Преимуществом коррелятора Вандер Люгта является трансляционная инвариантность. Недостаток системы состоит в том, что если вращать объект или изменять его размеры, то распознавание образов затрудняется в связи с уменьшением корреляционных пиков. Проблема исчезает, если эталонные изображения с различной ориентацией и с различными размерами сопоставляются с изменен-

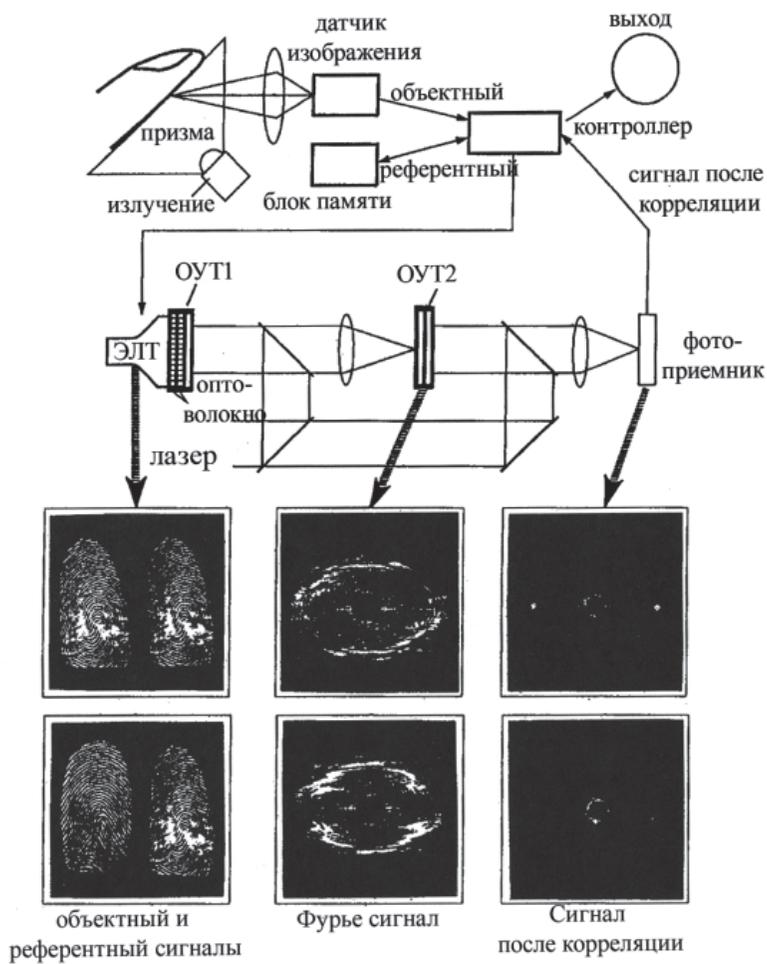


Рис. 12.29. Схема и результаты идентификации изображений отпечатков пальцев с использованием коррелятора Вандер Люгта с ЖК ПМС [62]

ным изображением объекта. При этом формирование изображения на ПМС должно происходить быстрее, чем поступление информации на входе для распознавания образов.

Сравнение двух типов корреляторов приводит к следующему выводу. Коррелятор Вандер Люгта имеет фазовый фильтр, расположенный в Фурье плоскости. Двоичный фазовый ОУТ дает острые пики с хорошим отношением сигнал/шум, а разделение входной плоскости и плоскости фильтрации приводит к простой корреляции, делающей распознавание простой операцией. С другой стороны, коррелятор ЖТС является более компактным и устойчивым с меньшими оптическими проблемами. Однако отображение входного и эталонного изображений рядом уменьшает пространственную пропускную способность и усложняет анализ симметричных корреляционных пиков.

### 12.5. Оптическая фильтрация

Оптическая фильтрация является одной из основных операций оптической обработки информации. Классическая схема для осуществления оптической фильтрации пространственных частот изображений приведена на рис.12.30 [62]. Свет от источника 1 освещает объект 3, который вызывает дифракцию излучения. Фурье образ объекта 3 формируется в фокальной плоскости объектива 2'. Элементы изображения с высокой пространственной частотой отклоняются под большим углом, а элементы изображения с низкой пространственной частотой отклоняются на меньшие углы. Если мы хотим выделить мелкие детали в изображении, то необходимо в фокальной плоскости объектива 2' поместить непрозрачный экран с отверстием малого диаметра. Тогда экран будет препятствовать прохождению лучей, проходящих под малым углом, и тем отсекает элементы изображения с низкой пространственной частотой. В результате фильтрации элементы изображения с высокой пространственной частотой будут наблюдаться с большим контрастом. Если же пространственный фильтр будет выполнен в виде круговой апертуры, то элементы изображения с высокой пространственной частотой будут отфильтрованы. Выбор необходимой формы фильтра можно осуществить, используя электрически управляемый элемент 5. Можно изготовить фильтр более сложной формы и использовать его для идентификации изображений. Например, если объектом

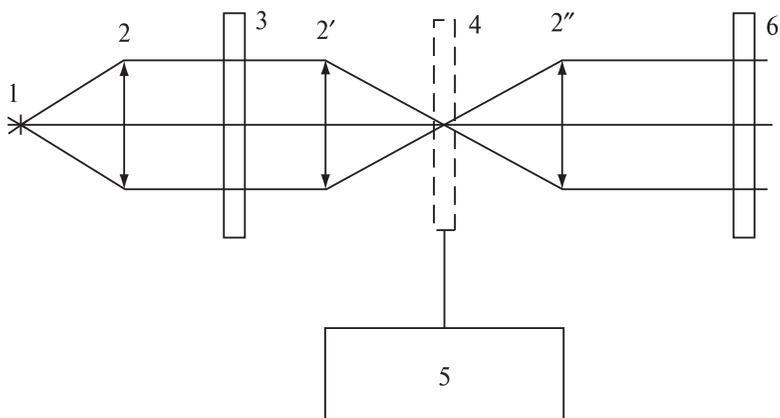


Рис. 12.30. Принципиальная схема оптической фильтрации: 1 — источник когерентного света; 2, 2', 2'' — линзы; 3 — объект; 4 — ОУТ, расположенный в плоскости Фурье образа объекта 3, создаваемого линзой 2; 5 — устройство управления фильтром; 6 — изображение после фильтрации

является текст, то используя фильтр, соответствующий Фурье образу некой буквы, мы немедленно установим расположение этой буквы в тексте на экране.

Одним из примеров применения оптической фильтрации служит автоматический контроль качества частей изделия. Пример выявления дефекта в стеклянном сосуде показан на рис. 12.31 [63]. Коллимированный пучок лучей от HeNe лазера поступает внутрь сосуда. Небольшой дефект сосуда, появившийся в результате удара на сборочном конвейере, рассеивает свет в большом конусе углов в направлении двумерного ОУТ. Линза проецирует Фурье образ в плоскость ОУТ. Вторая линза переносит изображение, прошедшее ОУТ, на CCD камеру. Свет, освещающий бездефектную часть сосуда, будет расположен в центральной части ОУТ, в то время как свет, рассеянный дефектами, будет расположен на периферии. Свет в центре плоскости Фурье образа значительно ярче, чем свет, вызванный дефектами. Изображение, создаваемое на CCD камере, фиксируется регистрирующим устройством и сохраняется в памяти персонального компьютера. Программа компьютера удаляет яркие и сохраняет менее яркие пиксели. После двойной обработки системой

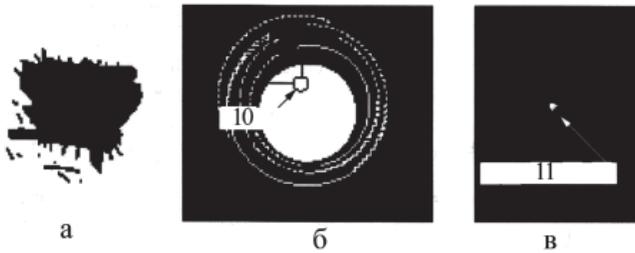
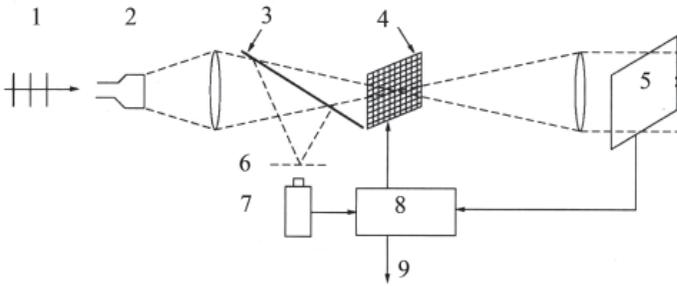


Рис. 12.31. Контроль качества стеклянных сосудов с использованием оптической фильтрации с помощью ОУТ: 1 — излучение; 2 — сосуд; 3 — разделитель лучей; 4 — ОУТ, расположенный в Фурье плоскости; 5 — изображение после фильтрации; 6 — экран; 7 — ССД камера; 8 — блок обработки изображений; 9 — выходной сигнал; а — дефект в образце; б — распределение интенсивности света в Фурье плоскости, где расположен ОУТ, 10-дефект; в — после фильтрации (выявленный дефект-11)

остаются только изображения от дефектов. Этот тип оптического процессора является адаптивным: изменяя изображения на ОУТ, мы можем проверять новые сосуды с различными дефектами.

## 12.6. Оконтуривание изображений

Оконтуривание изображений является важной операцией оптической обработки и распознавания образов. Для этой цели использовались различные ОА ПМС с гомеотропной ориентацией и положительной величиной анизотропии диэлектрической проницаемости НЖК [64]. В этом случае молекулы НЖК переориентируются за

счет неоднородности поля на границе изображений. Амплитуда отклонения определяется флексоэлектрическими характеристиками, пропорциональными градиенту электрического поля в ячейке. Однородные яркие области входных изображений определяются приложенным однородным полем и выглядят темными на выходе. Поворот директора вблизи границ изображений сопровождается локальным изменением двулучепреломления ЖК, визуализируемым считывающим излучением. Эти оконтуренные изображения показаны на рис. 12.32.

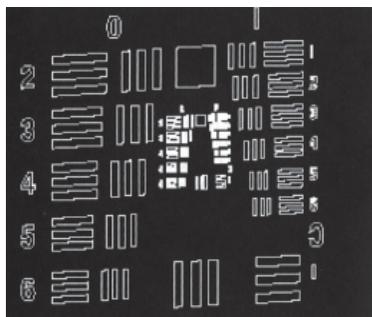


Рис. 12.32. Оконтуривание изображений, полученное при использовании ОУТ на основе структуры CdS-НЖК [64]

Оконтуривание изображений широко применялось ранее в научной галоидосеребряной фотографии с использованием эквиденситограмм при анализе изображений небесных тел или областей поверхности с одинаковой температурой в термографии на основе ХЖК. При использовании С\*ЖК необходимо создать такую геометрию переориентации директора, при которой осуществляется реакция слоя только на неоднородное поле. Это можно осуществить, используя управление биполярными импульсами [65] или использованием доменной стенки между двумя бистабильными ориентациями С\*ЖК в поверхностно стабилизированной геометрии [66].

### 12.7. Оптический процессор для выполнения операций Булевой алгебры

ОА ПМС эффективно используются при обработке двумерных оптических сигналов, например оптических изображений [67]. В частности, ОУТ на С\*ЖК успешно были использованы при выполнении логических операций, задач распознавания образов и выделения изображений движущихся объектов [62]. Впервые возможность параллельной оптической обработки двоичных изображений с использованием ОУТ была показана в работе [68]. В частности, все операции Булевой алгебры с двоичными изображениями можно осу-

существлять в реальном времени, используя трехступенчатый ОУТ, работающий в бистабильном двоичном режиме и позволяющий считывать изображения в коде «да–нет» в зависимости от полярности приложенного электрического импульса [69]. Схема оптического преобразования приведена на рис. 12.33. Система состоит из двух блоков МА и МВ, каждый из которых содержит ОУТ, работающий в бистабильном двоичном режиме, и блока MS, также содержащего ОУТ.

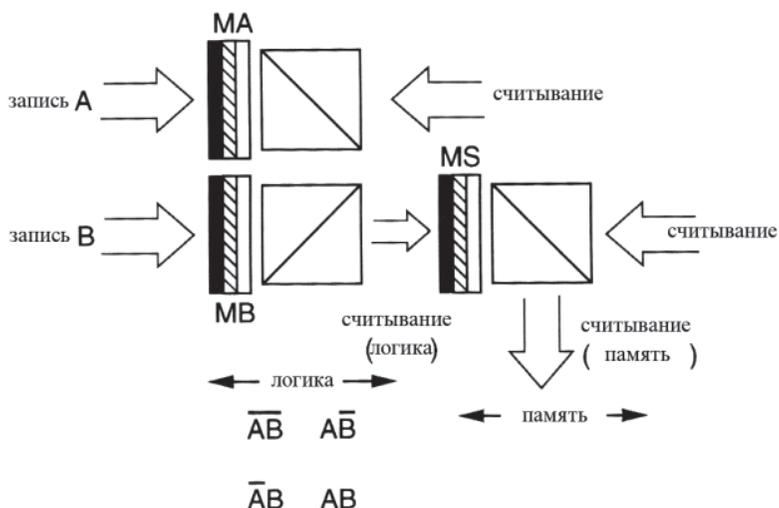


Рис. 12.33. Оптический процессор для выполнения операций Булевой алгебры между двоичными изображениями А и В

Два входных изображения А и В поступают на слой фотопроводников блоков МА и МВ. Изменением полярности стирающих и записывающих импульсов, подаваемых на эти блоки, получается 4 комбинации логических операций:  $\overline{AB}$ ,  $A\overline{B}$ ,  $\overline{A}\overline{B}$ ,  $AB$ , фиксируемых на совмещающем блоке в виде, зависящем от поданных импульсов. В общем случае, если  $T_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) являются логическими уровнями электрических импульсов на блоке MS, то выходное изображение можно описать как:

$$C = \overline{AB}T_0 + A\overline{B}T_1 + \overline{A}\overline{B}T_2 + ABT_3$$

Например, операция OR требует только фиксации на блоке MS операций  $AB$  и  $\overline{AB}$  и совершается за период двух сканирующих импульсов. Тем не менее, полное выполнение операции требует выполнения четырех сканирующих импульсов. После этого записывающий сигнал RC посылается на блок MS и суммарное изображение С считывается. Успешная работа компактного варианта этой системы, содержащего линзы фотокамеры для получения входного изображения, и лазерного диода в качестве считывающего элемента, была продемонстрирована в работе [70] (рис. 12.34). Пара двоичных изображений А и В представлены в виде черных (1) и белых

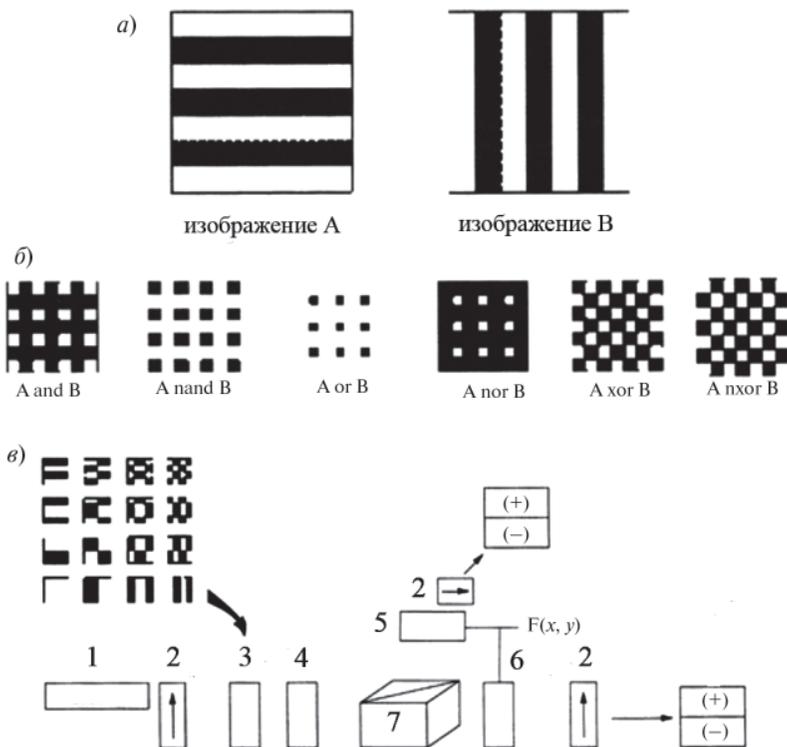


Рис. 12.34. Примеры операций, выполняемые с помощью ОУТ, и схема осуществления преобразований: 1 — лазер; 2 — поляризаторы; 3, 4, 5, 6 — ОУТ на ЖК; 7 — светоделительная призма [71]

(0) полос. Здесь же показаны результаты выполнения параллельных операций Булевой алгебры [71].

Булевы операции могут быть выполнены при использовании логики, где вертикальные и горизонтальные положения поляризации означают двоичные уровни 1 и 0 соответственно [72]. Этот вариант построения логики является более эффективным, чем кодирование, основанное на интенсивности сигнала. Изменение поляризации осуществлялось за счет использования твист-эффекта [73]. Это также можно осуществить использованием ОУТ на основе С\*ЖК [74]. Эти операции могут быть использованы для выполнения преобразований Уолша, Хаара и др. Для осуществления преобразований были разработаны жидкокристаллические телевизионные процессоры (рис. 12.34в). Здесь ТВ процессоры (3) и (4) формируют маски Уолша, а функция  $F(x, y)$  для анализа поступает на ТВ процессоры (5) и (6).

## 12.8. Оптические нейронные сети

Нейронные сети являются аналогом биологического метода осуществления вычислительных операций для обеспечения многочисленных переключений множества входов для более простой обработки информации [62]. Их можно выполнить в виде оптической системы. Параллелизм и скорость в обработке световых сигналов в оптических системах делает их перспективными в решении сложных задач переключений в нейронных сетях. Была показана возможность применения в этой области С\*ЖК [75–79]. Ключевым элементом, используемым в такой системе обработки, является адаптивный пиксел, обрабатывающий информацию с помощью модуляции света и дальнейшего преобразования [80–82]. По существу, адаптивный пиксел — это совокупность ОУТ, каждый из которых может включать комбинацию элементов памяти, чувствительных элементов, усилителей, пороговых элементов, элементов, выполняющих логические операции, и наконец, выходные элементы, основанные на использовании С\*ЖК. Адаптивные пиксели объединены в двухмерный массив и изготовлены в виде больших интегральных схем на кремнии. Пример схемы оптической нейронной сети Хопфилда показан на рис. 12.35. В этом случае каждый из пороговых детекторов света (нейронов) связан с соответствующим выходом матрицы переключателей. Переключения осуществляются благодаря оптической вектор-

матрице умножителей, использующей ОУТ. Он осуществляет исходя из весового фактора соединение различных входов и выходов (нейронов). Для обеспечения возможностей самоорганизации и обучения необходимо использовать ОУТ с высоким пространственным разрешением и широким динамическим диапазоном.

Обычно сеть из  $N$ -нейронов требует  $N^2 = 10^4 - 10^6$  переключений и ОУТ как нелинейный оператор должен выполнить следующую операцию [83]:

$$V(n) = [V_i(n)], [V_i(n+1) = f(TV(n))_i] \quad (12.12)$$

где  $V$  — матрица нейронов на  $n$ -шаге,  $T$  — вес переключений матрицы,  $f(x)$  — нелинейный пороговый оператор:

$$\begin{aligned} f(x) &= 1, \text{ если } x \geq t \\ f(x) &= -1, \text{ если } x < t, \end{aligned} \quad (12.13)$$

где  $t$  — порог переключения.

Вычисления осуществляются перемножением каждого входа на каждый процессор (узел) с учетом фактора веса, характеризующим силу связи между различными нейронами, с последующим суммированием согласно (12.12).

Полученная сумма сопоставляется с порогом и с каждого узла снимается выходное значение. Нелинейная пороговая операция моделирует механизм принятия решения. Этот гибридный оптико-нейронный компьютер обучается введением ряда тестов в виде одномерных векторов (матрицы)  $[V_0,]$ , для которой ожидаемые сигналы на выходе известны и установочные веса переключений к ожидаемым выходам воспроизводимы. Поскольку веса могут настраиваться, нейронная сеть может обучаться и готова к приему неизвестных внешних входных векторов.

Оптическая технология, благодаря возможности параллельной обработки сигналов, подходит для создания нейронных сетевых процессоров. Такая система требует использования оптических источников, приемников и ОУТ. Двухмерная  $N \times N$  нейронная сеть была создана на основе массива линз для создания изображений для обеспечения весовой матрицы и ОУТ на С\*ЖК в качестве входного устройства (рис. 12.35б). Массив линз осуществляет взаимосвязь между весовой матрицей  $T$  и входным изображением. Выходной сигнал с видеомонитора подается на CCD камеру и далее посылается в пороговую цепь. Окончательный результат получается с использованием обратной связи с видеомонитором и отображается с поправ-

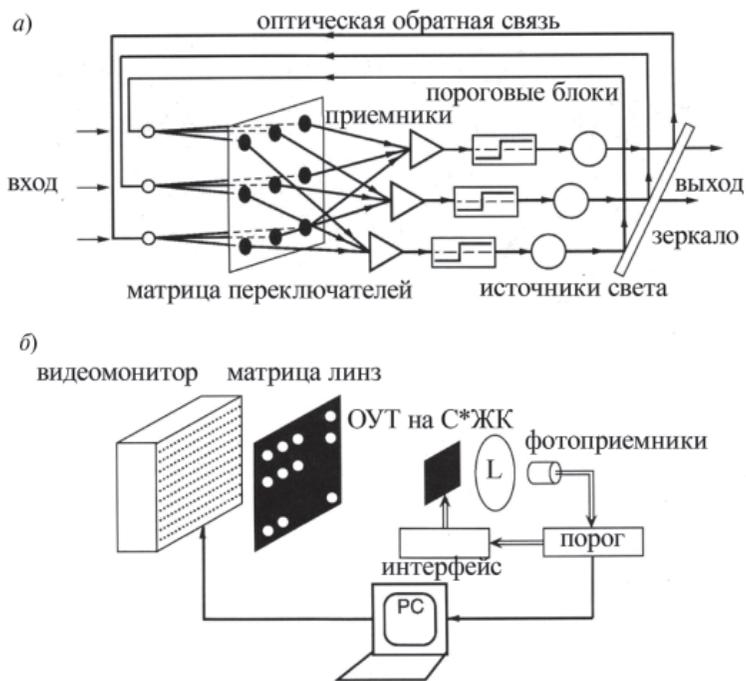


Рис. 12.35. Схема оптической нейронной сети

ками, выполненными персональным компьютером при последующей итерации. Разработанная адаптивная компактная нейронная сеть позволила производить распознавание образа и осуществлять операцию по его реконструкции. Скорость обработки позволяет выполнять  $3 \cdot 10^6$  операций/сек.

### 12.9. Модуляторы для защиты наблюдателя от слепящих источников излучения

Для наблюдательных приборов (телескопов, биноклей, дальномеров, визиров, прицелов, микроскопов и др.) и регистрирующих устройств (теле-, фото-, кино- и видеоаппаратуры) актуальна защита глаз наблюдателя или фотоприемника от слепящих объектов или

мощных источников излучения. Особенно нежелательны внезапные световые воздействия, возникающие, например, при выполнении сварочных работ, лазерных засветках и управлении транспортными средствами, когда наблюдение за слабо освещенными объектами производится на фоне слепящих источников. Наибольшую опасность представляет повреждение сетчатки глаза. Характер повреждения зависит от длины волны, энергии, длительности, размеров и зоны воздействия светового импульса. Для импульсного лазерного излучения с малым сечением пучка и длительностью импульса  $10^{-9}$  с допустимая пороговая мощность составляет 1–2 мкДж/с, а импульсы с длительностью более  $10^{-9}$  с приводят к ожогам сетчатки [84].

Первоначально для защиты глаза наблюдателя использовались статические ослабители: закопченные стекла, цветные или нейтральные фильтры, поляризационные очки, снижающие яркость источников на постоянную величину независимо от уровня и распределения освещенности в поле зрения. Они обеспечивали ослабление воздействия, но создавали дискомфорт при его отсутствии из-за низкого контраста слабо освещенных объектов.

Этого недостатка лишены динамические ослабители, заменившие статические: они приводятся в действие пороговым устройством, настроенным на определенный уровень освещенности. Известны динамические ослабители на основе фотохромных стекол, электрооптической керамики и ЖК [85]. Высокая инерционность фотохромных стекол [86] и потребность в высоковольтных источниках питания для сегнетокерамики [87] дают преимущества ослабителям света на основе жидкокристаллических элементов (ЖКЭ).

Интерес к проблеме светового ограничения вызван появлением новых сред с нелинейными оптическими эффектами. Для них характерно резкое падение прозрачности при росте интенсивности воздействующего излучения. К таким эффектам относятся нелинейное поглощение, обусловленное протекающими в возбужденном состоянии фотореакциями, и изменение траектории проходящего пучка, вызванное индуцированным искажением фазового профиля системы (самодифракция, вынужденное рассеяние, самофокусировка). Перспективно использование примесных ЖК, проявляющих нелинейные свойства в мезофазе, твердых пленках и пористых структурах. В них пороги возникновения нелинейных эффектов ниже, чем во всех известных нелинейных материалах [88].

### 12.9.1. Динамические ослабители на основе ЖК с модуляцией излучения по всему полю зрения

В первых динамических ослабителях на ЖК использовался твист-эффект, обладающий большим быстродействием по сравнению с фотохромными стеклами и меньшей величиной управляющего напряжения по сравнению с сегнетокерамикой. На основе ячеек с твист-эффектом был изготовлен ряд светозащитных шлемов для сварки (рис. 12.36), эксплуатационные характеристики которых приведены в табл. 12.4 [89].

Наружный вид светозащитного шлема для сварки показан на рис. 12.36а, б.

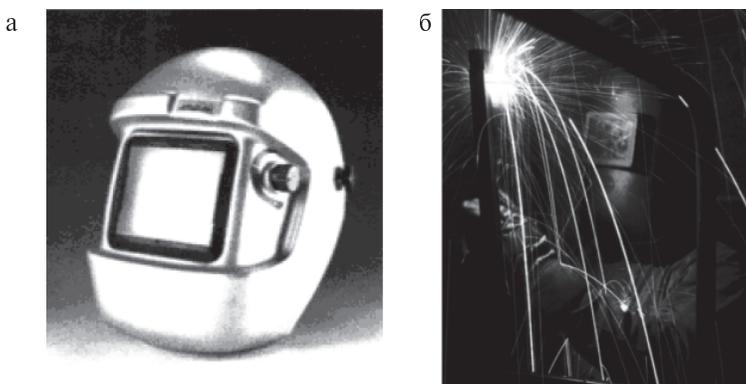


Рис. 12.36. Сварочная маска фирмы «Тесла» на основе ЖКЯ с твист-эффектом, осуществляющим модуляцию излучения по всему полю зрения

Таблица 12.4

#### Эксплуатационные характеристики светозащитных шлемов

Параметр	«Спид-гласс» Хернелл, Швеция	«Солар-матик» Оптел, Швеция	Маска, Тесла, Чехословакия	«Хамелеон» ИЛИТ, Россия [90]	НИИ «Волга» Россия [91]
Размер светового окна, мм	110×48 90×12 150×175	95×40	92×35	94×42	99×47

Параметр	«Спид- гласс» Хернелл, Швеция	«Солар- матик» Оптел, Швеция	Маска, Тесла, Чехосло- вакия	«Хамелеон» ИЛиТ, Россия [90]	НИИ «Волга» Россия [91]
Глубина моду- ляции, ед. DIN	5–13	7–13	5–10(11)	8–14	9–13
Исходное свето- пропускание, % $\lambda = 212\text{--}365 \text{ нм}$ $\lambda = 780\text{--}1400 \text{ нм}$ $\lambda = 400\text{--}650 \text{ нм}$	—	$<3,5 \times 10^{-6}$ $<6 \times 10^{-3}$ $<6 \times 10^{-3}$	—	$>1 \times 10^{-4}$ $>1 \times 10^{-2}$ $>8 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-2}$
Время срабаты- вания, мс при $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ при $23 \text{ }^\circ\text{C}$ при $55 \text{ }^\circ\text{C}$	1,4 0,9 0,6	8 2 <1	—	1,5 0,5 0,3	1 0,3
Температурный диапазон, $^\circ\text{C}$	$-5 \dots +65$	$-5 \dots +65$	$+10 \dots +50$	$-5 \dots +55$	$-5 \dots +55$
Вес ЖКМ с маской, г	450(650)	390	—	400(500)	—
Напряжение питания, В	12	—	9	3	9

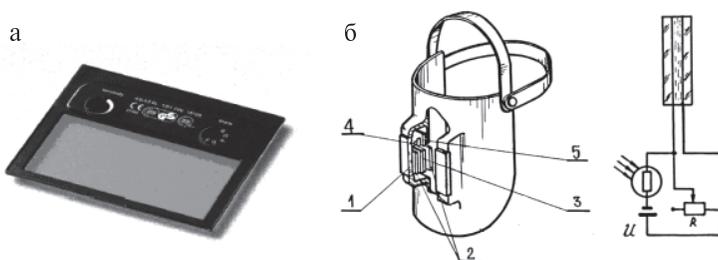


Рис. 12.37. а — светозащитный блок [92]; б — схема светозащитного шлема для сварки: 1 — защитное стекло; 2 — поляридные пленки; 3 — ЖКЭ; 4 — фоторезистор; 5 — источник питания

Схема светозащитного шлема для сварки упрощенно показана на рис. 12.37а, б. Светозащитный блок содержит защитное стекло 1, поляроидные пленки 2, ЖК элемент (ЖКЭ) 3, фоторезистор 4 и источник питания 5. Схема управления состоит из источника питания  $U$ , фоторезистора  $\Phi P$  и переменного сопротивления  $R$  для регулировки яркостного порога включения ЖКЭ. Недостатками этих устройств являются невысокое быстродействие и не селективная по углу модуляция слепящих объектов, а всего поля зрения. Эти недостатки можно устранить использованием быстродействующих модуляторов, осуществляющих локальную светозащиту от слепящих источников.

### 12.9.2. Динамические ослабители на основе ЖКЭ с локальной модуляцией

Обычно требуется ослаблять интенсивность излучения слепящих объектов, в то время как другие объекты желательно не затемнять. На рис. 12.38 приведен пример решения этой задачи [93].

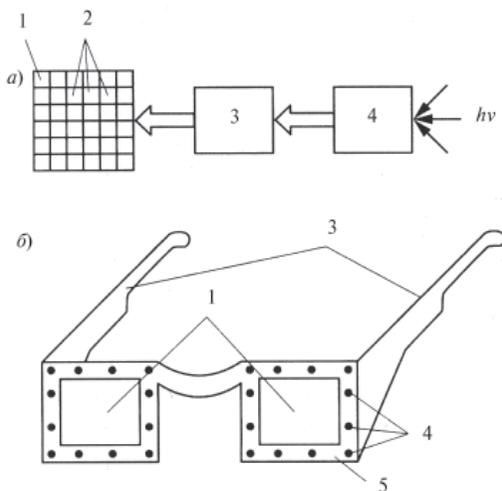


Рис. 12.38. Матричные очки на ЖК с локальной модуляцией излучения: а — принципиальная схема; б — наружный вид: 1 — фильтр; 2 — матрица ЖК элементов; 3 — блок управления; 4 — фотоприемники; 5 — оправа [93]

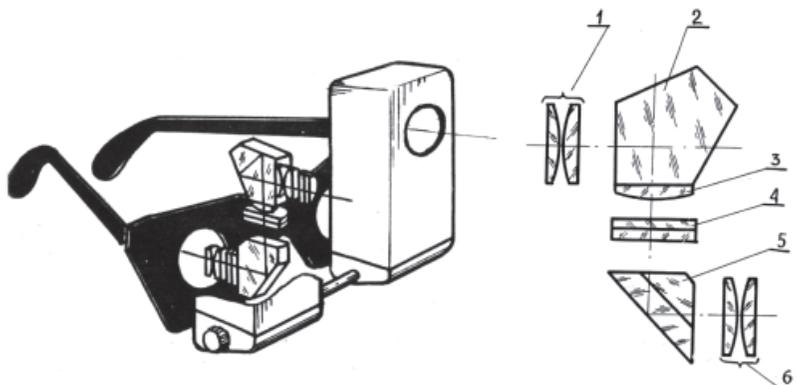


Рис. 12.39. Общий вид светозащитных очков с локальным ослаблением интенсивности излучения и их оптическая схема: 1 — объектив; 2 — пентапризма; 3 — коллективная линза; 4 — ОУТ на основе ЖК; 5 — прямоугольная призма; 6 — окуляр [94, 95]

Противоослепляющие очки содержат пару фильтров 1, размещенных в оправе 5. Чем выше освещенность на каком-либо из фотоприемников, тем больше ослабление света осуществляется ближайшим по расположению ЖКЭ. Устройство является простым, но технически не обеспечивает защиту наблюдателя от слепящих объектов при их относительном движении. Для эффективного решения задачи были разработаны автоматические защитные очки с локальной модуляцией слепящего излучения, основанные на использовании в схеме ЖК ОУТ. Подбором рабочего напряжения ОУТ настраивают на пороговую освещенность, выше которой осуществляется локальная модуляция света. При этом остальные зоны остаются незатемненными. ОУТ может содержать прозрачные для определенных длин волн или непрозрачные фотопроводники. Это определяет особенности устройств, работающих на просвет или отражение. На рис. 12.39 приведена оптическая система защитных очков, работающих на просвет, с локальным автоматическим ослаблением интенсивности излучения.

Каждый канал состоит из бинокулярной телескопической системы прямого изображения с однократным увеличением, состоящей из объектива 1, пентапризмы 2, коллективной линзы 3, ОУТ 4, прямоугольной призмы 5 и окуляра 6. ОУТ располагается в фокальной плоскости объектива телескопической системы. В качестве фотопроводников были выбраны монокристаллические слои GaP, а также

монокристаллические и поликристаллические слои ZnSe [94, 95]. В ПМС использовался материал ЖК807 с оптически активными добавками на основе производных l-ментола и тигогенинкапроната, а также нематическая смесь ЖК1282 разработки НИИОПиК. Основные параметры смеси:  $\Delta\epsilon = 9,9$ ;  $\Delta n = 0,189$ . Исследования макета подтвердили эффективность принципа, но выявили два недостатка. Во-первых, использование двух ПМС в одном устройстве превысило его допустимую стоимость для массового производства и реализации. К тому же разброс параметров не обеспечивал без регулировки идентичности модуляции для левого и правого глаза по быстродействию и контрасту. Во-вторых, твист-эффект не обладает достаточным быстродействием, что вызывает ослепление наблюдателя в первый момент вспышки, а также послеракурсовый смаз изображения при движении слепающего объекта.

В модификации очков идентичность работы обоих каналов обеспечивается одним ОУТ (рис. 12.40).

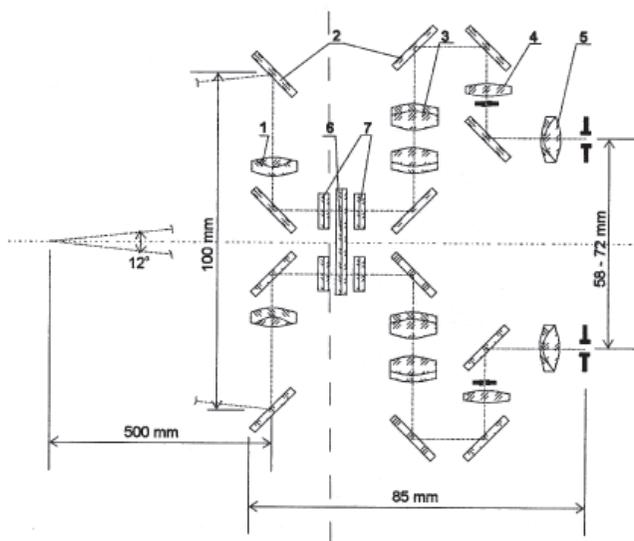


Рис. 12.40. Модификация оптической схемы модулятора с одним ПМС, работающим на просвет: 1 — объектив; 2 — система зеркал; 3 — линзовая оборачивающая система; 4 — линза; 5 — окуляр; 6 — ОУТ; 7 — поляриды

Для создания прямого изображения оптическая схема построена по принципу зрительной трубы и содержит объектив 1, систему зеркал 2, линзовую оборачивающую систему 3, линзы 4 и окуляр 5. ОУТ, работающий на два канала, располагается в фокальной плоскости объектива 1 между поляроидами 7. Схема позволила исключить пентапризму, облегчить конструкцию и уменьшить габариты.

Оптические системы с ОУТ, работающие на отражение, предпочтительнее по соображениям безопасности для надежной защиты глаз наблюдателя от внезапного воздействия лазерного излучения. Пример такой системы приведен на рис. 12.41. Она содержит объектив 1, волоконно-оптический конвертор 2, ОУТ 3, работающий на отражение, полупрозрачное зеркало 4, размещенные на шлеме 5. ОУТ содержит непрозрачный фотопроводниковый слой 6 на основе кремния и диэлектрическое зеркало 7 [95]. Оптическая система формирует на фотопроводниковом слое 6 распределение потенциала, которое визуализируется с помощью слоя НЖК и считывается при воздействии внешнего излучения или светодиода. К недостаткам описанной системы можно отнести некоторую искусственность изображений наблюдаемых сцен, формируемых дополнительным источником.

Значительные габариты и вес требуют использования на шлеме противовеса. Последнее обстоятельство может быть в значительной

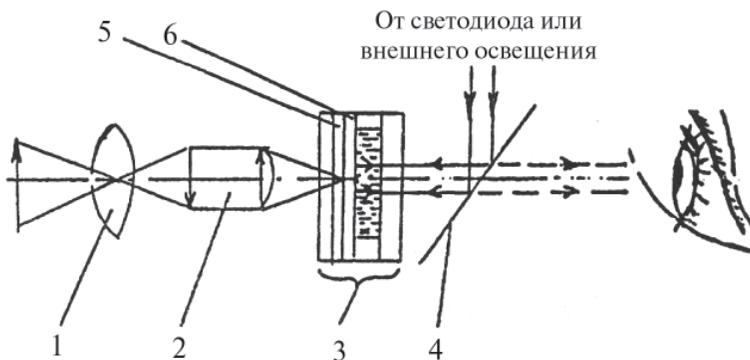


Рис. 12.41. Оптическая схема модулятора с ОУТ, работающего на отражение: 1 — объектив; 2 — волоконно-оптический конвертор; 3 — ОУТ; 4 — полупрозрачное зеркало; 5 — фотопроводниковый слой; 6 — диэлектрическое зеркало [96]

степени устранено за счет использования «свернутой оптики», которая обладает повышенной компактностью, большей базой бинокулярного зрения и повышенной защищенностью от внезапных импульсных излучений [91]. Для облегчения конструкции можно использовать голографические зеркала. Характеристики модифицированных очков с локальной модуляцией излучения, работающих на отражение, приведены в таблице 12.5 [97].

Таблица 12.3

### Характеристики модифицированных очков

Увеличение	$1^{\times}$
Поле зрения	$24^{\circ}$
Угловое разрешение	$1'$
Напряжение/ток	15 В/5мк А
Исходное светопропускание	$>0,1$
Светопропускание при напряжении 15 В	0,001
Спектральный диапазон светочувствительности	0,4–0,6 мкм
Спектральный диапазон светопропускания	0,5–2 мкм
Пороговая освещенность	5 люкс
Времена включения/выключения при $t = 20^{\circ}\text{C}$ , $U = 15\text{ В}$ и освещенности 100 люкс	0,001/0,05 с

Анализ параметров показал существенное уменьшение времен включения и выключения ОУТ на основе С\*ЖК, однако выявил малую величину его светопропускания (10–15%), объясняемую малой величиной углов переключения С\*ЖК. Для структуры с малым шагом геликоида и большой величиной спонтанной поляризации углы переключения составляли  $\pm 45^{\circ}$ . Использование поляризованного света вызывает оптические потери, превышающие 50%. Поэтому представляет интерес локальная модуляция неполяризованного излучения (рис. 12.42) [96–100]. Входной неполяризованный луч света 3 от слабо освещенного объекта 2 и слепящего объекта 1 падает на поляризационный расщепитель лучей 5 и создает изображения этих объектов с помощью линзы 4 в фокальной плоскости 15. Проходя через блок 5, луч 3 разделяется на лучи 6 и 7 с ортогональной поляризацией света. После отражения зеркалами 8 и 9 лучи распространяются параллельно, проходя через модулятор и ОУТ со

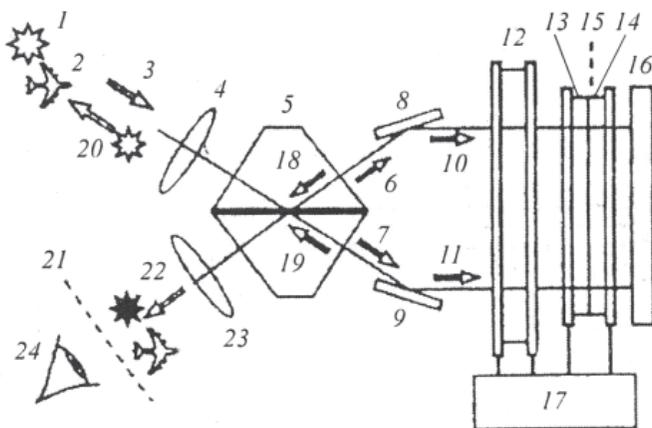


Рис. 12.42. Оптическая схема модулятора с ОУТ работающим с неполяризованным излучением: 1 — спящий объект; 2 — слабо освещенный объект; 3 — луч света от объектов; 4 — линза 5 — поляризационный расщепитель лучей; 6, 7 — лучи с ортогональной поляризацией; 8, 9 — зеркала; 10, 11 — лучи, поляризованные в плоскостях, расположенных под углом  $45^\circ$  друг к другу; 12 — модулятор; 13, 14 — слои С\*ЖК и фотопроводника; 15, 16 — зеркала; 17 — источник питания; 18, 19 — смешиваемые лучи света; 20 — направление распространения света от спящего объекта; 21 — фокальная плоскость линзы 23; 22 — направление распространения луча от слабо освещенного объекта; 24 — наблюдатель

слоем С\*ЖК и фотопроводником 14. Отражившись от зеркала 16, оба луча вторично проходят через ПМС и модулятор 12 и сводятся в расщепителе 5. Отражатели 8 и 9 осуществляют полное внутреннее отражение, а входные лучи идут нормально к призме Дове. Лучи 10 и 11 оказываются поляризованными в плоскостях, расположенных под углом  $45^\circ$  друг к другу. Оба луча после смешивания в расщепителе 5 распространяются в направлении 20, если слои С\*ЖК 12 и 13 имеют соответственно оптическую задержку  $\lambda/2$  и  $\lambda/4$ , а их директор ориентирован либо в плоскости рисунка, либо отклонен от нее на углы  $-22,5^\circ$  или  $+45^\circ$  [69, 97]. Это возможно, если ОА ПМС имеет угол переключения директора  $\pm 22,5^\circ$ , а ячейка 12 — угол перориентации директора  $\pm 11,25^\circ$ . При высоком уровне освещенности в фокальной плоскости 15, совпадающей с фотопроводниковым слоем 14, переменный электрический сигнал, подаваемый на оба

C\*ЖК слоя от источника 17, вызывает полное переключение директора в слое 13 благодаря перераспределению напряжения в сильно освещенных зонах. При низком уровне освещенности и условии, что слой 13 обладает электрооптическим эффектом деформации спирали, директор переориентируется на угол  $+22,5^\circ$  относительно плоскости рисунка. В этом случае лучи 18 и 19 смешиваются в расщепителе так, что результирующий неполяризованный луч идет в направлении 22, создавая изображения обоих объектов в фокальной плоскости 21 линзы 23. В результате луч от сильно освещенного объекта возвращается в направлении 20, а луч от слабо освещенного объекта направляется к наблюдателю, не ослепляя его. Этим осуществляется селекция потоков при наблюдении слабо освещенного объекта на фоне слепящего объекта. При использовании электроклининого эффекта была обеспечена модуляция с частотой 50 кГц [98].

Устройство для защиты глаза от лазерного излучения на различных длинах волн предложено в работе [101]. Оно основано на использовании различных светофильтров, основанных на перестраиваемых эталонах Фабри-Перо, создающих каскадную систему защиты при воздействии слепящего излучения в различных диапазонах спектра.

Завершая рассмотрение ЖК модуляторов в оптических устройствах, следует отметить возможность использования для этих целей ЖК-дисплеев. Примером может служить применение ЖК-дисплеев на кремнии для создания адаптивных дифракционных элементов [102].

## Литература к главе 12

1. *Васильев А.А., Касасент Д., Компанец И.Н., Парфенов А.А.* Пространственные модуляторы света. М. Радио и связь. 1987. 320 с.
2. *Васильев А.А.* Управляемые жидкокристаллические прозрачные для устройств преобразования и кодирования оптических сигналов // Труды ФИАН им. П.Н. Лебедева. 1981. Т. 126. С. 3–75.
3. *Optical Data Processing. Applications / Ed. by D. Casasent. N.-Y. 1978. Topics in Applied Physics. 286 p.*
4. *Владимиров Ф.Л., Чайка А.Н., Моричев И.Е., Плетнева Н.И., Наумов А.Ф., Локтев М.Ю.* Исследование модуляционных характеристик ОУТ на основе структуры ФП-ЖК // Опт. журн. 2000. Т. 67. № 8. С. 14–19.
5. *Collings N., Pourzand A.R., Vioel R.* Construction of programmable multilayer analogue network using space invariant interconnects // Proceed. SPIE. 1995. Vol. 2565. P. 40–47.

6. *Saxena I., Fiesler E.* Adaptive multilayer optical neural network with optical thresholding // Opt. Engin. 1995. Vol. 37. № 8. P. 2435–2440.
7. *Collings N., Pourzand A.R., Vladimirov F.L.* et al. The construction of multilayer analogue neural network using LC SLMs // Optical memory and neural networks. 1997. № 6. P. 187–198.
8. *Irion A.* Fuzzy rules and fuzzy functions. A combination of logic and arithmetic operation for fuzzy numbers // Fuzzy Sets & Systems. 1998. Vol. 99. P. 49–65.
9. Spatial Light Modulator Technology: materials, devices and applications / Ed. by Efron U. N.-Y.: Marcel Dekker Inc. 1994. 665 p.
10. *Павлов А.В.* Применение голографических корреляторов при построении нечетких систем // Опт. журн. 1997. Т. 64. № 7. С. 8–16.
11. *Павлов А.В.* Построение алгебры нечетких чисел методами оптической голографии // Опт. журн. 1998. Т. 65. № 2. С. 17–32.
12. *Pavlov A.V.* Holographic processor for arithmetic of fuzzy numbers // Optics in Computing. 1998. 17–20 June, Brugge, Belgium. P. 7–11.
13. *Pavlov A.V., Chaika A.N., Vladimirov F.L.* Holographic realization of fuzzy arithmetic // Proceed. of Int. Conf. «Soft computing and measurement». St.-Petersburg, 20–23 June. 1998. P. 121–129.
14. *Pavlov A.V.* Construction of fuzzy numbers algebra by optical holographic technique // Proceed. of Int. Conf. on Neuro-Inf. Processing, ICONJP'97. Dunedeed. New Zeland. 1997. P. 473–478.
15. *Vladimirov F.L., Pletmeva N.I., Morichev I.E., Chaika A.N.* SLMs based on the photoconductor-LC structures for optical data processing applications // Proceed. of the 19-th IDRC «Eurodisplay'99». Sept. 6–9. 1999. Berlin, Germany. P. 175–178.
16. *Владимиров Ф.Л., Грознов М.А., Корнев М.А., Любимов В.В., Морозова Е.Е., Моричев И.Е., Мыльников В.С., Орлов С.Ю., Покровский В.П., Решетникова Т.О., Сомс Л. Н.* ЖК модуляторы света – устройства для управления распределением интенсивности лазерного излучения // В сб. Труды ГОИ «Оптика жидких кристаллов». 1991. Т. 60. Вып. 194. С. 73–81.
17. *Владимиров Ф.Л., Моричев И.Е.* Оптически управляемые транспаранты на основе структуры ФП-ЖК // В книге: Пространственные модуляторы света для оптической обработки информации / Под. ред. С.Б. Гуревича. Л. ФТИ. 1987. С. 8–16.
18. *Moddel G., Johnson K.M., Li W., Rice R.A., Pagano-Stauffer L.A., Handschy M.A.* // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 55. P. 537–539.
19. *Kriezis E.E., Parry-Jones L.A., Elston S.J.* Optical properties and applications of ferroelectric and antiferroelectric LCs / Ed. by L. Vicary in Optical Application of Liquid Crystals. IOP Publishing Ltd. 2003. 284 p.
20. *Berenberg V.A., Venediktov V. Yu., Ivanova N. L., Isaev M. V., Konshina E. A., Fedorov M. A., Onokhov A. P., Chaika A. N., Feoktistov N. A.* Large-aperture optically addressed spatial light modulator development. Proc. SPIE. XV

Intern. Symp. on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers. 2005. Vol. 5777. P. 711–715.

21. *Berenberg V.A., Ivanova N.L., Isaev M.V., Konshina E.A., Onokhov A.P., Fedorov M.A., Chaika A.N., Feoktistov N.A.* Phase reflective OA LC SLM with clear aperture up 50 mm for recording dynamic holographic grating with high-diffraction efficiency // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4825. P. 198–206.

22. *Berenberg V.A., Chaika A.N., Ivanova N.L., Onokhov A.P.* Phase OA LC SLMs for record of thin dynamic holographic correctors with diffraction efficiency over 50% // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4493. P. 239–244.

23. *Беренберг В.А., Венедиктов В.Ю.* Формирование тонких динамических голографических решеток с дифракционной эффективностью, близкой к 100%, в оптической системе с обратной связью // Оптический журнал, 2001. Т. 68. № 9. С. 34–41.

24. *Berenberg V.A., Gruneisen M., Venediktov V. Yu.* Blazed dynamic holograms and their application to correction of distortions in laser systems // Proc. SPIE, 2002, Vol. 4760. P. 603–608.

25. *Percheron I, Baker J.T., Gruneisen M., Martinez T., Wick D.* Blazed holographic optical aberration compensation // Proceedings of the 2nd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine. Ed. by Gordon D. Love. World Scientific, Singapore – New Jersey – London – Hong Kong. 1999. P. 384–387.

26. *Wick D.V., Martine T., Wood M.V., Wilkes J.M., Gruneisen M.T., Berenberg V.A., Vasil'ev M.V., Onokhov A.P., Beresnev L.A.* Deformed-helix ferroelectric LC SLM that demonstrates high diffraction efficiency and 370-line pairs/mm resolution // Appl. Opt. 1999. Vol. 38. P. 3798–3803.

27. *Petillot Y., Guibert L., Bourgenet de la Tocnaye J.L.* // Optic. Com. 1996. Vol. 126. P. 213–219.

28. *Onokhov A.P., Beresnev L.A., Dultz W., Ivanova N.L., Chaika A.N., Gro-madin A.L., Haase W.* Optically addressed SLM using deformed helix FLCs // Abstracts of 16-th ILCC. Kent, Ohio. USA. 1996. P.140. C1P.60.

29. *Beresnev L.A., Dultz W., Onokhov A.P., Haase W.* Optical limiting devices based on photo addressing spatial light modulators using FLCs // Abstracts of 16-th ILCC. Kent, Ohio. USA. 1996. P. 141. C1P. 61.

30. *Berenberg V.A., Beresnev L. A., Chaika A. N., Gruneisen M. T., Haase W., Leshchev A. A., Onokhov A. P., Vasil'ev M. V., Venediktov V.Yu.* FLC optically addressed modulators for dynamic holographic correction of optical distortions // Ferroelectrics. 2000. Vol. 246. P. 247–258.

31. *Gruneisen M.T., Peters K.W., Wilkes J.M.* Compensated imaging by real-time holography with OA LC SLMs // Proc. of SPIE. 1997. Vol. 3143. P. 171–181.

32. *Gruneisen M.T., Martinez T, Lubin D.L.* Dynamic holography for high-dynamic-range two-dimensional laser wavefront control // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4493. P. 224–238.

33. *Gruneisen M.T., DeSandre L.F., Rotge J.R., Dymale R.C., Lubin D.L.* Telescope with wavelength-agile diffractive wavefront control // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5162. P. 172–182.

34. *Berenberg V.A., Leshchev A.A., Soms L.N., Vasil'ev M.V., Venediktov V.Yu., Onokhov A.P., Beresnev L.A.* Polychromatic dynamic holographic one-way image correction using LC SLMs // *Optics Commun.* 1999. Vol. 166. P. 181–188.
35. *Berenberg V.A., Leshchev A.A., Semenov P.M., Vasil'ev M.V., Venediktov V.Yu.* Correction of telescope's primary mirror using dynamic holography in OA LC SLM // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2000. Vol. 351. P. 9–16.
36. *Беренберг В.А., Онохов А.П.* Оптические адресуемые жидкокристаллические пространственные модуляторы света для записи голограмм-корректоров в наблюдательных оптических системах // *Оптический журнал*, 2001. Т. 68, № 9. С. 42–47.
37. *Ahiyama K., Takimoto A., Ogivara A., Ogawa H.* Hydrogenated amorphous silicon carbide photoreceptor for photo addressed SLM / *Jpn. J. Appl. Phys.* 1993. Part 1. Vol. 32. P. 590–599.
38. *Ivanova N.L., Feoktistov N.A., Chaika A.N., Onokhov A.P., Pevtsov A.B.* OA SLM with highly sensitive layer of amorphous hydrogenated silicon carbide // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1996. Vol. 282. P. 315–322.
39. *Беренберг В.А., Венидиктов В.Ю., Лецев А.А., Сомс Л.Н.* Коррекция aberrаций объективов в широком спектральном интервале при помощи жидкокристаллического светоправляемого пространственного модулятора света // *Опт. журн.* 1997 Т. 64. №9. С. 73–74.
40. *Berenberg V.A., Leshchev A. A., Soms L. N., Vasil'ev M. V., Venediktov V.Yu., Onokhov A. P., Beresnev L. A.* Polychromatic dynamic holographic one-way image correction using liquid crystal SLMs // *Opt. Commun.*, 1999, Vol. 166. P. 181–188.
41. *Беренберг В.А., Венидиктов В.Ю., Лецев А.А., Семенов П.М., Венидиктов В.Ю.* Наблюдательная светосильная телескопическая система с голографической коррекцией искажений главного зеркала, работающая в широком спектральном диапазоне // *Опт. журн.* 1998 Т. 65. № 12. С. 70–75.
42. *Владимиров Ф.Л., Грознов М.А., Еременко А.С., Ланькова С.М., Моричев И.Е., Мыльников В.С., Любимов В.В., Морозова В.А., Орлов С.Ю., Покровский В.П., Сомс Л.Н.* Преобразование оптических сигналов в лазере с пространственно-временными модуляторами света типа ФП-ЖК // *Квантовая электроника*. 1985. Т. 12. № 10. С. 2071–2076.
43. *Корнев А.Ф., Покровский В.П., Сомс Л.Н., Ступников В.К.* Лазерные системы с внутренним сканированием // *Опт. журн.* 1994. № 1 С. 10–25.
44. *Hardy W.A.* Active image formation in laser // *IBM Journal of Research and Development*. 1965. Vol.9. P. 31.
45. *Kasaryan M.A., Kruzhalov S.V., Mokrushin Y.M., Parfenov V.A., Shakin O.V.* Color TV large screen imaging system based on the pulsed metal vapor lasers // *Techn. Digest of the IX-th Int. Conf. «Laser Optics»*, St. Petersburg, 1998, Abstract A5.
46. *Носова Л.В.* Моды и потери сопряжённого резонатора при разъюстировках // *Опт. и спектр.* 1987. Т. 62. С. 866–871.

47. Любимов В.В., Носова Л.В. Влияние неполного контраста управляющего транспаранта на моды сопряжённого резонатора // Опт. и спектр. 1991. Т. 70. С. 178–181.
48. Myers R.A., Pole R.V. The Electron Beam Scanlaser: Theoretical and Operational Studies // IBM Journal of Research and Development. 1967. Vol. 11. P. 502–510.
49. Welch A.B., Burzlaff B., Cunningham W. Electronically scanned coherent CO<sub>2</sub> laser radar techniques. // Proc. SPIE. 1981. Vol. 300. P. 153.
50. Firehammer J. A., Lawandy J. A., Crawford G. P. Image mode laser concept: materials and applications // Advanced Materials. 1999. Vol. 11. P. 417–420.
51. Vladimirov F.L., Pletneva N.I., Morichev I.E., Pokrovskiy V.P., Soms L.N. Liquid crystal modulators with improved laser damage resistance // Proceeding of SPIE. 1998. Vol.3682, Laser Optics'98. Solid State Lasers. P. 176–182.
52. Bagrov I.V., Gryaznova M.V., Danilov V.V., Zhevlyakov A.P., Sosnov E.N., Tul'skii S.A. Liquid crystal modulators as laser-optics elements for the middle IR range // Opt. and spectr. 1999. Vol. 87. № 5. P. 779–789.
53. Danilov O.B., Danilov V.V., Sidorov A.I. et al. Intracavity wide- angle beaming in mid-IR gas lasers // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3268. P. 345.
54. Корнев А.Ф., Покровский В.П., Сомс Л.Н., Ступников В.К. Сканирующий лазер с усилительной системой // Известия АН СССР, сер. Физическая. 1991.Т. 55. № 2. С. 298–302.
55. Kornev A.F., Pokrovskiy V.P., Soms L.N., Stupnikov V.K., Venediktov V.Y. Conjugated Cavity with the Wide Field of Vision // NATO Advanced Research Workshop «Optical Resonators — cience and Engineering» // Smolenice Castle, Slovak Republik. 1988. July 1–5. P. 46.
56. Kornev A., Onokhov A., Pokrovskiy V., Soms L.N., Stupnikov V.K. Diode Pumping Solid State Laser with 2D Intracavity Beam Scanning Using Liquid Crystal Spatial Light Modulator // Proceeding of SPIE.1998. Vol.3682. «Laser Optics'98, Solid State Lasers» P. 63–73.
57. Kornev A.F., Pokrovsky V.P., Soms L.N., Stupnikov V.K., Tomilin M.G. New concept of combined laser-SLM projection display // Proc. 20 IDRC. 2000. Palm Beach, Florida, USA. P. 108–110.
58. Turner R.M., Jared D.A., Sharp G.D., Johnson K.M. // Appl. Opt. 1993. Vol. 32. P. 3094–3101.
59. Wilkinson T.D., Petillot Y., Mears R.J., Bourgenet de la Tocnaye J.L. // Appl. Opt. 1995. Vol. 34. P. 1885–1890.
60. Keryer G., Bourgenet de la Tocnaye J.L., Falou A.I. // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. P. 3043–3055.
61. Petillot Y., Guibert L., Bourgenet de la Tocnaye J.L. // Optic. Com. 1996. Vol. 126. P. 213–219.
62. Chigrinov V.G. Liquid crystal devices. Physics and applications. Artech House. 1999. 357 p.
63. Clark N.A., Johnson K.M. Application of LCs in optical computing / In Liquid Crystals: Application and Uses (edited by B. Bahadur). Singapore, World Scientific. 1991. P. 209–252

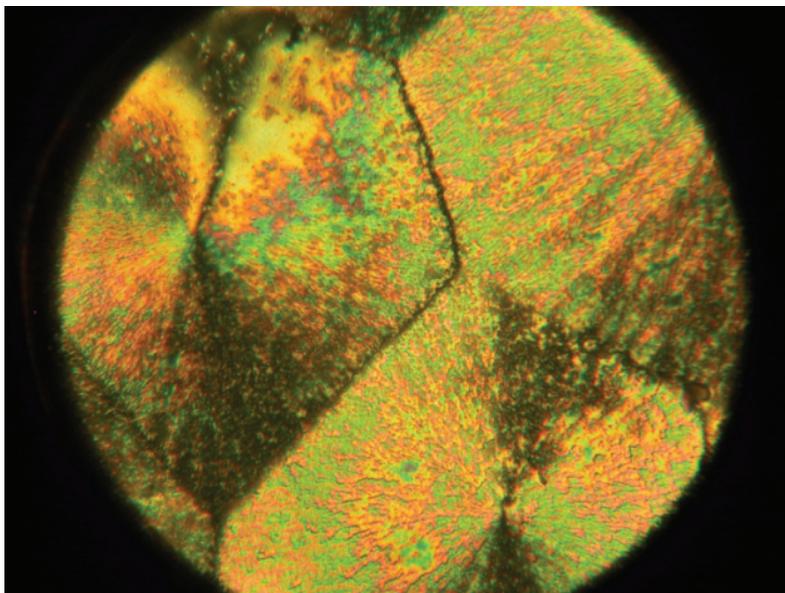
64. *Armitage D., Thackara J.* Photoaddressed liquid-crystal edge-enhancing SLM // *Appl. Opt.* 1989. Vol. 28. № 2. P. 219–225.
65. *Nakajima H.* et al. Edge enhancement recording with ferroelectric LC SLM using  $\text{SiO}_2/\alpha\text{-Si:H}$  photosensor // *Ferroelectrics*. 1993. Vol. 149. P. 207–213.
66. *Gourlay J., Vass D.G.* Edge enhancement recording with ferroelectric LC SLM exploiting domain wall // *Ferroelectrics*. 1996. Vol. 181. P. 121–127.
67. *Fukushima S., Kurokawa T.* // *IEEE Photonics Techn. Lett.* 1991. Vol. 3. P. 682–684.
68. *Fukushima S., Kurokawa T., Matsuo S., Kozawaguchi H.* // *Optics Lett.* 1990. Vol. 285. P. 15287.
69. *Kurokawa T., Fukushima S.* Ferroelectric LC SLM and their applications // *Ferroelectrics*. 1993. Vol. 149. P. 245–254.
70. *Warde C.J., Thackara J.* Operating modes of the microchannel SLM // *Optical Ing.* 1983. Vol. 22. № 6. P. 695–703.
71. *Khan A.H., Nejjib U.R.* Optical logic gates employing liquid crystal optical switches // *Appl. Opt.* 1987. Vol. 2. P. 270–273.
72. *Цветков В.А., Морозов Н.А., Элинсон М.И.* Картинная логика и жидкие кристаллы // *Сов. журн. квант. электр.* 1975. Т. 4. С. 989–997.
73. *Johnson K.M., Handschy M.A., Pagano-Stauffer L.A.* Optical computing and image processing with FLCs // *Optical Ing.* 1987. Vol. 26. № 5. P. 385–391.
74. *Zhang L., Robinson M.G., Johnson K.M.* // *Optics Lett.* 1991. Vol. 16. P. 45–47.
75. *Gomes C.M., Sekine H., Yamazaki T., Kobayashi S.* // *Neural Networks*. 1992. Vol. 5. P. 169–177.
76. *Wagner K., Slagle T.M.* Optical competitive learning with VLSI / LC winner-take-all modulators // *Appl. Opt.* 1993. Vol. 32. P. 1408–1435.
77. *Mao C.C., Johnson K.M.* // *Appl. Opt.* 1993. Vol. 32. P. 1290–1296.
78. *Bar Tana I., Sharpe J.P., McKnight D.J., Johnson K.M.* // *Optics Lett.* 1995. Vol. 20. P. 303–305.
79. *Collings N., Pourzand A.R., Vladimirov F.L., Plemeva N.I., Chaika A.N.* Pixelated LC light valve for neural network application // *Appl. Optics*. 1999. Vol. 38. № 29. P. 6184–6189.
80. *Drabik T.J., Handschy M.A.* // *Appl. Opt.* 1990. Vol. 29. P. 5220–5223.
81. *Johnson K.M., McKnight D.J., Underwood I.* Smart partial light modulators using LCs on silicon // *IEEE J. Quantum Electr.* 1993. Vol. 29. P. 699–714.
82. *Mears R.J., Crossland W.A., Dames M.P., Collington J.R., Parker M.C., Warr S.T., Wilkinson T.D., Davey A.B.* // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electr.* 1996. Vol. 2. P. 35–46.
83. *Yu F.T.S.* et al. Optical neural network with pocket-size liquid-crystal televisions // *Optics Lett.* 1990. Vol. 15. № 15. P. 863–865.
84. *Hollins R.C.* Goals, architecture and materials for broadband eye protection // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2001. Vol. 27. P. 1–11.
85. *Ицелева Л.Н., Полушкин Д.Ю., Сихарулидзе Д.Г., Томилин М.Г.* Светозащитные очки на основе ЖК // *Журн. ОМП.* 1990. № 1. С. 38–40.

86. Барачевский В.А., Лашков Г.И., Цехомский В.А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия. 1977. 279 с.
87. Клотиньш Э.Э., Круминь А.Э., Брант А.Э. Электрооптическая керамика // Сб. научн. тр. Рига. Латв. ГУ. 1977. С. 214–220.
88. Danilov V.V., Smirnov V.A., Fedorov S.V. The doped chiral LCs as photolimiters // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3488. P. 6.
89. Томилини М.Г., Данилов В.В. Оптические устройства на ЖК для защиты наблюдателя от слепящих источников излучения // Опт. журн. 2004. Т. 71. № 2. С. 14–24.
90. Бедрин А.А., Бубнов И.А., Дорофеев и др. Автоматические светофильтры для типа «хамелеон» для маски сварщика // Сварочное производство. 1995. № 5. С. 36–37.
91. Брежнев В.А., Горфинкель Б.И., Долгополый Ю.Е. и др. Перспективы пассивно-матричных ЖК экранов и быстродействующих затворов // Электр. пром. 2002. № 1. С. 14–19, 24.
92. Томилини М.Г., Онохов А.П., Фирсов Н.Т. Новые схемы очков с локальной светозащитой от слепящих объектов // Опт. журн. 1997. Т. 64. № 5. С. 102–106.
93. Tomilin M.G., Onokhov A.P., Polushkin D.Yu. Safety goggles with local-space modulation // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1992. Vol. 222. P. 119–124.
94. Tomilin M.G., Onokhov A.P., Firsov N.T. A new modification of LC goggles with local spatial modulation of blinding objects // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1997. Vol. 301. P. 255–259.
95. Onokhov A.P., Tarnakin I.N., Tomilin M.G. Image presentation optical system with local spatial modulation of blinding objects // Proc. Int. Conf. Japan Display'92. Hiroshima. 1992. P. 543–545.
96. Onokhov A.P., Beresnev L.A., Dultz W., Ivanova N.L., Chaika A.N., Gromadin A.L., Haase W. Optically addressed spatial light modulator using deformed helix FLCs // Abstracts of 16-th ILCC. Kent, Ohio. USA. 1996. P. 140. C1P. 60.
97. Efron U. et al. The silicon liquid crystal light valve // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. № 4. P. 1356–1368.
98. Beresnev L.A., Dultz W., Onokhov A.P., Haase W. Local optical limiting devices based on photoaddressed SLM, using ferroelectric LCs // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1997. Vol. 304. P. 285–293.
99. Beresnev L.A., Dultz W., Shenoy D., Shashidar R. Device for local attenuation of non-polarized light using FLC OA SLM // SPIE. 2002. P. 2–2. P.158.
100. Beresnev L.A., Shashidar R., Dultz W. FLC electro-optical modulator for non-polarized light // Book of Abstr. 16 ILCC. Kent. USA. 1996. C. 1. P.60.
101. Wagner H.L. US patent № 6,128,123 issued 10/2000.
102. Marquez A., Lizana I., Moreno I., Lemmi C., Campos J., Yzuel M. Some Applications of LC panels in diffractive Optics // Abstracts' booklet of International conference Applications of Optics and Photonics AOP2011/ University of Minho. Braga, Portugal. May 3 to 7, 2011.

## Часть V

### РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СРЕДЫ

Все достижения человека – результат риска.  
Геродот



Изображение следов взаимодействия вируса гриппа с антителом, визуализированное НЖК. Увеличение 100х.  
*Фото М.Г. Томина*

Физические поля различной природы (электрические, магнитные, электромагнитные, акустические и др.), а также температурные, механические и химические воздействия существенно изменяют свойства жидких кристаллов. Это позволяет использовать их для динамической голографии, регистрации внешних полей и для дефектоскопии материалов и изделий; при этом обеспечиваются высокие чувствительность и пространственное разрешение. Наибольшей чувствительностью к внешним полям обладают нематические жидкие кристаллы, не имеющие надмолекулярной структуры. Для регистрации тепловых полей чаще всего используются ХЖК. Деформации слоя ЖК под воздействием физических полей на поверхности объекта могут происходить локально и протекать в реальном времени.

В настоящем разделе рассматриваются применения жидких кристаллов в динамической голографии и поляризационной микроскопии для изучения неоднородности структуры поверхности материалов, а также визуализации распределения физических полей различной природы.

## Глава 13

### ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

ЖК позволяют получать как двумерные, так и объемные изображения. Однако методы получения плоских изображений на ЖК не получили развития из-за низкого контраста и пространственного разрешения по сравнению, например, с цифровой фотографией. Большой интерес ЖК представляют для динамической голографии. Поэтому получение двумерных изображений будет рассмотрено кратко, а основное внимание уделено получению динамических голографических решеток.

Регистрация плоских изображений осуществляется преимущественно с использованием фоточувствительных ЖК полимеров. Обзор применения этих материалов приведен в работе [1]. Фотохромные ЖК полимеры были использованы для обратимой (или необратимой), черно-белой и цветной записи и хранения информации. Запись в азобензолсодержащих ЖК-полимерах основана на реакциях *цис-транс-цис*-изомеризации. Эти материалы обладают свойством плавного регулирования значений оптической анизотропии, что позволяет при записи изображений реализовать всю шкалу серого, записывать и стирать изображения за счет изменения направления плоскости поляризации записывающего и стирающего лучей. Для фотооптической записи были использованы ЖК-полимеры с цианбифенильными и азобензольными группами. При плотности мощности лазерного луча  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup> получены следующие характеристики: разрешение — 800–1000 лин/мм; емкость записи —  $10^9$  бит/см<sup>2</sup>; число циклов запись-стирание — до  $4 \cdot 10^2$ . Примеры оптических изображений на подобных материалах приведены на рис. 13.1а, б.



Рис. 13.1. Примеры оптических изображений на полимерных ЖК:  
а — позитивное изображение; б — негативное изображение [1]

Планарно ориентированные пленки бинарных ЖК-сополимеров, содержащих комбинированные хирально-фотохромные фрагменты, характеризуются селективным отражением циркулярно поляризованного света. Цветные полимерные пленки на основе этих полимеров могут быть использованы для записи и хранения информации. УФ-облучение такой пленки через шаблон вызывает раскрутку спирали в локально облученных местах, и длина волны селективно отраженного света сдвигается в длинноволновую спектральную область, что позволяет записывать цветное изображение на цветном фоне. При использовании полимера с бензилиденметаноновыми фрагментами изомеризация носит необратимый характер, и запись является одно-разовой. Для реверсивной записи использованы ЖК-сополимеры, содержащие наряду с метаноновыми группами азобензольные фрагменты, изомеризация которых обратима. Достоинством таких пленок является их высокая стабильность, что проявляется в возможности многократной записи и стирания оптической информации без существенных потерь цветовых характеристик. Для записи цветных изображений также могут быть использованы полиэтиленовые пористые пленки, допированные ЖК с разными фотохромными соединениями. Недостатком полимерных ЖК материалов является большая длительность записи информации, вследствие чего они могут быть полезны для долговременного хранения информации в системах с оптической памятью.

Уникальное сочетание оптических и физических свойств ЖК, таких, как высокая оптическая прозрачность, большая величина

двулучепреломления и возможность контролируемого изменения этих параметров за счет фазовых переходов, переориентации молекул ЖК при приложении внешних полей, делают эти материалы одной из важнейших сред для записи статических и динамических голограмм.

Принцип голографической записи хорошо известен [2–5]. В общем виде он сводится к тому, что картина интерференции двух взаимно когерентных световых волн отображается в виде модуляции оптических параметров среды: коэффициента пропускания (амплитудные голограммы), показателя преломления для произвольной или выделенной поляризации света (фазовые голограммы). При освещении голограммы одной из волн, участвовавших в ее записи, часть энергии этой волны за счет дифракции передается другой волне, участвовавшей в записи.

Принято разделять голограммы на тонкие (плоские), являющиеся аналогом дифракционной решетки, и толстые (объемные), в которых картина модуляции меняется по толщине.

В толстых голограммах дифракция носит брэгговский характер, и доля энергии считывающей волны, передаваемая в воспроизводимую волну (дифракционная эффективность — ДЭ), может достигать 100%. При этом дифрагирующая волна должна воспроизводить записывавшую волну по направлению и длине волны (угловая и спектральная селективность). На практике чаще всего применяются фазовые голограммы, в которых нет потерь световой энергии, неизбежных при использовании амплитудных. Период записываемой голографической решетки варьируется от десятых и сотых долей миллиметра в тонких до десятых долей микрона в толстых голограммах.

Для записи голограмм чаще всего используются специальные галоидосеребряные среды, во многом сходные с обычными фотографическими. В ряде случаев целесообразно применение других органических и неорганических сред, в том числе композиций на основе ЖК, используемых также в динамической голографии.

Динамическая голография (ДГ) — область голографии, изучающая преобразования когерентных волн (пучков), происходящие в процессе их записи [6–8]. В этом случае голографическую запись и считывание голограмм осуществляют в нелинейных средах, изменяющих свои оптические характеристики под действием падающего на них излучения. При действии световых пучков на нелиней-

ную среду в ней возникает пространственная модуляция коэффициента поглощения, показателя преломления или двулучепреломления среды, повторяющая картину интерференции этих пучков — динамическая голографическая решетка. Она изменяет амплитуды и фазы распространяющихся в голограмме пучков. В результате стадии записи и считывания голограммы оказываются неразрывно связанными, а процесс запись-считывание становится одноступенчатым, представляя собой, по сути дела, процесс взаимодействия этих пучков. Существенным параметром является длительность цикла запись-считывание информации, которая должна быть значительно меньше времени изменения информации. В ряде случаев динамическая запись может приводить к эффектам, отсутствующим в статической голографии. Примером этого являются «смещенные» решетки, в которых пространственное положение максимумов картины модуляции показателя преломления не совпадает с максимумами или минимумами интерференционной картины. В этом случае возможны процессы нестационарного перераспределения энергии между записывающими ДГ световыми волнами.

Перестраиваемые голографические решетки имеют широкие перспективы применения в дифракционной и интегральной оптике, дисплейной технике, оптических переключателях, устройствах хранения информации и оптических компьютерах. К настоящему времени техника ДГ получила развитие в первую очередь в связи с задачами динамической коррекции искажений, вносимых элементами лазерных и изображающих оптических систем или атмосферной турбулентностью, а также в связи с проблемой нелинейно-оптического обращения волнового фронта (ОВФ) [9–12].

Варианты построения конкретных схем и систем ДГ с применением ЖК делятся на две большие группы:

1. Среды и устройства, в которых запись голографической решетки (пространственная модуляция оптических свойств слоя) осуществляется прямым воздействием излучения с распределением интенсивности в картине интерференции записывающих пучков. Это осуществляется за счет изменения фотохимических, фотодинамических и других свойств ЖК материала. Сюда же входит использование ЖК для записи статических голограмм.

2. Электрооптические устройства (ЖК ПМС), в которых картина интерференции световых волн, записывающих ДГ, воспроизводится в виде модуляции электрического поля, приложенного к слою ЖК.

Далее будут рассмотрены оба подхода.

### 13.1. Запись голографических решеток на жидких кристаллах

В основе записи голографических решеток на жидких кристаллах лежат два механизма, сопровождаемые большим изменением показателя преломления (рис. 13.2) [13]:

— переход из упорядоченного состояния ЖК в неупорядоченное под действием фотохимических реакций в фоточувствительных молекулах;

— переориентация молекул ЖК, обусловленная либо фотохимическими реакциями, либо происходящими без их участия.

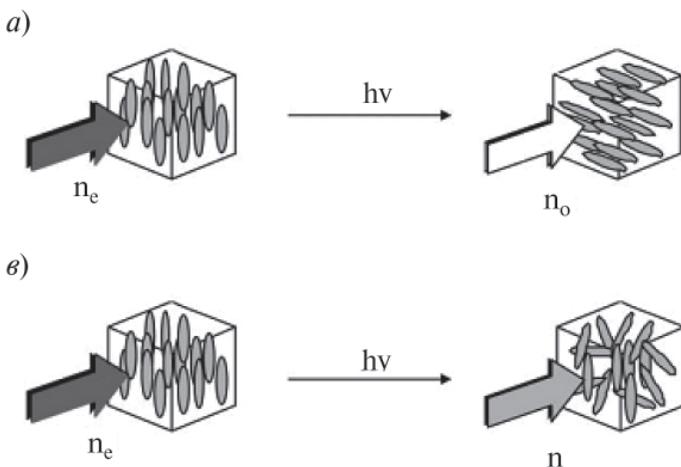


Рис. 13.2. Два механизма изменения ориентации ЖК молекул: а — переориентация директора; в — переход из упорядоченной фазы в неупорядоченную (фазовый переход) [13]

Переориентация ЖК под действием излучения дает, как правило, большее изменение показателя преломления, хотя и фазовый переход обеспечивает существенную модуляцию показателя преломления. Строго говоря, в ЖК средах модуляция показателя преломления связана с модуляцией двулучепреломления среды, но в дальнейшем для простоты изложения мы будем говорить просто о модуляции показателя преломления для той или иной поляризации падающей (считывающей) волны.

Для записи голографических решеток используются различные типы ЖК: низкомолекулярные, композиты ЖК-полимер и полимерные ЖК. Сочетание электрооптических свойств ЖК с возможностью фотополимеризации материалов позволяет создать уникальную систему для изготовления переключаемых голограмм. Рассмотрим существующие способы фотоиндуцированной модуляции показателя преломления в ЖК, на основе которых осуществляется запись голографических решеток. Наиболее полный анализ этих способов проведен в работе [13].

*Фотохимический фазовый переход в системах «гость-хозяин»*

Кооперативное движение в ЖК представляется наиболее эффективным для осуществления переориентации молекул ЖК при внешнем воздействии. Если небольшая часть ЖК молекул изменяет свою ориентацию в ответ на внешнее воздействие, то и остальные молекулы изменят ориентацию. Поэтому для ориентации всех молекул требуется небольшая энергия, так как достаточно израсходовать ее для переориентации 1% (молярных) молекул, чтобы переориентировать всю систему. Это означает, что ЖК системы обладают большой чувствительностью к внешним воздействиям. Если небольшое количество фотохромных молекул, таких как азобензолы, стильбены и спиропираны вводятся в объем ЖК и полученная смесь подвергается облучению, то в фотохромных молекулах гостя происходят фотохимические реакции, сопровождаемые изотермическим переходом смеси в изотропное состояние. Например, *транс*-форма азобензолов имеет вид стержня и обеспечивает нематическую фазу, в то время как изомер *цис*-формы изогнут и дестабилизирует структуру смеси. В результате температура фазового перехода в смеси с *цис*-формой значительно ниже, чем с *транс*-формой (рис. 13.3).

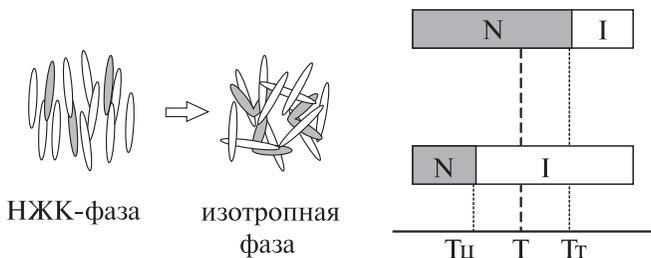


Рис. 13.3. Фазовая диаграмма фотохимического фазового перехода в системе азобензол-ЖК: N — нематическая фаза, I — изотропная фаза

Если образец находится при температуре  $T$ , лежащей между  $T_T$  и  $T_{ц}$ , и освещается для обеспечения *транс-цис*-фотоизомеризации молекул гостя азобензолов, то происходит переход в нематическую фазу. Фотохромные реакции обычно являются реверсивными, что позволяет образцу вернуться в исходную нематическую фазу [14]. Эти реакции сопровождаются изменением свойств смеси, например поляризуемости, и протекают за очень короткое время (порядка пикосекунд). Обращение фотохромной реакции осуществляется излучением на другой длине волны.

Наблюдения в поляризационный микроскоп за фотохромной реакцией в НЖК, содержащим молекулы азобензола *транс*-формы, приведены на рис. 13.4 [15]. Под действием излучения образуются зоны, содержащие *цис*-изомеры, в которых наблюдается переход в изотропную фазу. С течением времени эти зоны растут и вещество переходит в изотропное состояние. Этот процесс соответствует модели разориентации упорядоченной фазы под действием излучения.

Фотохимический фазовый переход существенно зависит от свойств фотохромных материалов, что рассмотрено подробно в работах [13, 16]. Этот переход в системах «гость-хозяин» был использован для записи реверсивных голограмм. В работе [17] показана

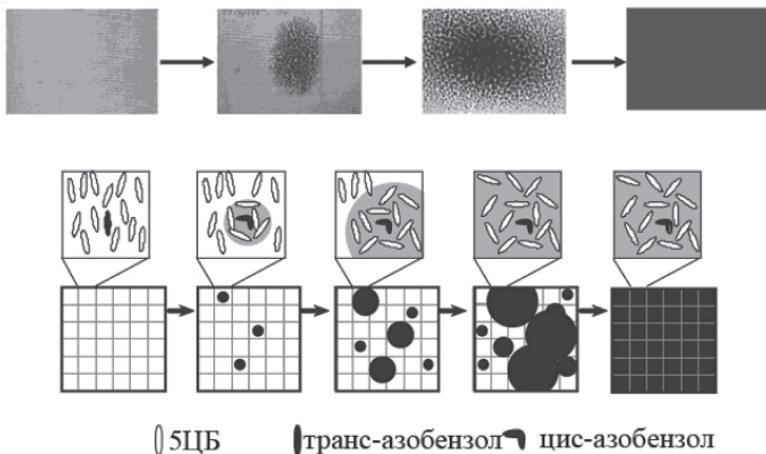


Рис. 13.4 Механизм фотохимического фазового перехода в смеси ЖК-азобензол [15]

возможность реверсивной записи в поляризованном свете динамических голограмм в нематике 5ЦБ с добавкой азокрасителя. Под действием излучения аргонового лазера с  $\lambda = 514$  нм происходила *транс-цис*-фотоизомеризация молекул красителей, приводящая к переориентации молекул нематика. Порог интенсивности излучения не превышал 3 мВт/см<sup>2</sup>, а время отклика лежало в пределах от нескольких сотен мкс до 100 мс в зависимости от пространственной частоты записываемой решетки. Голограмма записывалась излучением Ar-лазера (514 нм), а считывалась излучением He-Ne лазера (633 нм). Дифракционная эффективность была мала и существенно зависела от поляризации излучения. ДЭ около 30% при интенсивности записывающего излучения 40 мВт/см<sup>2</sup> была получена в работе [18]. Периодическое изменение ориентации ЖК под действием пространственных зарядов вызвало изменение коэффициента преломления на величину  $3,6 \cdot 10^{-3}$  в ячейке с фотопроводящими слоями [19].

Высокоэффективная поляризационная решетка (с ДЭ в первом порядке 98%) описана в работе [20]. Особенность ее записи состояла в том, что излучение вызывало переориентацию поляризационно-чувствительного слоя полиимида на подложке ячейки, допированного азокрасителем. Это приводило к переориентации молекул в объеме НЖК.

#### *Фотохимическая модуляция ориентации в ХЖК и С\*ЖК*

Воздействие излучения на холестерик может вызывать изменение шага спирали, что приводит к изменению его оптических характеристик. Впервые это было обнаружено в смеси ХЖК с азобензолом, где при освещении наблюдалась фотоизомеризация молекул азобензола, вызывающая изменение шага, что подтверждалось изменением длины волны отраженного света. В работах [21, 22] при освещении ХЖК с оптически активными добавками наблюдался холестерико-нематический фазовый переход. В некоторых соединениях при воздействии света в процессе *цис-транс*-фотоизомеризации происходит изменение закрутки спирали [23, 24]. С целью увеличения фоточувствительности и оптимизации характеристик селективного отражения был разработан ряд новых материалов, обладающих свойством фотоизомеризации [5].

В сегнетоэлектрических ЖК (С\*ЖК) наблюдается спонтанная поляризация и в случае поверхностной стабилизации ориентации достигается микросекундный отклик на приложенное электриче-

ское поле. Воздействие светового излучения на смесь С\*ЖК с азобензолом в присутствии приложенного поля уменьшает время отклика, что вызвано *транс-цис*-фотоизомеризацией. Было установлено, что этот материал имеет гистерезис между приложенным полем и поляризацией, отличающийся для случаев смесей *транс*- и *цис*-азобензола с С\*ЖК. *Транс*-форма не вызывает разупорядочения структуры С\*ЖК, а *цис*-форма уменьшает порядок и порог поляризации. Это можно использовать для оптического переключения С\*ЖК [25]. Изменения в поляризации и ориентации С\*ЖК в экспонированных и неэкспонированных областях вызывают появление оптического контраста, сохраняющегося после снятия воздействий (эффект памяти). Детальное изучение фотохимической модуляции С\*ЖК с фоточувствительными молекулами проведено в работе [13].

В хиральном смектике изменение знака вектора самопроизвольной поляризации может быть положительным или отрицательным в зависимости от температуры. Это происходит при определенной температуре ( $T_p$ ) при сохранении угла наклона молекул (рис.13.5). Обнаружен фотоиндуцированный сдвиг  $T_p$ , сопровождаемый изменением поляризации в смеси С\*ЖК и азобензола [26]. При температуре  $T$  вектор  $P_s < 0$ . После воздействия УФ излучения знак  $P_s$  становится положительным из-за фотоиндуцированного сдвига  $T_p$  (рис. 13.5).

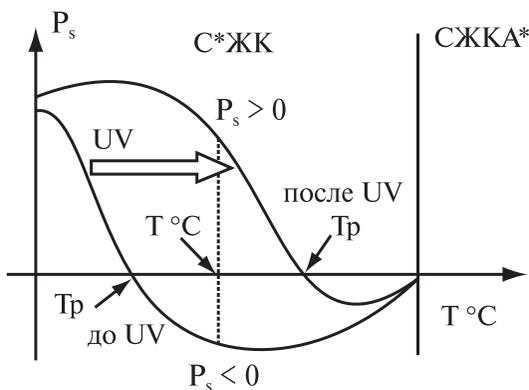


Рис. 13.5. Фотохимическое изменение поляризации в С\*ЖК с изменением знака спонтанной поляризации при определенной температуре [26]

Это позволило осуществить запись изображения с высоким контрастом.

В работе [27] было показано, что фотоизомеризация азомолекул вызывает фазовый переход С\*ЖК в хиральный нематик, следствием которого является переориентация молекул. Обратный переход осуществляется под действием температуры. В работе была продемонстрирована возможность записи решетки с использованием фотоиндуцированного фазового перехода при приложении электрического поля.

Голографическая решетка на основе С\*ЖК, допированного азокрасителем, описана в работе [28]. В этом случае фоторефрактивный эффект был обусловлен индуцированием вращающего момента при поглощении света азокрасителями, что приводило к уменьшению оптического порога Фредерикса. Решетка была электрически переключаемой при малых полях ( $\sim 0,08$  В/мк). Получены малые времена переключения — микросекунды (при 2 В/мк).

#### *Голографические решетки на основе жидких кристаллов, диспергированных в полимерной матрице*

Одним из перспективных способов формирования голографических решеток является метод фазового разделения композиции «фотоотверждаемый полимер-жидкий кристалл» [29]. При облучении такой предполимерной композиции светом с неоднородным распределением интенсивности происходят сложные взаимосвязанные процессы полимеризации, фазового разделения, диффузии [30–32]. В результате формируются структуры, состоящие из чередующихся полос, обогащенных либо полимером, либо ЖК. Все три процесса зависят не только от химического состава предполимерной композиции, но и от интенсивности света и времени облучения [30–39]. Структура имеет пространственную модуляцию показателя преломления между полосами, а тонкий слой материала может рассматриваться в качестве дифракционной решетки фазового типа. Слой материала толщиной 5–30 мкм, полученный в результате голографической записи между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами с прозрачными электродами, представляет собой электрически управляемую брэгговскую решетку. Дифракционные решетки на основе полимер-диспергированных ЖК (PDLC) являются электрически управляемыми с малым временем переключения, обладают высоким контрастом, широким углом обзора и реверсивностью.

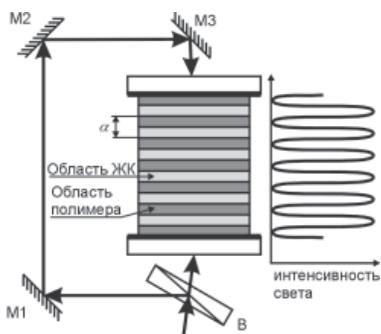


Рис. 13.6. Схема формирования решетки на основе PDLC с использованием голографического метода: В — расщепитель луча, М — зеркало

интерференционной картины происходит полимеризация мономера [47]. В результате создается градиент концентрации, и не прореагировавший мономер диффундирует в области высокой интенсивности света, а НЖК выталкивается в области низкой интенсивности света. Эти процессы увеличивают концентрацию НЖК в области низкой интенсивности, где растут капли нематика. В некоторый момент времени морфология «замораживается» и формируются структуры, состоящие из чередующихся полос, обогащенных либо полимером, либо НЖК. Их толщина определяется длиной волны излучения лазера и углом схождения луча. Для уменьшения светорассеяния свойства ЖК и полимера выбираются так, что показатель преломления ЖК для обыкновенного луча  $n_o$  был равен показателю преломления полимера  $n_n$ . Особенностью голографических полимерно-жидкокристаллических дифракционных решеток является их поляризационная чувствительность. В работах [35, 47] приведены результаты исследования влияния состава и параметров экспозиции на структуру голографических полимерно-жидкокристаллических композитов и их ДЭ. Предполимерная композиция состояла из НЖК, акрилатного мономера, связующего компонента и фотоиницирующей системы. Были выбраны следующие компоненты: НЖК — коммерческая смесь цианобифенилов с эфирами циклогексанкарбоновых кислот ( $n_e = 1,69$ ,  $n_o = 1,52$ ); мономер — пентаэритритол тетраакрилат; связующий компонент — N-винил-

Технология получения решеток на основе композиции полимер-ЖК описана в ряде работ [40–47]. Смесь ЖК и фотополяризуемого мономера заключают между двумя стеклянными подложками с токопроводящим покрытием. Для инициирования полимеризации ячейка освещается двумя лазерными пучками (рис. 13.6). Интерференция пучками создает в толще ячейки распределение интенсивности излучения, показанное схематично справа на рис. 13.6. В процессе облучения предполимерной композиции, содержащей НЖК, светом

пирролидон; краситель — метиленовый голубой; соинициатор — триэтаноламин. Композиция методом полива наносилась на одну из стеклянных пластин с токопроводящим покрытием и накрывалась второй пластиной с зазором 10 мкм. Образец облучался светом интерференционной картины 2-х когерентных лучей от лазерного диода ML120G ( $\lambda = 658$  нм). Угол схождения интерферирующих *p*-поляризованных лучей менялся при формировании решеток разных периодов. Плотность энергии в плоскости записи варьировалась от 200 до 2000 мДж/см<sup>2</sup>. Структурные исследования фотополимерных структурированных ЖК композитов проводились методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 13.7 представлены снимки различных структур, полученных при варьировании состава предполимерной композиции и параметров экспозиции. При одинаковой концентрации ЖК (37%) варьировалась

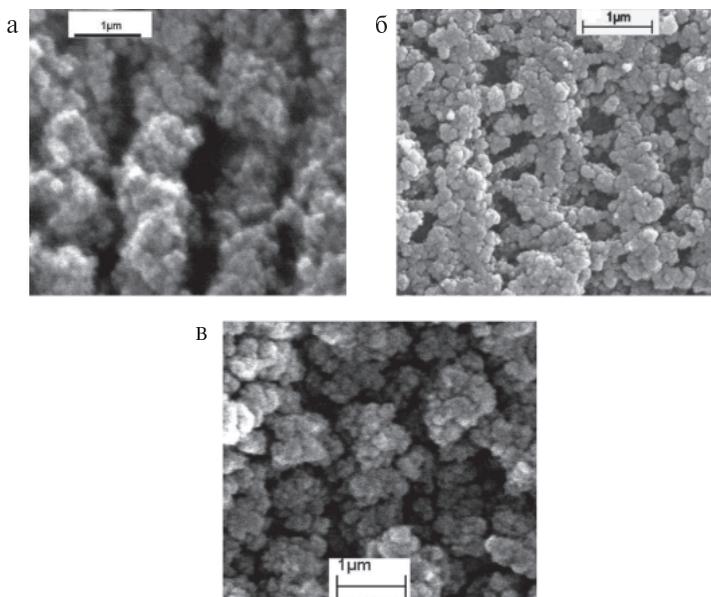


Рис. 13.7. Влияние состава предполимерной композиции и плотности энергии облучения на структуру композита. Концентрация НЖК — 37%, красителя — 0,1%: а — плотность энергии облучения — 900 мДж/см<sup>2</sup>; б — плотность энергии облучения — 2700 мДж/см<sup>2</sup>; в — концентрация красителя — 0,4%, плотность энергии облучения — 900 мДж/см<sup>2</sup>

концентрация красителя и изменялась энергия облучения предполимерной композиции.

Заметное влияние на структуру композита оказывает изменение энергии экспонирования. Методом электронной микроскопии установлено, что при плотности энергии двухлучевого облучения  $225 \text{ мДж/см}^2$  для ячеек с композициями, содержащими 37% НЖК и 0,1% красителя, происходит неполное разделение фаз фотополимера и НЖК. При увеличении плотности энергии до  $900 \text{ мДж/см}^2$  и более формируется четко выраженная решетчатая структура с характерной шириной полимерной полосы около  $0,8 \text{ мкм}$  (рис. 13.7а). Увеличение плотности энергии более  $1800\text{--}2000 \text{ мДж/см}^2$  для композиций с 0,1% красителя приводит к нарушению периодичности формирующейся структуры (рис. 13.7б). Аналогичный эффект наблюдается и при увеличении концентрации красителя до 0,4% в исходной композиции (рис. 13.7в) при одинаковом уровне плотности энергии экспозиции. В этом случае формирование решетчатой структуры происходит быстрее и более совершенная структура образуется при меньшей плотности энергии лазерного излучения порядка  $400 \text{ мДж/см}^2$ . С ростом плотности энергии облучения происходит выравнивание полос, обогащенных полимером и НЖК, ширина полос увеличивается (рис. 13.8).

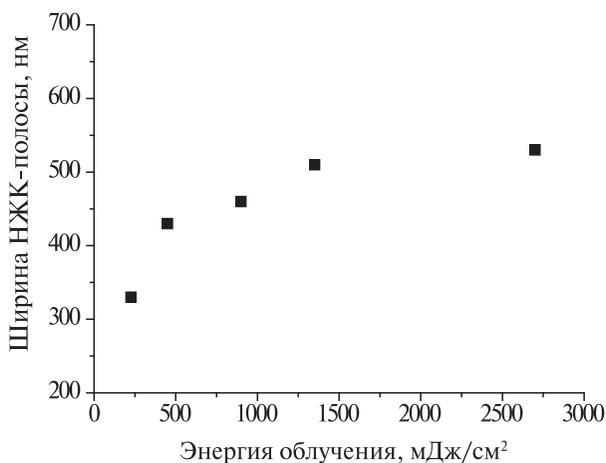


Рис. 13.8. Зависимость ширины полос от энергии экспонирования

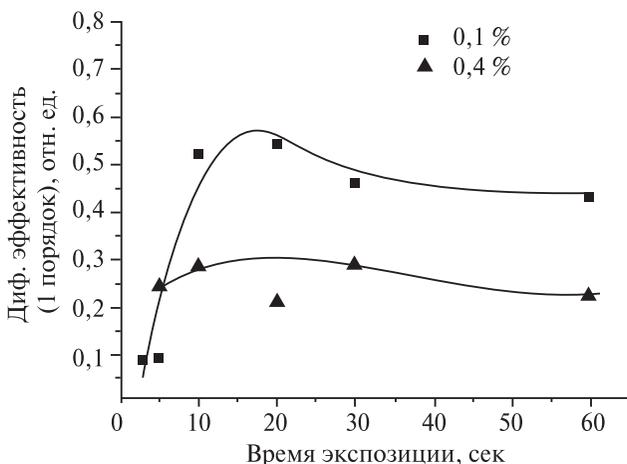


Рис. 13.9. Зависимости ДЭ (1-й порядок) решеток от времени экспонирования (при плотности мощности 45 мВт/см<sup>2</sup>). Концентрация красителя указана на графике. Толщина ячеек — 10 мкм

Отношение масс НЖК и мономера определяет степень их фазового разделения и соответственно характер формирующейся структуры. Фазовое разделение не наблюдается при концентрации НЖК ниже 10%, и оно заметно ухудшается при содержании НЖК выше 50%. В образцах, содержащих 50% НЖК при тех же условиях записи, что и для композиций с 37% НЖК, не формируется периодическая структура композитов: образуются неоднородные по объему пленки участки с полимерной сеткой или области с плотной полимерной матрицей.

Дифракционная эффективность сформированных полимерно-жидкокристаллических композитов определяется как составом, так и условиями фотополимеризации (мощностью интерферирующих пучков) (рис. 13.9). Для любой предполимерной композиции существует оптимальное соотношение компонентов и условий экспозиции.

Присутствие в решетке анизотропных НЖК приводит к поляризационной зависимости их дифракционных эффективностей. Поляризационный контраст, определяемый как отношение ДЭ соответствующего порядка для *s*- и *p*- поляризованных считывающих

лучей, зависит от периода решетки, времени экспонирования, состава композиции и составляет величину 4–8. Поляризационная анизотропия решеток зависит не только от анизотропии НЖК, но и от ориентации капель нематика относительно вектора решетки. По соотношению  $\eta_{1s} > \eta_{1p}$ , где  $\eta_{1s,p}$  — ДЭ в первый порядок для соответствующей поляризации, можно заключить, что капли НЖК в исследованных решетках в основном ориентированы тангенциально в плоскостях решетки.

Теоретически и экспериментально исследована угловая селективность объемных фазовых дифракционных решеток, сформированных в ЖК композите, работающих на пропускание, для *s*- и *p*-поляризованного света [48]. Пример картины угловой селективности для решетки на пропускание для композита, состоящего из акрилового фотополимера и НЖК E7 показан на рис. 13.10. Решетка записывалась на длине волны излучения аргонового лазера 514,5 нм с полностью мощности 5 мВт/см<sup>2</sup> при экспозиции 60 с. Считывание производилось *s*- поляризованным излучение He–Ne лазера ( $\lambda = 632,8$  нм). Угловая ширина полосы (FWHM) менее 1°, а максимальная эффективность имела величину более 70%. Сплошная кривая на рис. 13.10 получена из теории Когельника, согласно которой дифракционная эффективность определяется по формуле [49]:

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{v^2 + \xi^2}}{1 + \xi^2/v^2} \quad (13.1)$$

где  $v = \pi n_i L / \lambda \cos \theta$  для *s* поляризованного света и  $\xi = \pi n \Delta \theta \sin 2\theta_B / \cos \theta$ ,  $L$  — физическая толщина решетки,  $n$  — средний коэффициент преломления,  $n_i$  — амплитуда индекса модуляции;  $\theta$  — угол падения света на образец,  $\Delta \theta = \theta - \theta_B$  — отклонение от брэгговского угла  $\theta_B$ . В случае  $n = 1,52$  с учетом закона Снеллиуса было получено хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными для  $n_i = 2,8 \cdot 10^{-3}$ .

В отсутствии электрического поля ЖК представляет собой хаотически ориентированную структуру (рис. 13.11а), а ячейка характеризуется периодически изменяющимся показателем преломления. Если лазерный луч падает под углом  $\theta$ , удовлетворяющим условию Брэгга:  $\lambda = 2d \cos \theta$ , то он будет испытывать отражение. Под воздействием внешнего поля возникает переориентация НЖК в слоях, что приводит к изменению светорассеивающих состояний. Решетка переключается из дифракционного в прозрачное состояние. При

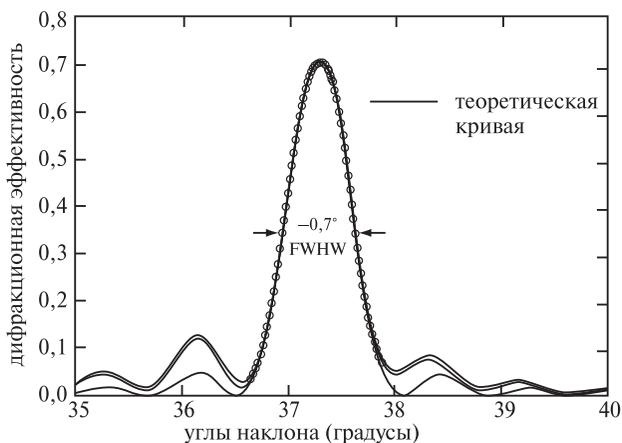


Рис. 13.10. Зависимость дифракционной эффективности от угла падения для типичной решетки на пропускание,  $\lambda = 632,8$  нм

наложении достаточного по амплитуде электрического поля, направленного перпендикулярно чередующимся слоям, ЖК с  $\Delta\epsilon > 0$  будет ориентирован перпендикулярно слоям (рис. 13.11б). Тогда показатель преломления ЖК становится равным показателю преломления полимера, вследствие этого увеличивается пропускание и уменьшается индекс модуляции и дифракционная эффективность.

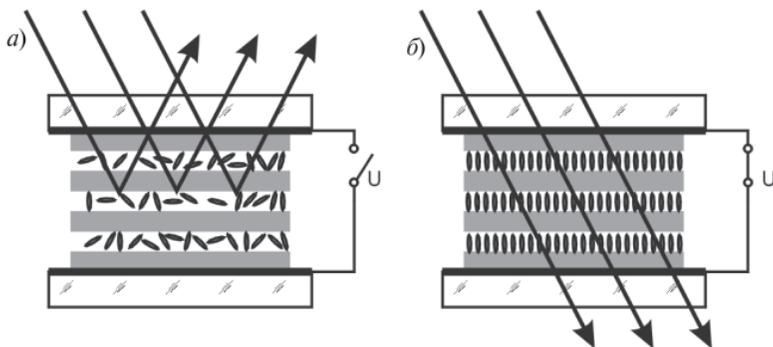


Рис. 13.11. Изменение ориентации молекул ЖК в голографической решетке при приложении электрического поля

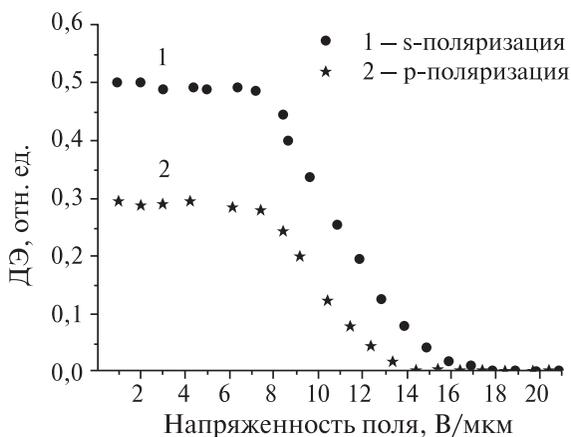


Рис. 13.12. Зависимости ДЭ решетки в первом порядке от напряженности поля при *s*- (1) и *p*- поляризации (2) считывающего пучка [32]

Подобные электрически управляемые решетки перспективны в качестве элементов фотоники [29, 33–35, 50].

Исходная ориентация НЖК капсул в решетке относительно вектора решетки определяет ее поведение при переключении состояний электрическим полем и временные характеристики. Мономеры различного химического строения и функциональности, а также тип НЖК, входящих в предполимерную композицию, в зависимости от поляризации света при записи решеток, формируют определенную ориентацию НЖК капсул относительно вектора решетки. Известно, что в системе акрилатных мономеров и производных цианбифенилов НЖК капсулы ориентируются вдоль вектора решетки [51, 52]. На рис. 13.12 представлены экспериментальные результаты, иллюстрирующие влияние электрического поля на ДЭ решеток при *s*- и *p*-поляризации считывающего пучка [32].

Было установлено, что в отсутствие поля (в дифракционном состоянии) и при наличии ориентирующего слоя поляризационный контраст составлял примерно величину 1,66. Измеренные времена включения находились в диапазоне 0,25–0,5 мс, время релаксации к дифракционному состоянию после отключения поля составляло 5–5,5 мс [32].

Для получения более высокой ДЭ голографической решетки использовали разные способы. В работе [53] использовался сдвиг ячей-

ки, вызывающий деформацию капсул, что фиксировалось полимеризацией. Для света, поляризованного параллельно направлению сдвига, была получена ДЭ около 99%. В работах [54–56] использован новый материал, содержащий плоские полимерные слои, включенные в нематическую фазу, что позволило избежать формирования капсул и уменьшить величину управляющего напряжения. Исследование дифракционных свойств объемной прозрачной решетки проводилось на длинах волн 632,8 и 1550 нм. Решетка формировалась при освещении предполимерной композиции излучением лазера на длине волны 352 нм с плотностью излучения 10 мВт/см<sup>2</sup>. Получена дифракционная эффективность 98%, величина управляющего поля — 5 В/мкм.

Запись тонких фазовых голограмм в полимер-диспергированных ЖК композитах на основе фуллеренсодержащих  $\pi$ -сопряженных органических систем показала увеличение ДЭ и светоиндуцированного показателя преломления по сравнению с ЖК системами с красителем. Структуры с фуллеренами рекомендованы для обратимой фазовой записи оптической информации [57, 58].

Спектральный отклик голографической решетки на основе PDLC при использовании белого падающего излучения на воздействии электрического поля показан на рис. 13.13. [44]. В отсутствие

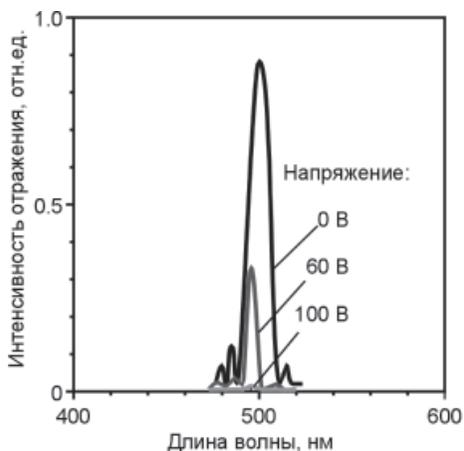


Рис. 13.13. Спектральный отклик голографического PDLC на воздействие электрического поля при использовании белого падающего излучения [44]

электрического поля из-за периодической модуляции показателя преломления ячейка имеет интенсивный узкий пик отражения. С увеличением амплитуды электрического поля амплитуда осцилляции показателей преломления уменьшается, что сопровождается уменьшением отражения.

Рассмотренные ранее решетки были получены при интерференции волн, имеющих параллельные поляризации, и приводящей к модуляции интенсивности. Это вызывает наличие пространственно-периодической структуры в тонком слое, сформированном в результате процесса пространственно-неоднородной фотополимеризации. Существует другой метод записи решеток, основанный на сложении волн, имеющих ортогональные поляризации. При этом происходит модуляция состояния поляризации при отсутствии модуляции интенсивности (рис. 13.14в, г), что может быть отображено ЖК материалом. Пространственно-переменное состояние поляризации суммарного поля опорной и объектной волны вызывает в ЖК возникновение переменной фотоиндуцированной анизотропии. Поле объекта в процессе поляризационно-голографического

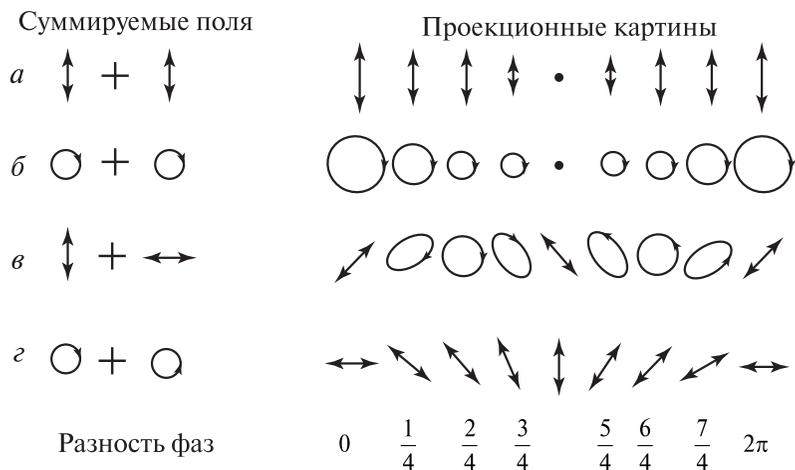


Рис. 13.14. Проекционные картины электрического вектора при сложении двух волн различной поляризации: параллельные линейная и циркулярная поляризации ( $a, b$ ) и ортогональные линейная и циркулярная поляризации ( $v, z$ ) складываемых волн

воспроизведения восстанавливается наряду с амплитудой и фазой также по состоянию и степени поляризации. Поляризационная голограмма может быть получена как в попутных (схемы Габора, Лейта), так и во встречных пучках (схема Денисюка). В зависимости от времени запоминания среды возможна поляризационно-голографическая запись как в статических, так и в динамических режимах.

Исследования полученных поляризационных голографических решеток (ПГР) на основе PDLC проведены в работах [59–62]. Гомогенная смесь предполимера и НЖК освещалась двумя световыми пучками с ортогональными линейными поляризациями, что вызывало различие фазы только за счет изменения состояния поляризации. Записанная ПГР имела большую стабильность структуры и переключалась при приложении электрического поля. Интенсивность записывающих пучков составляла  $10^{-1}$  Вт/см<sup>2</sup> при времени экспонирования в несколько минут. Измерялась ДЭ в первый порядок дифракции для считывающих лучей *s*- и *p*-поляризации. По завершении формирования решетки ДЭ в случае *p*-поляризации оказалась в 5 раз выше, чем для *s*-поляризации, причем различие возрастало с увеличением интенсивности записи. Полная оптическая модуляция происходила при приложении поля напряжением 40 В и частотой 1 кГц.

В работе [61] методом поляризационной голографии была получена решетка с поверхностным рельефом глубиной 50–200 нм в зависимости от интенсивности освещения. Экспонирование осуществлялось излучением с мощностью 50–300 Вт/см<sup>2</sup> и длительностью 5–10 мин соответственно. Авторы объясняют образование поверхностного рельефа процессами фазового разделения в PDLC.

В заключение отметим, что фотополимерные ЖК композиты являются перспективными оптическими средами с управляемыми характеристиками. Изменяя состав композиции, период решетки и параметры экспозиции, можно управлять как дифракционной эффективностью решетки, так и ее поляризационной чувствительностью. Наличие в композитах жидких кристаллов позволяет изменять их оптические свойства под влиянием электрического поля. На пути создания элементов фотоники на основе голографических решеток на PDLC стоят две проблемы: уменьшение управляющих напряжений и создание недорогих многослойных структур для обеспечения многоцветных характеристик.

*Голографические решетки на основе полимерных жидких кристаллов*

Полимерные азосодержащие ЖК были использованы для высокоэффективной записи поляризационных голограмм [63]. Фазовые голографические решетки были получены на основе фотохимических фазовых переходов (рис. 13.15). Достоинствами таких решеток являются высокая скорость записи ( $\approx 200$  нс при длительности лазерного импульса 20 пс) и высокая воспроизводимость. При этом глубина модуляции коэффициента отражения составляла 0,1. Решетки толщиной 0,5–1,2 мкм имели дифракционную эффективность примерно 32%, что является практически теоретическим пределом для режима Рамана-Ната, причем поверхность модуляции составляла 10 нм.

Это означает, что вклад поверхностного рельефа структуры в общую дифракционную эффективность мал, и значительное увеличение ДЭ связано с пространственной модуляцией молекулярной ориентации, проявляющейся в чередовании нематической и изотропной фаз [13]. Показана возможность голографической записи 3-х мерных объектов с высоким разрешением (рис. 13.16).

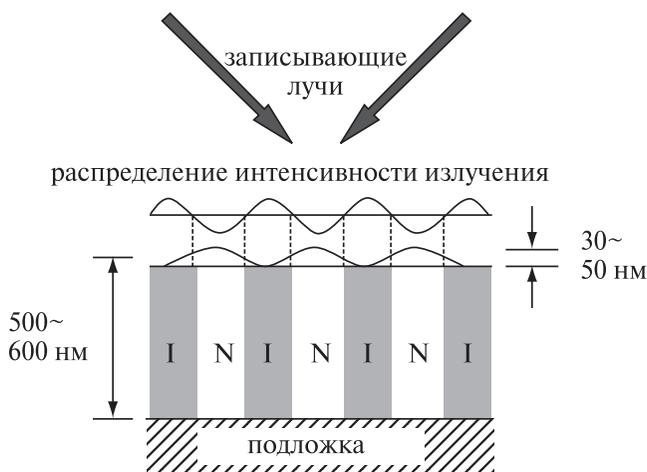


Рис. 13.15. Голографическая решетка, созданная в слое ЖК на основе полимерного азобензола при одновременном существовании структуры нематической и изотропной фаз в объеме под рельефом поверхности: I — изотропная фаза; N — нематик [13]



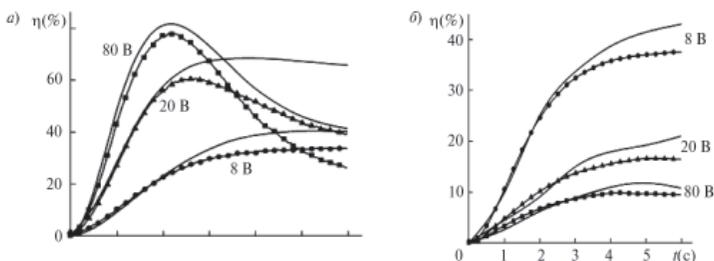
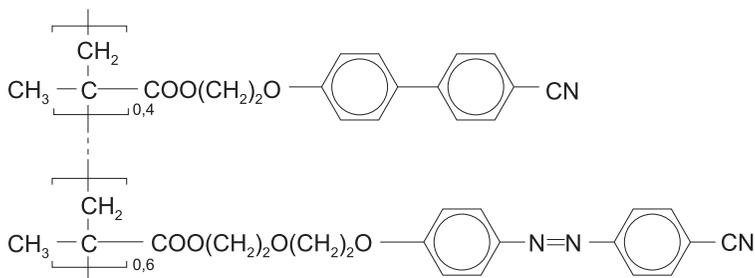


Рис. 13.17. Динамика ДЭ голограммы в пленке НЖК полимера в электрическом поле при записи  $s-s$  (а) и  $s-p$  (б) поляризованными лучами; сплошные линии – расчет, точки – эксперимент [68]

С ростом поля в случае записи  $s-s$  поляризованными лучами ДЭ увеличивается, что объясняется возрастанием эффективной глубины записи голограммы за счет уменьшения поглощения света из-за гомеотропного выстраивания полярных групп. В случае записи  $s-p$  лучами ДЭ уменьшается. Сравнение ДЭ голографических решеток, записанных в планарно ориентированных слоях нематических и холестерических азосодержащих полимерах, показало, что надмолекулярная геликоидальная структура холестерического сополимера вызывает существенное уменьшение ДЭ [69].

Обзор ПЖК материалов для голографической записи информации дан в работе [13]. В сополимерах, химическая структура которого приведена ниже, была осуществлена поляризационная голографическая запись на пленках различной толщины (15–50 мкм).



На рис. 13.18а показана динамика ДЭ  $\eta$  при записи и последующей релаксации для этого материала при разной температуре. Дифракционная эффективность достигает больших значений

( $\eta_{\max} \sim 80\%$ ); голографическая чувствительность на пространственной частоте  $\nu = 1900 \text{ мм}^{-1}$  при  $45^\circ\text{C}$  составила  $1 \text{ см}^2/\text{Дж}$ . Большой динамический диапазон фотоиндуцированного двулучепреломления полимера позволил осуществить многоканальную голографическую запись с мультиплексированием по углу, что многократно превышает предельную информационную емкость образца. На рис. 13.18б приведен пример мультиплексной записи 15 голограмм в одной области образца толщиной 50 мкм под разными углами. Максимум каждого дифракционного типа мало зависит от его порядкового номера, что свидетельствует о пренебрежимо малом влиянии соседних мультиплексных голограмм. Использование поляризационной многоканальной записи в комбинации с возможностью мультиплексирования по углу позволяет значительно увеличить информационную емкость полимерной пленки, что представляет значительный интерес для задач высокоплотной записи и долговременного хранения информации. Запись голограмм на ПЖК представляет большой практический интерес. Так запись трехмерного изображения на голографическом компакт-диске, изготовленном с использованием азополимеров, может составлять 1000 гигабайт: на  $1 \text{ мм}^3$  размещается  $1024 \times 1024$  пикселей, что соответствует  $\sim 1000$  страницам

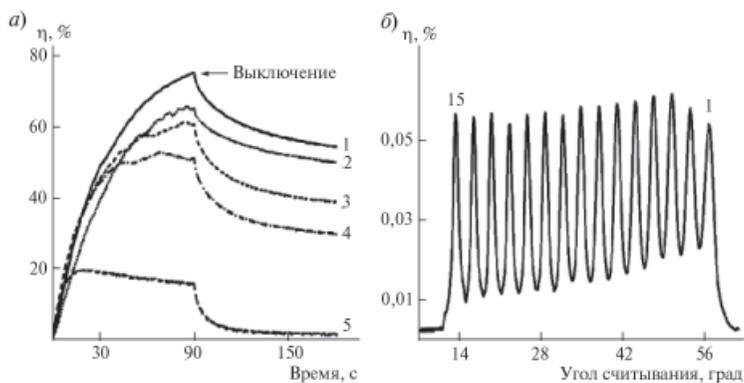


Рис. 13.18. Временная зависимость ДЭ для  $T = 44$  (1),  $38$  (2),  $48$  (3),  $50$  (4) и  $54^\circ\text{C}$  (5) при записи голограммы (а) и мультиплексная запись 15 многоканальных голограмм (б) [13]

стандартного размера. Стоимость одного бита информации при фотооптической записи примерно в 50 раз меньше, чем в случае магнитооптической записи [1].

В заключение отметим, что рассмотренные голографические электрически управляемые решетки перспективны также в качестве перестраиваемых оптических фильтров, мультиплексоров, демультиплексоров в оптических системах связи, в дизайне микродисплеев, оптических переключателей и световодов.

### 13.2. Динамическая голография при ориентации молекул ЖК электрическим полем

Рассмотрим возможности применения ЖК для записи динамических голограмм при использовании эффекта Фредерикса (в широком его понимании) — механизмы и схемы, основанные на ориентации молекул ЖК при прямом воздействии электрического поля. Можно выделить три различных случая такой ориентации:

— ориентация молекул непосредственно электрическим полем световой волны (*светоиндуцированный* или *оптический эффект Фредерикса*);

— ориентация молекул электрическим полем, создаваемым фотоиндуцированными свободными носителями заряда, находящимися в объеме ЖК (*фоторефрактивный эффект* в ЖК);

— ориентация молекул статическим или квазистатическим электрическим полем, неоднородным по сечению голограммы, неоднородность которого отображает картину интерференции световых волн, используемых для записи ДГ (голография в ЖК ПМС или *электроголография*).

Первые два эффекта являются эффектами нелинейной оптики, которые могут использоваться и для реализации различного рода голографических схем. Третий эффект не относится к нелинейной оптике, но может быть описан в ее терминах. В обзоре [70], посвященном нелинейной оптике жидких кристаллов, подробно рассмотрены теоретические и экспериментальные результаты в рассматриваемой области. Поэтому ограничимся лишь качественным рассмотрением важнейших эффектов и их ролью в динамической голографии, а также остановимся на ряде результатов в области голографии в ЖК ПМС, не отраженных в обзоре.

### *Ориентационная оптическая нелинейность и динамическая голография*

Известно, что эффект Фредерикса, т.е. ориентация молекул ЖК электрическим и магнитным полями, приложенными к объему ЖК, наблюдается не только в статических, но и в переменных полях. Поскольку анизотропия диэлектрической проницаемости присутствует и в диапазоне оптических частот, эффект переориентации молекул ЖК наблюдается и в поле достаточно слабой световой волны, что было подтверждено во многих работах, начиная с [71, 72]. Этот эффект наблюдается при интенсивности порядка долей или единиц Вт/см<sup>2</sup>, и величина его растет линейно пропорционально интенсивности возбуждающего излучения. Время его установления составляет доли секунды. С точки зрения схемотехники он представляет собой типичный кубический нелинейно-оптический эффект, сходный с уже известным ко времени его открытия механизмом *ориентационной нелинейности*, наблюдаемом в жидкостях с анизотропными молекулами, например, в CS<sub>2</sub> [9] или в изотропной фазе ЖК.

Этот эффект может наблюдаться как в нематиках [71–73], так и в холестериках [74] и смектиках [75], но до сих пор основные исследования эффекта и возможностей его применения проводились в основном в нематиках. В обзорах [70, 76, 77] дано развернутое изложение теории этого эффекта и известных ко времени их написания экспериментальных результатов, в том числе по записи динамических голограмм. Сам эффект получил в литературе название *гигантской оптической нелинейности* (ГОН) ЖК, так как на момент его обнаружения величина соответствующей нелинейности на 8–9 порядков превосходила нелинейность других, известных до того механизмов, в том числе и «обычной» ориентационной. При этом процесс установления динамических решеток занимал на 8–9 порядков больше время.

Мерой оптической нелинейности принято считать величину нелинейного коэффициента преломления  $n_2$ , описывающего нелинейную добавку к показателю преломления под воздействием излучения интенсивностью  $I$  и имеющего размерность см<sup>2</sup>/Вт. Величина показателя преломления при воздействии излучения определяется выражением:

$$n(I) = n_0 + n_2 I, \quad (13.2)$$

где  $n_0$  — линейный показатель преломления. Для ГОН значение  $n_2$  составляет  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  см<sup>2</sup>/Вт; для сравнения величины нелинейно-

го коэффициента преломления при «обычных» электронной (Керовской) или ориентационной нелинейностях лежат в диапазоне  $10^{-15}$ – $10^{-10}$  см<sup>2</sup>/Вт. Природа такой гигантской разницы достаточно очевидна — поворот соседних молекул нематика в поле световой волны, как и в статическом поле, взаимно «усиливает» друг друга за счет молекулярных связей. Этот эффект логичнее было бы назвать *оптический* или *светоиндуцированный переход (эффект) Фредерикса*, но по традиции это название применяют лишь к частному случаю взаимодействия излучения с гомеотропным слоем нематика. В отличие от общего случая, при котором нелинейная добавка к показателю преломления растет пропорционально интенсивности излучения, в гомеотропном слое нелинейность носит пороговый характер [76, 77].

В качестве ЖК сред для динамической голографии с ГОН чаще всего используют тонкие (единицы-десятки микрон) слои планарно или гомеотропно ориентированного нематика. Для получения эффективной модуляции фазового набега масштабом порядка длины волны излучения в таких слоях необходимо использовать записывающее излучение с интенсивностью порядка 1–10 Вт/см<sup>2</sup>. В принципе существуют значительно более чувствительные среды для ДГ с сопоставимым быстродействием, в первую очередь основанные на использовании поглощающих добавок к ЖК и на фоторефрактивном (ФР) эффекте в различных средах, включая ЖК. Однако ДГ на ГОН в чистых нематиках остаются актуальными по двум причинам: во-первых, в отличие от допированных и ФР сред, в которых принципиально присутствует поглощение на рабочей длине волны, чистый ЖК может иметь низкое поглощение, что дает возможность работы с излучением высокой интенсивности и средней мощности, и, во-вторых, ДГ на ГОН применимы в более широком спектральном диапазоне, чем ФР, так как диапазон работы ФР-сред ограничен областью их поглощения (в основном — видимым спектром), в то время как ГОН реализуется во всей области прозрачности нематика. ДГ в этом случае записывается как картина интерференции записывающих волн и реализует тонкую (в тонких слоях) или толстую голограмму. Основное применение таких ДГ — схемы нелинейно-оптической коррекции и обращения волнового фронта (ОВФ) — четырех волновые зеркала, петлевые схемы и ОВФ резонаторы [9, 10], согласованные с излучением непрерывных и частотно-непрерывных лазеров малой и средней пиковой и средней мощности. Например, в работе [78] ячейка

с НЖК толщиной 75 мкм использовалась в качестве ОВФ-зеркала в самостартующем ОВФ-лазере на основе Nd:YAG среды со средней выходной мощностью излучения 0,3 Вт (энергия в импульсе 10 мДж, частота повторения 30 Гц). В работах [79, 80] было показано, что параметрами таких ОВФ-зеркал, и, в частности, коэффициентом их отражения, можно управлять приложением к ЖК ячейке постоянного или квазистатического электрического поля амплитудой несколько вольт, соизмеримого по напряженности с полем световой волны ( $10^2$ – $10^3$  В/см).

Кроме обычного подхода к записи ДГ-решеток как картины интерференции двух взаимно наклоненных световых волн, в чистых ЖК с ГОН возможен еще один специфический для нематического ЖК механизм, известный как *решеточная ориентационная нелинейность* [81–84], (рис. 13.19). Пусть через слой планарно ориентированного

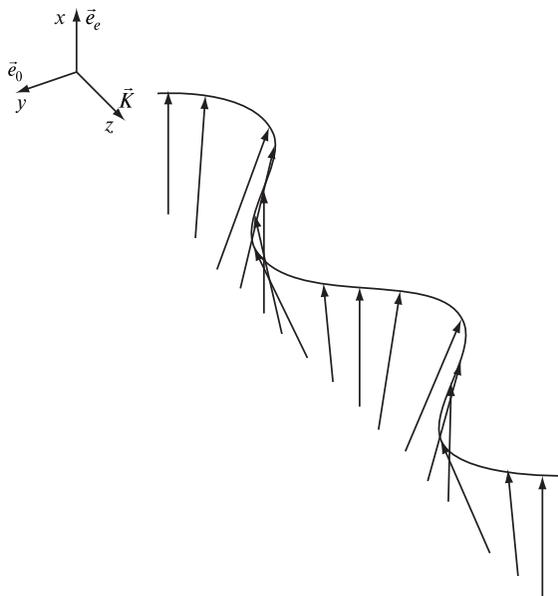


Рис. 13.19. Природа решеточной ориентационной нелинейности:  $z$  — направление распространения световых волн (волновой вектор  $\mathbf{k}$ ),  $x$  — направление поляризации необыкновенной волны ( $\mathbf{e}_e$ ), и  $y$  — направление поляризации обыкновенной волны ( $\mathbf{e}_o$ )

нематика соосно друг другу распространяются взаимно когерентные обыкновенная и необыкновенная световые волны. Из-за различия в их скоростях результирующий вектор напряженности поля световой волны, и, следовательно, направление ориентации директора нематика, будут испытывать пространственные осцилляции, что приводит к записи пространственной (Брэгговской) решетки показателя преломления, и, как следствие, к рассеянию света на ней. Этот эффект аналогичен *вынужденному рассеянию крыла линии Рэлея* (ВРКР [9]) или *вынужденному ориентационному рассеянию* света. При оптимизации параметров такая схема становится весьма эффективной, и уже при длине взаимодействия около 100 микрон возможна полная перекачка энергии волны накачки в рассеянную волну.

При возбуждении вынужденного ориентационного рассеяния пучком со сложной структурой, как и в более известных эффектах вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) и вынужденного теплового (энтропийного) рассеяния (ВТР), в среде может записываться безопорная динамическая голограмма, на которой происходит самообращение волнового фронта [9, 10].

При наличии поглощения в ЖК может возбуждаться не только ГОН, но и другие механизмы нелинейности, прежде всего тепловая, связанная, например, с локальным разупорядочением нематика. Этот механизм может дополнять ГОН [70, 76, 77, 10] и при определенных обстоятельствах может оказаться сопоставимым по эффективности [80].

В работах [85, 86] наблюдался нетепловой механизм записи ДГ в чистом нематике — вероятно, самый чувствительный из всех. При записи ДГ коротковолновым излучением гелий-кадмиевого лазера интенсивностью в доли Вт/см<sup>2</sup> величина нелинейного коэффициента преломления была на 1–2 порядка больше, чем в «обычной» ГОН. Природа этого эффекта связана с поглощением излучения молекулами ЖК, приводящим к существенному увеличению значения  $\Delta\epsilon$  и, соответственно, усилению ГОН по сравнению с обычным случаем. Такой механизм записи ДГ с «улучшенной» ГОН может быть интерпретирован и как метод записи ДГ с применением обратимых фотохимических реакций. Ряд исследователей [70] относят к ним и фотохимические методы записи ДГ, связанные с применением допирования ЖК азосодержащими и другими красителями [17, 18]. В этом случае используются термины *колоссальная ОН* (величина  $n_2$  в диапазоне  $10^{-3}$ – $1$  см<sup>2</sup>/Вт) и *супер-ОН* ( $n_2$  — более 1 см<sup>2</sup>/Вт).

### *Динамическая голография в фоторефрактивных ЖК средах*

Под фоторефрактивным эффектом (ФР) понимают обычно локальное изменение показателя преломления оптической среды под действием проходящего через нее излучения за счет фотогенерации носителей заряда и образуемого ими пространственно-неоднородного электрического поля, модифицирующего структуру среды за счет того или иного электрооптического эффекта (эффект Поккельса, эффект Керра и т. п.). Наиболее известен ФР эффект в неорганических кристаллах типа  $\text{BaTiO}_3$  и других [87, 88]; его также можно наблюдать в некоторых видах полимеров [89, 90]. ФР-эффект в ЖК был обнаружен также в тонких слоях НЖК, помещенных в постоянное или квазистатическое электрическое поле [91–95]. Механизм его иллюстрируется рис. 13.20, где показано устройство ФР ЖК ячейки и примерный ход лучей при записи в ней ДГ при двухволновом взаимодействии.

Обычно фоторефрактивная ЖК-ячейка содержит тонкий слой нематика толщиной от нескольких до сотни микрон, в котором под действием света генерируются свободные носители заряда. Такая генерация может осуществляться за счет наличия в слое ЖК светочувствительных добавок: красителей (антрахинона, родамина 6G, метилового красного, азокрасителей и др.) [91–99], фуллеренов и фуллереноподобных нанотрубок [100, 101]. Слой ЖК размещается в кювете с прозрачными окнами, на внутреннюю поверхность которых нанесены прозрачные токопроводящие покрытия на основе слоя ИТО и ориентирующие покрытия. К электродам ячейки прикладывается постоянное или медленно меняющееся напряжение величиной в несколько вольт.

Позднее был предложен и реализован альтернативный вариант построения фоторефрактивной ЖК ячейки. В этом случае используется нематик без добавок, а фотогенерация свободных носителей осуществляется вблизи границы раздела слоя ЖК и покрытия одного из стекол [93, 102, 103]. Она происходит в дополнительном слое фотопроводника (например, слоя BSO), граничащем со слоем ЖК, или в специальном ориентирующем покрытии (например, слое PVA); фотогенерированные носители затем диффундируют в объем ЖК. Во всех случаях при интерференции линейно поляризованных зондирующей и волны накачки в объеме ФР ЖК формируется модуляция распределения интенсивности излучения, и, следовательно, решетка свободных носителей (рис. 13.20б); часть из них скапливается на границах раздела и играет важную роль в динамике решетки. Фор-

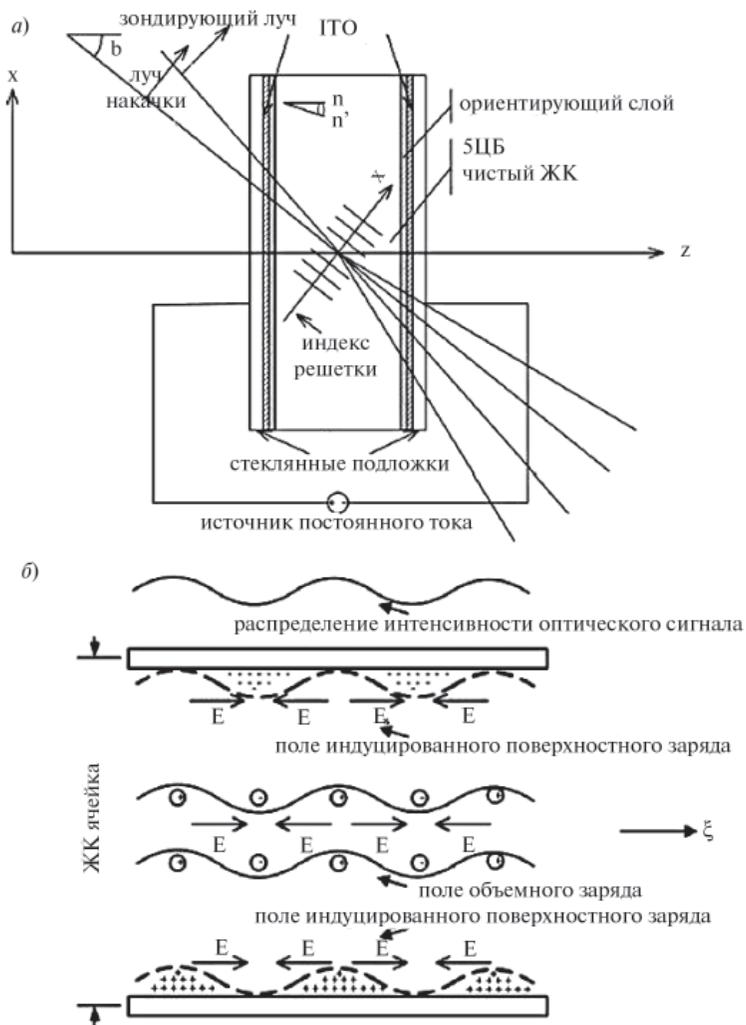


Рис. 13.20. К механизму записи ДГ в фоторефрактивных ЖК ячейках (вариант с допированным ЖК) [70]: а — устройство ячейки и ход лучей; б — распределение интенсивности в картине интерференции записывающих волн и перераспределение свободных носителей заряда в объеме ЖК и на границах его слоя

мируемое этими носителями неоднородное электрическое поле воздействует на молекулы нематика, ориентируя их и формируя решетку показателя преломления с коэффициентом нелинейной рефракции  $n_2 \sim 10^{-3} - 10^{-1} \text{ см}^2/\text{Вт}$ ; например, в работе [101] прямое измерение дало величину  $n_2 = 0,2 \text{ см}^2/\text{Вт}$ . Пространственная частота решетки может достигать десятков  $\text{мм}^{-1}$  (например  $30 \text{ мм}^{-1}$  [103, 104]). В зависимости от толщины слоя ЖК и геометрии эксперимента (угла между интерферирующими пучками) решетка может быть двумерной или трехмерной, формируя тонкие или толстые фазовые ДГ.

В различных работах рассматривались варианты ФР в планарно [102, 105, 106], гомеотропно [91, 92, 101] или твист [97] ориентированных нематиках. В работе [99] показана возможность записи в гомеотропно ориентированном ФР-нематике, допированном дихроичным азокрасителем, поляризационной ДГ при интерференции циркулярно поляризованных волн.

На рис. 14.20б показано, что пространственная решетка показателя преломления в ФР ЖК смещена относительно интерференционной картины примерно на четверть пространственного периода. Это означает, что, как и в других ФР-средах, в ФР ЖК формируется *смещенная* ДГ. В ДГ принято различать несмещенные и смещенные решетки [70, 87, 88]. В первом случае максимумы картины интерференции записывающих ДГ световых волн совпадают с максимумами (минимумами) решетки показателя преломления. С оптической точки зрения свойства таких ДГ (например, ДГ на ГОН в нематиках, где возможно лишь малое смещение решеток за счет нелинейности отклика [70]) мало отличаются от обычных статических голограмм. В частности, если в процессе записи решетки участвуют только две световые волны, то в стационарном по времени режиме никаких существенно новых (по сравнению со статической голографией) эффектов не наблюдается. Такие решетки можно рассматривать в каждый момент времени как моментальную «статическую» голограмму и использовать для записи и воспроизведения оптической информации, а также для ОВФ при четырехволновом взаимодействии [9, 10] и в других приложениях.

Дифракция на смещенных решетках, формируемых в частности, в ФР средах, приводит к ряду принципиально новых эффектов, известных как *двухволновое взаимодействие*. Самодифракция записывающих волн на записываемой ими же смещенной ДГ приводит к появлению новых порядков дифракции а также перекачке энергии из одной из записывающих волн в другую. Эти эффекты наблюда-

лись и в случае ДГ, записываемых в ФР ЖК ячейках. В частности, применение оптической обратной связи (зеркал) в таких схемах [104] позволило реализовать самонакачиваемые ОВФ-зеркала.

Особым свойством ФР-решеток в нематиках, отличающим их от других механизмов записи ДГ в ЖК, является возможность реализации *скрытых решеток* [100, 101, 105]. Оно заключается в следующем. Если записать в такой среде ДГ, а потом отключить напряжение питания ячейки, то дифракция на ДГ, естественно, исчезнет. Однако, если по прошествии некоторого времени (минуты, часы, а иногда и неограниченный промежуток) снова подать на ячейку напряжение, то решетка вновь проявится и можно будет наблюдать дифракцию на ней. Сила решетки в этом случае зависит от величины подаваемого напряжения. При этом запись скрытых решеток возможна даже в неориентированных слоях ЖК. Механизм этого интересного и потенциально полезного эффекта изучен в работах [107–109] и связан с накоплением носителей заряда на границе раздела ячейка-окно и модификацией ими ориентирующих свойств покрытия окна.

В случае ФР-ячеек с генерацией носителей заряда в фотопроводнике еще одним важным следствием накопления носителей заряда на границе раздела ЖК-фотопроводник является экранирование ими электрического поля, что может приводить к модификации структуры ДГ и, как следствие, нарушению симметрии в процессе передачи энергии между взаимодействующими световыми волнами [110].

### Литература к главе 13

1. *Шибает В.П.* Жидкокристаллические полимеры — прошлое, настоящее и будущее // Высокомолекул. соед. 2009. Т. 51, № 11. С. 1863–1929.
2. *Денисюк Ю.Н.* Принципы голографии. 1978. Л.:ГОИ. 125 с.
3. *Островский Ю.И.* Голография и ее применение. 1973. Л.:Наука. 180 с.
4. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. 1973. М.:Мир. 686 с.
5. Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда. 1982. М.:Мир. Т.1, 2. 736 с.
6. *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. 1983. Л.:Наука. 270с.
7. *Рубанов А. С.* Некоторые вопросы динамической голографии / в кн.: Проблемы современной оптики и спектроскопии, Минск, 1980.
8. *Винецкий В.Л., Кухтарев Н.В.* Динамическая голография. К., 1983.

9. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. 1985. М.: Наука. 247 с.
10. Дмитриев В.Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта. М., Физматгиз, 2003.
11. Чирцов А.С. Динамическая голография и проблема обращения волнового фронта // Соросовский образ. журнал. 2001. № 1. С. 89–95.
12. Васильев М.В., Венедиктов В.Ю. Леицёв А.А. Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 1. С. 1–15.
13. Ikeda T. Photomodulation of LC orientation for photonic applications // J. Mat. Chem. 2003. Vol. 13. P. 2037–2057.
14. Tazuke S., Kurihara S., Ikeda T. Amplified image recording in LC media by means of photochemically triggered phase transition // Chem. Lett. 1987. P. 911–914.
15. Sung J.-H., Hirano S., Tsutsumi O., Kanazawa A., Shiono T., Ikeda T. Dynamics of photochemical phase transition of guest/host LCs with an azobenzene derivative as a photosensitive chromophore // Chem. Mater. 2002. Vol. 14. P. 385–391.
16. Petrosyan A., Residori S. Surfactant enhanced reorientation in dye-doped NLCs // Europhys. Lett. 2003. Vol. 61. P. 575.
17. Chen A.G., Brady D.J. Real-time holography in azo-dye-doped LCs // Optics Lett. 1992. Vol. 17. № 6. P. 441–443.
18. Khoo C., Slussarenko S., Guenther B.D., Shih M.Y., Chen P., Wood W.V. Optically induced space charge fields, dc voltage, and extraordinary large non-linearity in dye-doped NLCs // Opt. Lett. 1998. Vol. 23. P. 253–255.
19. Provenzano C., Pagliusi P., Cipparone G. Highly efficient LC based diffraction grating induced by polarization holograms at the aligning surfaces // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 121105–3.
20. Sackmann E. // J. Am. Chem. Soc. 1971. Vol. 93. P. 7088.
21. Lemieux R.P., Schuster G.B. Photochemistry of axially chiral (aryl)methylene cycloalkanes: A search for suitable photoswitchable LC materials // J. Org. Chem. 1993. Vol. 58. P. 100.
22. Zang M., Schuster G.B. // J. Phys. Chem. 1992. Vol. 116. P. 3063.
23. Feringa B.L., Jager W.F., de Lange B., Meijer E.W. // J. Am. Chem. Soc. 1991. Vol. 113. P. 5468.
24. Huck N.P.M., Jager W.F., de Lange B., Feringa B.L. Dynamic control and amplification of molecular chirality by circularly polarized light // Science. 1996. Vol. 273. P. 1686.
25. Sasaki T., Ikeda T., Ichimura K. Photochemical control of properties of ferroelectric LCs: photochemical flip of polarization // J. Am. Chem. Soc. 1994. Vol. 116. P. 625–628.
26. Komitov L., Ruslim C., Ichimura K. Optical recording using a photochromic FLCs // Ferroelectrics. 2000. Vol. 244. P. 265.
27. Matsui T., Yusuf E., Ozaki M., Yoshino K. Holographic fabrication of periodically alignment domain structure using azo-dye doped FLC having N\*-C\*phase sequence // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2004. Vol. 413. P. 473–478.

28. *Fuh A.Y.-G., Mo T.S.* Holographic grating based on dye-doped surface-stabilized FLC films // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2004. Vol. 413. P. 591–600.
29. *Sutherland R.L.* Bragg scattering in permanent nonlinear particle composite gratings // *J. Opt. Soc. Am.* 1991. Vol. 8. P. 1516.
30. *Sutherland R.L., Natarajan L.V., Tondiglia, Bunning T.J.* Bragg gratings in an acrylate polymer consisting of periodic PDLC planes // *Chem. Mater.* 1993. Vol.5. P.1533–1538.
31. *Sutherland R.L., Tondiglia V.P., Natarajan L.V., Bunning T.J., Adams W.W.* Electrically switchable volume gratings in PDLC // *Appl. Phys. Lett.* 1994. Vol. 64. P. 1074–1076.
32. *Janossy I.* Molecular interpretation of the absorption-induced optical reorientation of NLCs // *Phys.Rev. E.* 1994. Vol. 49. P.2957.
33. *Bunning T.J., Natarajan L.V., Tondiglia V.P., Sutherland R.L.* Holographic polymer-dispersed liquid crystals (H-PDLCs) // *Annu. Rev. Matter. Sci.* 2000. Vol. 30. P. 83–115.
34. *Pogue R.T., Sutherland R.L., Schmitt M.G., Natarajan L.V., Siwecki S.A., Tondiglia V.P., Bunning T.J.* Electrically switchable Bragg gratings from liquid crystal/polymer composites // *Applied spectroscopy.* 2000. Vol. 54. No 1.12A-28A.
35. *Жаркова Г.М., Самсонова И.В., Стрельцов С.А., Хачатурян В.М., Петров А.П.* Влияние надмолекулярной структуры ЖК композитов на их оптические свойства // *Жидкие кристаллы и их практическое использование.* 2007. Вып. 3. С. 45–58.
36. *Жаркова Г.М., Петров А.П., Самсонова И.В., Стрельцов С.А., Хачатурян В.М.* Поляризационные характеристики полимерно-жидкокристаллических дифракционных решеток // *Опт. журн.* 2008. Т. 75. № 8. С. 48–52.
37. *Жаркова Г.М., Петров А.П., Самсонова И.В., Хачатурян В.М.* Исследование оптических свойств голографических полимерно-жидкокристаллических материалов для фотоники // *Химия высоких энергий. Специальный выпуск «Нанопотоника».* 2008. Т. 42. № 4. С. 47–37.
38. *Bowley C.C., Fontecchio A.K., Lin J.-J., Yuan H., Crawford G.P.* Advances in holographic PDLC technology // *Mat. Res. Soc. Sym. Proc.* 1999. Vol. 559. P.97–107.
39. *Jazbinsek M., Drevensek Olenik I., Zgonik M., Fontecchio A.K., Crawford G.P.* Characterization of holographic PDLC transmission gratings // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 90. P. 3831–3837.
40. *Bunning T.J., Natarajan L.V., Tondiglia V.P., Sutherland R.L.* Holographic polymer-dispersed liquid crystal (H-PDLC) // *Annu. Rev. Mater. Sci.* 2000. Vol. 30. P. 83–105.
41. *Кануто Р., Сухов А.В., Уметон Ч., Ушаков Р.Ф.* Образование решетки субмикронных слоев нематика при фотополимеризации нематосо-держающих смесей // *ЖЭТФ.* 2000. Т. 118. В. 6(12). С. 1374–1383.
42. *Bunning T.J., Natarajan L.V., Tondiglia V.P.* et al. Morphology of reflection holograms formed in situ using PDLC // *Polymer.* 1996. Vol. 14. P. 3147.

43. *Crawford G.P., Fiske T.G., Silverstein L.D.* Reflective color LCGs based on H-PDLC and PSCT technologies // *SID Int. Symp. Digest Techn. Papers.* 1996. Vol. 27. P. 99.
44. *Tanaka K., Kato K., Tsuru S.* et al. Holographically formed liquid crystal/polymer device for reflective color display // *J. SID.* 1994. Vol. 2. P. 37.
45. *Escuti M.J., Kossyrev P., Bowley C.C.* et al. Diffuse H-PDLC reflective displays: an enhanced viewing-angle approach // *SID Int. Symp. Digest Techn. Papers.* 2000. Vol. 31. P. 766.
46. *Фонтеччо А.К., Боули К.К., Чмура С.М., Ли Л., Фарис С., Крауфорд Г.П.* Мультиплексированные ЖК, голографически диспергированные в полимере // *Опт. журн.* 2001. Т. 68, № 9. С. 19–24.
47. *Hikmet R.A.M.* Anisotropic gels obtained by polymerization in liquid crystal state / In: *Liquid crystals in complex geometries.* / Eds.: G.P. Crawford, S. Zimmer. London: Taylor & Francis, 1996. P. 53–82.
48. *Жаркова Г.М., Самсонова И.В., Стрельцов С.А., Хачатурян В.М., Петров А.П., Крахалев М.Н., Прищепина О.О., Шабанов А.В., Зырянов В.Я.* Методы изготовления структурно упорядоченных полимерно-жидкокристаллических композитов и управления их свойствами. / В сб.: *Фотонные кристаллы и нанокompозиты: Структурообразование, оптические и диэлектрические свойства.* Под ред. В.Ф. Шабанова, В.Я. Зырянова. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2009. 236 с.
49. *Kogelnik H.* Coupled wave theory for thick hologram gratings // *Bell Syst. Tech. J.* 1969. Vol. 48. P. 2909–2925.
50. *Zharkova G.M., Samsonova I.V., Streltsov S.A., Khachatryan V.M.* Optical methods of structurization of polymer-liquid-crystal materials // *Proc. of XIII Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2007).* Novosibirsk, Russia. 2008. P. 219–224.
51. *Sutherland R.L.* Polarization and switching properties of holographic polymer-dispersed liquid-crystal gratings. 1. Theoretical model // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2002. Vol. 19. № 12. P. 2995–3003.
52. *Sutherland R.L., Natarajan L.V., Tondiglia V.P., Chandra S., Shepherd C.K., Brandelik D.M., Siwecki S.A.* Polarization and switching properties of holographic polymer-dispersed liquid-crystal gratings. 2. Experimental investigations // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2002. Vol. 19. № 12. P. 3004–3012.
53. *Tondiglia V.P., Sutherland R.L., Natarajan L.V., Lloyd P.F., Bunning T.J.* Droplet deformation and alignment for high-efficiency polarization-dependent holographic PDLC reflection gratings // *Opt. Lett.* 2008. Vol. 33. № 16. P. 1890–1892.
54. *Caputo R., Sukhov A.V., Tabirian N.V., Umeton C., Ushakov R.F.* Mass transfer process induced by inhomogeneous photo-polymerisation in a multi-component medium // *Chem. Phys.* 2001. Vol. 271. P. 323–335.
55. *Caputo R., de Sio L., Veltri A., Umeton C., Sukhov A.V.* Development of a new kind of switchable holographic grating made of LC films separated by slice of polymer material // *Opt. Lett.* 2004. Vol. 29. № 11. P. 1261–1263.

56. *d'Alessandro A., Asquini R., Gizzi C., Caputo R., Umeton C., Veltri A., Sukhov A.V.* Electro-optic properties of switchable gratings made of polymer and nematic liquid-crystal slices // *Optics Letters*. 2004. Vol. 29 № 12. P. 1405–1407.
57. *Khoo I.C.* Holographic grating formation in dye- and fullerene C<sub>60</sub>-doped NLC film // *Opt. Lett.* 1995. Vol. 20. № 20. P. 2137–2139.
58. *Каманина Н. В., Сизов В. Н., Стаселько Д. И.* Запись тонких фазовых голограмм в полимер-диспергированных жидкокристаллических композициях на основе фуллереносодержащих р-сопряженных органических систем // *Опт. и спектр.* 2001. Т. 90. № 1. С. 5–7.
59. *Cipparrone G., Mazzulla A., Russo G.* Diffraction gratings in PDLCs recorded by means of polarization holographic technique // *Appl. Phys. Lett.* 2001. Vol. 78. № 9. P. 1186–1188.
60. *Mazzulla A., Pagliusi P., Provenzano C., Russo G., Cipparrone G.* Surface relief gratings on PDLCs by polarization holography // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. № 13. P. 2505–2507.
61. *Zharkova G.M., Petrov A.P., Strelsov S.A., Khachatryan V.M.* Electrooptical properties of polarization holographic gratings formed in LC composites // *High Energy Chemistry*. 2009. Vol. 43. №7. P. 529–531.
62. *Todorov T., Nikolova L., Tomova N.* Polarization holography: A new high-efficiency organic material with reversible photoinduced birefringence // *Appl. Opt.* 1984. Vol. 23. P. 4309–4312.
63. *Kawatsuki N., Takatsuka H., Yamamoto T., O. Sangen T.* Optical anisotropy of photoreacted side-chain LC polymer induced by linearly polarized UV light // *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.* 1998. Vol. 36. P. 1521–1526.
64. *Kawatsuki N., Yamamoto T., Ono H.* Photoinduced alignment control of photoreactive side-chain polymer LC by linearly polarized UV light // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 74. P. 935–937.
65. *Kawatsuki N., Goto K., Kawakami T., Yamamoto T.* Reversion of alignment direction in the thermally enhanced photoorientation of photo-cross-linkable polymer LC films // *Macromolecules*. 2002. Vol. 35. P. 706–713.
66. *Ono H., Emoto A., Takahashi F., Kawatsuki N., Hasegawa T.* Highly stable polarization gratings in photocrosslinkable polymer LCs // *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 94. P. 1298–1303.
67. *Ono H., Kawatsuki N.* Polarization holographic device using photoreactive polymer LCs // *Advances in Technology of Materials and Materials Processing*. 2005. Vol. 7[1]. P. 9–16.
68. *Симонов А.Н., Ларичев А.В., Шибеев В.П.* Голографическая запись в пленках азосодержащих ЖК полимеров в присутствии ориентирующего электрического поля // *Квантовая электр.* 2000. Т. 30. № 7. С. 635–640.
69. *Bobrovsky A., Shibaev V., Wendorff J.* Comparative study of holographic recording in cholesteric and nematic azo-containing side-chain polymers // *Liquid Crystals*. 2007. Vol. 34. № 1. P. 1–7.
70. *Khoo C.* Nonlinear optics of liquid crystalline materials. // *Physics Reports*. 2009. Vol. 471. P. 221–267.

71. *Зельдович Б.Я., Табiryан Н.В.* Вынужденное рассеяние света в мезофазе НЖК // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30. № 8, С. 510–513.
72. *Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Сухов А.В., Табiryан Н.В.* Гигантская оптическая нелинейность в мезофазе НЖК. // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. № 5. С. 287–292.
73. *Tabiryán N. V.; Zel'dovich B. Ya.* The orientational optical non-linearity of LCs. I. Nematics // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1980. Vol. 62. P. 250.
74. *Tabiryán N. V.; Zel'dovich B. Ya.* The orientational optical non-linearity of LCs. II. Cholesterics // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. Vol. 69. P. 19–29.
75. *Tabiryán N. V.; Zel'dovich B.* The orientational optical non-linearity of LCs. III. Smectics // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. Vol. 69. P. 31–46.
76. *Зельдович Б.Я., Табiryан Н.В.* Ориентационная оптическая нелинейность жидких кристаллов. // УФН. 1985. Т. 147. № 4. С. 633–674.
77. *Tabiryán N. V., Zel'dovich B. Ya., Sukhov A. V.* The orientational optical nonlinearity of LCs // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1986. Vol. 136. P. 1–140.
78. *Antipov O. L., Chausov D. V., Kuzhelev A. S., Zinov'ev A. P.* Self-starting laser oscillator with a nonlinear nematic liquid-crystal mirror. // J. Opt. Soc. Am. B. 2001. Vol. 18. No. 1. P. 13–20.
79. *Chen S.-H., Shen Y.* Optical phase conjugation in a nematic liquid-crystal film modulated by a quasi-static electric field. // J. Opt. Soc. Am. B. 1997. Vol. 14. No. 7. P. 1750–1753.
80. *Shen Y., Hsu H.-K., Chen S.-H.* Phase-conjugate reflection and self-starting optical phase-conjugate oscillation in planar NLC cells // J. Opt. Soc. Am. B. 2003. Vol. 20. No. 1. P. 65–72.
81. *Зельдович Б.Я., Мерзликин С.К., Пилипецкий Н.Ф., Сухов А.В.* Наблюдение вынужденного ориентационного рассеяния света вперед в планарном нематике // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. № 10. С. 418–421.
82. *Гусев И.В., Зельдович Б.Я., Кривощев В.А., Садовский В.Н.* Стационарное вынужденное рассеяние на решеточной нелинейности в планарном НЖК // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 55. № 3. С. 185–189.
83. *Kho S., Liang Yu, Li H.* Observation of stimulated orientational scattering and cross-polarized self-starting phase conjugation in a NLC film // Opt. Lett. 1995. Vol. 20, No. 2. January 15.
84. *Tabiryán N. V., Zel'dovich B. Ya., Sukhov A. V.* High-efficiency energy transfer due to stimulated orientational scattering of light in NLCs // J. Opt. Soc. Am. B. 2001. Vol. 18, No. 8, P. 1203–1205.
85. *Одулов С.Г., Резников Ю.А., Сарбеи О.Г., Соскин М.С., Фролов Е.К., Хижняк А.И.* Динамические голографические решетки в мезофазе НЖК // УФЖ. 1980. Т. 25. С. 1922.
86. *Одулов С.Г., Резников Ю.А., Соскин М.С., Хижняк А.И.* // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. С. 1475.
87. *Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В.* Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука Санкт-Петербургское отд. 1992. 320 с.

88. Photorefractive Materials and Their Applications / P.Gunter, J.P.Huignard (Eds.). Springer-Verlag, Berlin 1989. Vol. I and II.
89. *Ванников А.В., Гришина А.Д.* Фоторефрактивный эффект в полимерных системах // Успехи химии. 2003. Т. 72. № 6. С. 531–549.
90. Ostroverkhova and Moerner W.E.. Organic photorefractives: mechanisms, materials and applications // Chem. Rev. 2004. Vol. 104. P. 3267–3314/
91. *Руденко Е.В., Сухов А.В.* Фотоиндуцированная электропроводность и фоторефракция в нематике // Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. № 2. С. 133–136.
92. *Руденко Е.В., Сухов А.В.* Оптически индуцированное пространственное разделение зарядов в нематике и обусловленная им ориентация / ЖЭТФ. 1994. Т. 105. С. 1621–1634.
93. *Khoо I.C., Li H., Liang Y.* Observation of orientational photorefractive effects in NLCs // Opt. Lett. 1994. Vol. 19. P. 1723–1725.
94. *Khoо I.C.* Orientational photorefractive effects in NLC films // IEEE J. Quant. Electron. 1996. Vol. 32. P. 525–534.
95. *Zhang G., Montemezzani G., Gunter P.* Orientational photorefractive effect in NLC with externally applied fields // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88, No. 4, 15 August.
96. *Miniewicz A. Bartkiewicz S., Artkiewicz A., Januszko A., Parka J.* NLCs as media for real-time holography // Journ. of Inclusion Phen. and Macrocylic Chem. 1999. Vol. 35. P. 317–325.
97. *Grudniewski T., Parka J., Dobrowski R., Januszko A., Miniewicz A.* Investigations of the diffraction efficiency in dye-doped LC cells under low frequency AC voltage // Proceed. SPIE. 2002. Vol. 4759. P. 298–302.
98. *Grudniewski, T., Sutkowski M., Lepkowski M., Parka J., Nowinowski-Kruszelnicki E.* Mechanisms of re-writable hologram recordings in NLC cells // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. Vol. 494. P. 309–319.
99. *Wang J.-R., Lee C.-R., Lee M.-R., Fuh Y.-G.* Photorefractive effect induced by polarization gratings in dye-doped LCs // Opt. Lett. 2004. Vol. 29 No.1. January 1.
100. *Sun X., Yao F., Pei Y., Zhang J.* Light controlled diffraction gratings in C60-doped NLCs // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. P. 013104.
101. *Sun X., Ren C., Pei Y. Yao F.* Electrically controlled dynamic holographic gratings in fullerene C60-doped NLCs // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41 P. 245105.
102. *Pagliusi P., Cipparrone G.* Extremely sensitive light-induced reorientation in nondoped NLC cells due to photoelectric activation of the interface // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93, No. 11, 1 June.
103. *Bortolozzo U., Residori S., Petrosyan A., Huignard J.P.* Pattern formation and direct measurement of the spatial resolution in a photorefractive LC light valve // Opt. Commun. 2006. Vol. 263. P. 317–321.
104. *Huignard J.P., Bortolozzo U., Residori S.* Self-pumped phase conjugation in a LC light valve with a tilted feedback mirror // Opt. Lett. 2007. Vol. 32. No.7. April 1.

105. *Агашков А.В., Ковалев А.А., Парка Я.* Динамическая фоторефрактивность в НЖК ячейках с фотопроводящими ориентирующими слоями // *Опт. и Спектр.* 2005. Т. 98. № 6. С. 1021–1026.

106. *Miniewicz A, Mysliwiec J., Kajzar F., Parka J.* On the real-time reconstruction of digital holograms displayed on photosensitive LC systems // *Opt. Mater.* 2006. Vol. 28. P. 1389–1397.

107. *Tabiryan N.V., Umetsu C.* Surface-activated photorefractivity and electro-optic phenomena in LCs // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1998. Vol. 15. No. 7. July.

108. *Korneychuk P.P.* et al. Hidden surface photorefractive gratings in a NLC cell in the absence of a deposited alignment layer // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2006. Vol. 23. No. 6. June.

109. *Lucchetti L.* et al. Surface-induced nonlinearities of LCs driven by an electric field // *Phys. Rev.* 2008. E 78. P. 061706.

110. *Kaczmarek M., Dyadyusha A., Slussarenko S., Khoo I. C.* The role of surface charge field in two-beam coupling in LC cells with photoconducting polymer layers // *J. Appl. Phys.* 2004. Vol. 96. No. 5. 1 Sept.

## *Глава 14*

### **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СЛОЯ НЖК, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ**

Одной из актуальных задач современного материаловедения является изучение структуры поверхности материалов и объектов, что в большинстве случаев связано с дефектоскопией [1]. Свойства поверхности интересуют медицину и биологию при изучении патологий. Современная микроскопия не позволяет детектировать распределение полей на поверхности объектов. Визуализация этих полей может осуществляться локальной переориентацией молекул НЖК в области их действия. Деформация осуществляется в сверхтонком приповерхностном слое НЖК, который транслирует двумерную локальную ориентацию в толщу слоя. Граница «поверхность-НЖК», выполняет функцию «командного слоя», а происходящие в ней явления имеют наноразмерную шкалу. Для получения фазовой задержки, достаточной для визуализации деформаций (а значит и изучаемых полей), используют слои НЖК толщиной то 1 до 50 мкм. Поля, распределенные на поверхности объекта, визуализируются средствами поляризационной микроскопии по их репликам в слое НЖК.

#### **14.1. Анализ локальных деформаций слоя НЖК вблизи неидеальной поверхности**

Межмолекулярные взаимодействия твердого тела и ЖК носят, в основном, дисперсионный диполь-дипольный характер и очень чувствительны к изменению свойств поверхности. Дефект поверх-

ности можно представить как локальный скачок энергии связи молекул ЖК с подложкой, приводящий к локальной переориентации слоя ЖК. Изображения дефектов поверхности определяется распределением поля директора  $\mathbf{n}$  ЖК вблизи дефектов. Поэтому в теории визуализации локальных деформаций основная задача состоит в нахождении поля директора  $\mathbf{n}$  как функции координат  $y, z$  и параметров НЖК: констант упругости  $K_{ij}, n_e, n_o$ , поверхностных натяжений подложки  $\gamma_{жк}$ , подложки  $\gamma_p$ , и конструктивных факторов (толщины слоя ЖК  $d$ ).

В работе [2] показаны пути аналитического решения и экспериментальные исследования деформаций и их изображений, создаваемых в зонах локальных дефектов граничной поверхности.

Деформация слоя НЖК возникает за счет моментов сил межмолекулярного взаимодействия с изучаемой поверхностью. Существование ориентационных деформаций обеспечивается условием равновесия в объеме НЖК и на его поверхности. Уравнение равновесия в объеме имеет вид:

$$\begin{aligned} & K_{11}\mathbf{n} \times \text{grad div } \mathbf{n} - K_{33}\mathbf{n} \times \text{rot rot } \mathbf{n} + \\ & + (K_{33} - K_{22})\{2(\mathbf{n} \text{ rot } \mathbf{n})(\mathbf{n} \times \text{rot } \mathbf{n}) + \text{grad}(\mathbf{n} \text{ rot } \mathbf{n}) - \\ & - \mathbf{n}[\mathbf{n} \text{ grad}(\mathbf{n} \text{ rot } \mathbf{n})]\} = 0. \end{aligned} \quad (14.1)$$

Уравнение равновесия моментов на поверхности имеет вид:

$$\mu = M, \quad (14.2)$$

здесь  $\mu$  — моменты, порожденные деформированным слоем НЖК;  $M$  — уравновешивающие моменты твердой подложки.

Уравнение (14.2) представляет собой граничное условие к уравнению (14.1) и влияет на его решение. Естественно  $\mu$  зависит от параметров НЖК, а  $M$  — от характеристик твердой подложки.

Общее выражение для  $\mu$  имеет вид линейного по градиентам  $\partial n/\partial x$  соотношения:

$$\begin{aligned} \mu_i = & \left[ K_{21}v_m + (K_{33} - K_{22})n_m(\mathbf{nv}) \right] n_p \frac{\partial n}{\partial x_m} \psi_{\text{psi}} + \\ & + (K_{22} - kK_{11} + K_{24})(\delta_{im} - n_i n_m)(\mathbf{v} \times \mathbf{n}) \frac{\partial n_s}{\partial x_m} - \\ & - K_{24} \left[ v_i - n_i(\mathbf{nv}) \right] n_p \psi_{\text{psm}} \frac{\partial n_s}{\partial x_m}. \end{aligned} \quad (14.3)$$

Здесь  $\nu$  — внешняя нормаль к границе  $s$ ;  $K_{24}$  — «поверхностная» константа упругости, отсутствующая в уравнении для объема.

Принимая  $n_x = \sin\varphi$ ,  $n_y = \cos\varphi$ , запишем выражение для проекции момента  $\mu$  на ось  $oz$ :

$$\begin{aligned} \mu_z = & -(K_{11}\sin^2\varphi + K_{33}\cos^2\varphi) \left( \frac{\partial\varphi}{\partial y} \right) + \\ & + (K_{33} - K_{11})\sin\varphi\cos\varphi \left( \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (14.4)$$

Эта составляющая представляет момент, вызванный ориентационными деформациями изгиба НЖК в слое. Изгибные деформации не создают других составляющих момента ( $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ), поэтому при решении задач изгиба достаточно ограничиться выражением (14.4).

Момент твердой подложки  $M$  связан с анизотропией поверхностного натяжения сверхтонкого слоя между ЖК и подложкой. Структура этого адсорбционного нанослоя определяется природой сил и моментов взаимодействия с подложкой. В первом приближении характер взаимодействия молекул ЖК с подложкой можно рассматривать зависящим от соотношения их сил поверхностного натяжения. Ориентационные деформации ЖК не влияют на его структуру, и свойства адсорбционного слоя определяется подложкой. В частности, подложкой определяется анизотропия этого слоя и энергия сцепления НЖК с подложкой. Если толщина адсорбционного слоя также не зависит от деформаций НЖК, то можно ввести поверхностную энергию  $W$  взаимодействия НЖК с подложкой, зависящую лишь от ориентации молекул НЖК по отношению к направлению анизотропии поля поверхностных сил самой подложки. Следует иметь ввиду, что твердая поверхность может вызывать в тонких приграничных слоях переход НЖК в смектическую фазу, как это показано в работе [3]. Однако, как следует из экспериментов, это явление существенно не изменяет характер взаимодействия ЖК с подложкой.

Наличие слабых дальнедействующих сил подложки, убывающих по степенному закону, вынуждает рассматривать их как поля, распределенные в объеме. В этом случае вклад вносится не в уравнение (14.2), а в уравнение (14.1), и в правой части появляется соответствующий член. В настоящей работе этот случай не рассматривается и принимается, что

$$W \approx \int_{y_c}^{\infty} U(\Delta y) dy + W_{\text{сц}}, \quad (14.5)$$

Здесь  $W_{\text{сц}}$  — энергия сцепления, обусловленная короткодействующими силами;  $U(\Delta y) \approx 1/\Delta y^n$  — ван-дер-ваальсов потенциал поверхности ( $n \geq 3$ );  $y_c \approx 1 \cdot 10^{-5}$  см — радиус действия сил.

Поверхностное натяжение твердых тел в отличие от жидкостей неоднородно вдоль поверхности и существенно анизотропно. Это важно для поверхностных явлений, изучаемых с помощью ЖК. Наличие в приповерхностном слое твердого тела внутренних напряжений, связанных с остаточными деформациями, нарушениями сплошности и изменениями микроструктуры в процессе формирования поверхности, определенным образом сказываются на анизотропии и неоднородности поверхностного натяжения [4]. Последнее обстоятельство будет учтено зависимостью энергии  $W$  от координат вдоль поверхности:  $W = W(x, y)$  — в случае ее совпадения с координатной плоскостью  $xu$ . Анизотропия энергии требует согласно работе [5] введения не одного, как это принято в литературе [6, 7], а двух направлений: нормали к поверхности  $\nu$  и так называемого направления легкой ориентации, отражающего анизотропию структуры ее приповерхностных слоев.

Поэтому

$$W = W(x, z, \nu, \tau). \quad (14.6)$$

Явный вид этой функции определяется природой сил взаимодействия ЖК-подложка. Эти силы могут иметь полярную и дисперсионную природу с различной зависимостью от расстояния, но с универсальным характером анизотропии. Полярные взаимодействия дают члены в энергию линейные по  $\nu$  и  $\tau$ , а дисперсионные — квадратичные, т. е.:

$$W = W_0 + W^n + W^{\Delta}; \quad (14.7)$$

$$W^n = W_1(x, z) (\nu) + W_2(x, z) (\tau); \quad (14.8)$$

$$W^{\Delta} = W_3(x, z) (\nu)^2 + W_4(x, z) (\nu) (\tau) + W_2(x, z) (\tau)^2 \quad (14.9)$$

Энергии  $W^n$  и  $W^{\Delta}$  зависят от изменения орта ориентации директора  $\mathbf{n}$ , поскольку в рассматриваемых задачах направления  $\nu$  и  $\tau$  на поверхности можно считать фиксированными. Соответствующие изменения ориентации  $\mathbf{n}$  у самой поверхности вызывают появление моментов сил  $\mathbf{M}$ , с которыми переходной слой будет действовать на объем ЖК.

По определению

$$\mathbf{M} = \mathbf{n} \times \frac{\partial W}{\partial \mathbf{n}}. \quad (14.10)$$

Для моментов полярных  $M^n$  и дисперсионных сил  $M^d$  сил:

$$M^n = W_1(\mathbf{n} \times \mathbf{v}) + W_2(\mathbf{n} \times \boldsymbol{\tau}) \quad (14.11)$$

$$M^d = 2W_3(\mathbf{n} \times \mathbf{v})(n\mathbf{v}) + W_4[(\mathbf{n} \times \mathbf{v})(n\boldsymbol{\tau}) + (\mathbf{n} \times \boldsymbol{\tau})(n\boldsymbol{\tau})] + 2W_5(\mathbf{n} \times \boldsymbol{\tau})(n\boldsymbol{\tau}) \quad (14.12)$$

Эти поверхностные моменты могут создавать в объеме ЖК изгибные и крутящие моменты. Учитывая лишь изгибные моменты, запишем выражение для поверхностных моментов, совместив орты  $\mathbf{v}$  и  $\boldsymbol{\tau}$  с координатными осями  $O_y$  и  $O_x$  соответственно:

$$M_z^n = W_1(x)n_x - W_2(x)n_y; \quad n_x = \sin\varphi, \quad n_y = \cos\varphi \quad (14.13)$$

$$M_z^d = 2W_3(x)n_x n_y + W_4(x)[n_x^2 - n_y^2] - 2W_5(x)n_y n_x \quad (14.14)$$

Теперь можно записать в явном виде уравнение (14.2). Для случая деформаций изгиба, вызываемых моментами поверхности, получим после подстановки уравнений (14.10), (14.13) и (14.14):

$$\begin{aligned} & (K_{11}\sin^2\varphi_s + K_{33})\left(\frac{\partial\varphi_s}{\partial y}\right) + (K_{33} - K_{11})\sin\varphi_s \cos\varphi_s = \\ & = \begin{cases} W_1 \sin\varphi_s - W_2 \cos\varphi_s \\ (W_3 - W_5)\sin 2\varphi_s - W_4 \cos 2\varphi_s \end{cases} \quad (14.15) \end{aligned}$$

Индекс «s» относится к значению угла  $\varphi$  и  $\frac{\partial\varphi}{\partial y}$  к координатам

границы. Здесь введен условный отсчет угла  $\varphi$  — от направления оси  $ou$ , в то время как существует естественное начало отсчета.

Если на поверхности находится лишь тонкий адсорбционный слой ЖК, то деформация не нарушает естественной ориентации молекул относительно осей анизотропии поверхности  $\mathbf{v}$  и  $\boldsymbol{\tau}$ . Это возможно и при толстом слое ЖК, но не имеющем деформаций. В любом случае, когда  $\mu$  отсутствует, равенство  $\mathbf{M} = 0$  дает формальное условие естественной ориентации директора на поверхности. Это направление и является естественным началом отсчета для углов деформации  $\varphi$ . Для определения этого направления приравняем нулю, например,  $M_z^n$ . Тогда

$$\frac{n_x^a}{n_y^a} = \operatorname{tg}\varphi_a = \frac{W_2(x)}{W_1(x)} \quad (14.16)$$

Очевидно, что  $\varphi_a$  есть естественный угол ориентации сверхтонкого адсорбционного слоя ЖК на поверхности, который определяется соотношением двух энергий поверхностного натяжения в двух разных направлениях. Аналогичный результат получается в случае, когда  $M_z^a = 0$ :

$$\operatorname{tg}2\varphi_a = \frac{W_4(x)}{W_3(x) - W_5(x)} \quad (14.17)$$

В любом случае естественное направление есть некий компромисс между направлениями  $v$  и  $t$ . В общем случае оно определяется условиями обращения в нуль выражений 14.11 и 14.12. Деформации в объеме ЖК влияют на ориентацию молекул ЖК на границе, и  $\varphi_s \neq \varphi_a$  в результате возникновения моментов  $\mu$ , нарушающих равенство  $M = 0$ .

Однако возможен случай, когда деформационные моменты  $\mu$  малы и не нарушают  $\varphi_a$ . Это так называемый случай сильного сцепления, достигаемый специальными приемами обработки поверхности (например, натиранием или нанесением ориентанта). Формально случай сильного сцепления описывается соотношением (14.15) при условии, что хотя бы одна из величин  $W_1, \dots, W_5$  велика настолько, что выполняется условие:

$$k_a / W_\beta \ll H (\alpha = 1, \beta = 1 \div 5) \quad (14.18)$$

Здесь  $H$  — размер области неоднородности деформации, например толщина слоя ЖК.

В отсутствии внешних ориентирующих слоев градиенты углов в ЖК являются величинами ограниченными, имеющими порядок отношения  $\Delta\varphi_m/H$ , где  $\Delta\varphi_m$  — максимальная разность углов разворота, которая в ЖК не превышает  $\pi$ . Большие закрутки в ЖК уже не устойчивы и путем срыва и формирования дисклинаций самоликвидируются. По этой причине величина  $\mu$  также ограничена, в то время как величина  $M$  практически не ограничена, так как адсорбированные слои ЖК на твердой поверхности сами могут приобретать свойства в малых толщинах, т. е. жесткую ориентацию. Если выполняется условие (14.18), то левой частью в уравнении (14.15) можно пренебречь. Это приводит к одному из двух соотношений:

$$\operatorname{tg} \varphi_s = W_2 / W_1 \quad (14.19)$$

$$2 \operatorname{tg} \varphi_s = W_4 / W_3 - W_5 \quad (14.20)$$

Сопоставляя первое уравнение (14.19) с (14.16) и (14.20) с (14.17), легко видеть, что уравнения (14.19) и (14.20) — это условия жесткой ориентации ЖК на границе, т. е. условия равенства:

$$\varphi_s = \varphi_a \quad (14.21)$$

Если поверхность для данного НЖК обработана так, что  $\varphi_a = 0$ , то говорят о гомеотропной ориентации, если  $\varphi_a = 90^\circ$ , то возникает планарная ориентация. Возможны и промежуточные условия наклонной ориентации. Мы будем использовать условия жесткой ориентации тогда, когда на одном участке границы задан один угол  $\varphi_a$ , а на другом — иное его значение. Возможен случай, когда  $\varphi_a = \varphi_a(x)$ , т. е. жесткая ориентация — неоднородная плавная функция координат.

Слабое сцепление с поверхностью характеризуется условием:

$$k_a / W_\beta \gg H \quad (14.22)$$

В этом случае силы сцепления с поверхностью могут иметь конечное значение, а моменты взаимодействия близки или равны нулю ( $M = 0$ ) независимо от угла  $\varphi_s$ . Такие условия, по-видимому, реализуются на не смачиваемой ЖК поверхности, где нет условий для возникновения анизотропного направления  $\tau$ , хотя направление  $v$  может играть ориентирующую роль. Смачивание и несмачивание поверхности также может быть использовано как некий критерий для оценки состояния дефектности изучаемой поверхности. Конкретные примеры использования явления смачивания для диагностики поверхности будут приведены ниже. В случае не смачивания граничное условие (14.15) принимает вид:

$$\begin{aligned} & -(K_{11} \sin^2 \varphi_s + K_{33} \cos^2 \varphi_s) \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_s + \\ & + (K_{33} - K_{11}) \sin^2 \varphi_s \cos^2 \varphi_s \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_s = 0 \end{aligned} \quad (14.23)$$

Частным случаем слабого сцепления является, по-видимому, ситуация на свободной поверхности. Направление  $v$  характеризуется ориентирующим эффектом, а направление  $\tau$  просто отсутствует из-за симметрии свободной поверхности. Поэтому выражения (14.13) и (14.14) принимают вид:

$$M^n = W_1(n \nu) \quad (14.24)$$

$$M^A = 2W_3(n \nu) (n\nu) \quad (14.25)$$

Очевидно, что  $n$ -компоненты этих моментов  $M^n n = 0$  и  $M^A n = 0$ . По этой причине нужно обратить в нуль и соответствующие компоненты деформированных моментов  $\mu$ . Это значит, что отсутствуют моменты, ориентирующие частицы в плоскости свободной поверхности, и они могут свободно вращаться, сохраняя определенный угол с нормалью к ней. Так, молекулы МББА на свободной поверхности образуют с нормалью угол  $15^\circ$ , а молекулы параазоксибензола —  $90^\circ$ .

Близкая, но не идентичная ситуация возникает в случае, когда поверхность твердого тела не имеет анизотропного направления в макромасштабах, т. е. ЖК ориентируется в плоскости подложки хаотично, образуя плоскую структуру. Чтобы получить выражения для  $M^n$  и  $M^A$ , нужно усреднить эти выражения по всем макроскопическим направлениям  $\tau$ , и по сравнению с выражением для свободной поверхности появится добавочный член

$$M^A = 2W_3(n \times \nu) (n\nu) + 2W_5(n \times \nu) (n\nu). \quad (14.26)$$

Этот член характеризует степень ориентации  $S$  плоской текстуры, отсутствующей на свободной поверхности, и обеспечивает устойчивую гомеотропную ориентацию. В случае гомеотропной ориентации вблизи плохо обработанной поверхности в равенстве (14.26) остается лишь последнее слагаемое, не зависящее от  $\varphi$ . Для этого случая граничные условия (14.15) примут вид:

$$\begin{aligned} & (K_{11} \sin^2 \varphi_s + K_{33} \cos^2 \varphi_s) \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_s + \\ & + (K_{33} - K_{11}) \sin^2 \varphi_s \cos^2 \varphi_s \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_s = \text{const} \end{aligned} \quad (14.27)$$

Возможен и промежуточный случай, когда жесткая ориентация не достигается, а сцепление конечно. Тогда граничные условия имеют вид соотношения (14.15), т. е. условия равновесия моментов (14.2). При этом необходимо знать параметры  $W_1, \dots, W_5$  потенциала молекулярных сил поверхности. Сведения о них не могут быть получены из теории деформирования ЖК, которая, по существу, является феноменологической. В то же время общие закономерности

проявления межмолекулярных взаимодействий ван-дер-ваальсовой природы в спектроскопических, оптических и структурных свойствах жидких систем в настоящее время изучены достаточно подробно [6]. Современные оптико-физические методы исследований позволяют выявить весьма тонкие эффекты, связанные с ориентацией молекул жидкостей и ЖК в поле молекулярных сил, включая и процессы, протекающие на границе фаз. Все это вместе создает прочный фундамент изучения поверхностных физических неоднородностей с помощью ЖК.

Для определения полей локальных деформаций слоя НЖК в зоне характерных дефектов рассмотрим метод решения уравнения (14.1) в случае деформаций изгиба, зависящих от расстояния от подложки  $ou$  и координаты  $x$ . Будем определять угловые развороты молекул  $\varphi(x, y)$  лишь в плоскости  $ou$ , что эквивалентно следующим ограничениям, накладываемым на ориентационное поле:

$$\mathbf{n} \operatorname{rot} \mathbf{n} = 0; \quad n_x = \sin\varphi; \quad n_y = \cos\varphi; \quad n_z = 0. \quad (14.28)$$

Они приводят к существенным упрощениям уравнения равновесия (14.1), которое принимает вид:

$$K_{11} \mathbf{n} \times \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{n} - K_{33} \mathbf{n} \times \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{n}^2 = 1. \quad (14.29)$$

Граничные условия будем принимать в форме (14.21), а также в виде частных вариантов, например (14.27).

Нелинейное уравнение (14.29) остается малодоступным для решения двумерных задач. Приближенный метод его решения был предложен в работе [2]. С этой целью уравнение (14.29) записывается через угловую функцию:

$$\nabla_k^2 \varphi = \chi_0(\varphi); \quad \nabla_k^2 \equiv \sqrt{\frac{K_{11}}{K_{33}}} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \sqrt{\frac{K_{33}}{K_{11}}} \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \quad (14.30)$$

Здесь  $\chi_0(\varphi)$  означает группу нелинейных членов:

$$\begin{aligned} \chi_0(\varphi) = & \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial x} \frac{\sin 2\varphi}{\sin^2 \varphi_m} - \frac{\partial \varphi \partial \varphi}{\partial y \partial x} \frac{\cos 2\varphi}{\sin^2 \varphi_m} + \\ & + \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right) \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \varphi_m} + \left\{ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 \right\} \frac{\sin 2\varphi}{2 \sin^2 \varphi_m} \end{aligned} \quad (14.31)$$

Здесь  $\varphi_m$  — наибольшее угловое отклонение в задаче.

Безразмерная величина

$$\chi = \frac{K_{33} - K_{11}}{\sqrt{K_{11}K_{33}}} \sin^2 \varphi_m = \sqrt{\frac{K_{33}}{K_{11}} + \frac{K_{11}}{K_{33}} - 2 \sin^2 \varphi_m} \quad (14.32)$$

представляет собой малый параметр приближения.

Для некоторых НЖК величина  $(K_{33} - K_{11})/\sqrt{K_{33}K_{11}}$  оказывается сравнительно малой. Например, для МББА она составляет примерно 0,2. Есть основания считать, что это не случайно. Хотя, как правило,  $K_{33} = K_{11}$ , однако с увеличением алифатической цепи молекул знак неравенства может изменяться, и рассматриваемое отношение проходит через 0. Это дает основание для использования одноконстантного приближения, принятого в физике ЖК, хотя оно справедливо для ограниченного круга соединений. Введенный параметр содержит еще множитель  $\sin^2 \varphi_m$ , всегда меньший единицы. К тому же методы исследования свойств поверхности дают возможность выбора ЖК материала. Поэтому условие малости  $\chi$  может быть обеспечено.

Исходя из малости этого параметра, можно существенно упростить трудности решения двумерных задач, не связывая себя одноконстантным приближением. Представим решение (14.31) в виде степенного ряда по параметру  $\varphi$ :

$$\varphi(x, y, K_{11}, K_{33}) = \varphi^0(x, y) + \chi \varphi'(x, y) + \chi^2 \varphi''(x, y) + \dots \quad (14.33)$$

Существенно, что решения на различных этапах приближения  $\varphi^0$ ,  $\varphi'$ ,  $\varphi''$  удовлетворяют известным уравнениям теории потенциала — уравнениям Лапласа и Пуассона:

$$\nabla_k^2 \varphi^0 = 0 \quad (14.34)$$

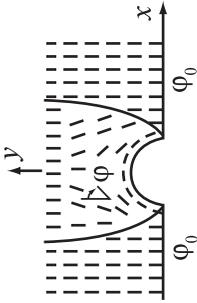
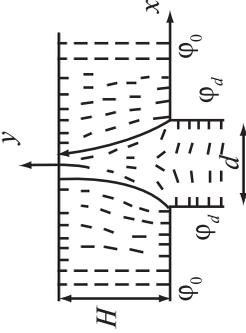
$$\nabla_k^2 \varphi' = 0 \quad (\varphi^0) \quad (14.35)$$

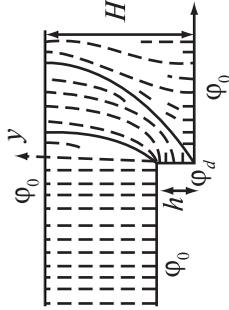
$$\nabla_k^2 \varphi'' = 0 \quad (\varphi')$$

Поскольку условие  $\chi = 0$  не означает равенства модулей  $K_{33} = K_{11}$  то уже  $\varphi^0$ , не говоря о  $\varphi'$ ,  $\varphi''$ , ..., является  $f(K_{11}/K_{33})$ . Получается цепочка приближений. Располагая нулевым решением уравнения (14.34) при заданных граничных условиях, можно вычислить правую часть в уравнении Пуассона (14.35) и найти первое приближение, например, с помощью функции Грина  $G$  для двумерной области  $V$  по формуле:

$$\varphi' = - \int_V \int G(x, y / \zeta \eta) \Delta(\varphi^0) d\zeta d\eta \quad (14.36)$$

**Результаты расчета локальных деформаций в слое НЖК  
вблизи ряда дефектов микрорельефа поверхности**

Характер дефекта	Схема локальной деформации слоя НЖК в зоне дефекта	Поле угла ориентации
<p>Полукруглый выступ на плоской поверхности (например, следы обработки)</p>		$\pi \frac{\varphi(x, y) - \alpha(x, y) - \varphi_0}{\varphi_d - \varphi_0} = \operatorname{arctg} \frac{1 - \xi}{\eta} 1 - \operatorname{arctg} \frac{1 + \xi}{\eta};$ $\xi = x(x^2 + y^2 + R^2)/2R(x^2 + y^2);$ $\eta = y(x^2 + y^2 - R^2)/2R(x^2 + y^2);$ <p>Края дефекта отсуживаются в объеме слоя. Изображение дефекта, расширяясь, удваивается</p>
<p>Впадина на плоской поверхности (например, узкая пора в покрытии)</p>		$\alpha(x, y) = \operatorname{arctg}(dy/dx) _{\xi} = \operatorname{const}$ $\pi \frac{\varphi(x, y) - \alpha(x, y) - \varphi_0}{\varphi_d - \varphi_0} = \operatorname{arctg} \frac{2 - 2\xi(1-b)}{b\eta} + \operatorname{arctg} \frac{2(1-b)(1-\xi)}{b\eta};$ $\pi(x + iy) = \operatorname{arctg} \frac{(\xi + i\eta)(1-b) + b - 2}{b/2} -$

		$-(1-b) \operatorname{arsh} \frac{(2-b)(\xi + i\eta) - 2}{b(\xi + i\eta)};$ <p><math>\alpha(x, y) = \operatorname{arctg}(dy/dx)_{\xi} = \operatorname{const}</math>, <math>b = h/H</math> Изображение дефекта сужается при увеличении толщины <math>H</math> слоя</p>
<p>Ступенька (например, обрыв слоя покрытия)</p>		$\pi \frac{\varphi(x, y) - \alpha(x, y) - \varphi_d}{\varphi_0 - \varphi_d} = \operatorname{arctg} \frac{\eta(1-b^2)}{(\xi-1)(\xi-b^2)\eta^2};$ $b = \left( \frac{d}{2H} + \sqrt{1 + d^2 / 4H^2} \right);$ $x + iy = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\xi - i\eta}{b}} - \left[ \frac{\sqrt{b}}{x + (b-1)} \right] \times$ $\times \left[ \ln(\sqrt{\xi + i\eta - b})(\sqrt{\xi + i\eta + 1}) - \right.$ $\left. - \ln(\sqrt{\xi + i\eta + b})(\sqrt{\xi + i\eta - 1}) \right].$ <p>Деформации визуализируют вертикальную стенку</p>

Неувязку в более общих граничных условиях, вносимую интегралом в уравнении (14.36), компенсируют добавлением к нему еще одного решения уравнения Лапласа  $\phi^{01}$ . Далее по той же схеме находим второе приближение  $\phi^2(x, y)$ . Изложенный подход был применен для решения задач визуализации наиболее характерных дефектов: обособленного ориентационного дефекта, обособленного дефекта рельефа, замкнутых двумерных объемов, посторонних включений в слое НЖК и локальных деформаций вблизи поверхности с периодическим рельефом. Расчет локальных деформаций с периодическим рельефом был сопоставлен с экспериментальным изучением оптической миры с инородным включением в слое НЖК и показал хорошую сходимость теории и эксперимента. Детальное рассмотрение решений приведено в работе [1].

Теория полей локальных деформаций слоя НЖК была использована для анализа его ориентации в окрестности дефектов микрорельефа. Результаты приведены в табл. 14.1.

Особый интерес представляет визуализация вертикальной ступеньки в подложке высотой  $h$  при конечной толщине слоя НЖК  $H$ . Ступенька, рассматриваемая через слой обычной жидкости, видна как одна линия, параллельная оси  $oz$ . Локальные деформации НЖК позволяют увидеть вертикальную стенку — ее изображение как бы разворачивается по мере удаления от нижней подложки, постепенно расширяясь. Эти уникальные возможности анализа дефектов микрорельефа поверхности могут быть обеспечены только с использованием НЖК.

В работах [1, 8–11] проведен также анализ локальных деформаций для других характерных дефектов (синусоидальным и пилообразным рельефом поверхности, цилиндрическими и клиновидными каналами, заполненными НЖК), а также включений в слой НЖК.

#### **14.2. Экспериментальные исследования свойств поверхности при нанесении свободного слоя НЖК**

В разделе будут рассмотрены примеры практического использования НЖК для изучения свойств поверхности без приложения внешних полей (только с учетом сил межмолекулярного взаимодействия).

Для создания однородной ориентации визуализирующего слоя НЖК его наносят на поверхность в изотропной фазе толщиной не более 1 мкм и охлаждают до температуры мезофазы. При изучении

некоторых объектов может возникнуть проблема в обеспечении смачивания изучаемой поверхности слоем НЖК. Для устранения несмачивания поверхности используют НЖК с другой величиной поверхностного натяжения  $\gamma$  или меняют величину поверхностного натяжения используемого НЖК. Для этого в НЖК добавляют небольшое количество спирта или ацетона, изменяющих на короткий отрезок времени (до испарения добавки) величину  $\gamma$ . Следует отметить, что несмачивание поверхности слоем НЖК может быть свидетельством ее дефектности. При изучении поверхности с использованием НЖК применялся поляризационный микроскоп [12, 13]. В исходном состоянии молекулы НЖК упорядочены. Эта упорядоченность может быть локально нарушена полями поверхности или дефектами, деформирующими слой. Возникшие деформации в слое НЖК регистрируются в поляризованном свете на просвет или отражение (рис. 14.1). Это позволяет визуализировать структурные неоднородности на поверхности и распределение невидимых физических полей.

Для получения воспроизводимых результатов наблюдения проводились при многократном нанесении и снятии слоя НЖК. В описываемых экспериментах использовались доступные НЖК и их хорошо изученные смеси на основе метоксибензильден бутиланилина (МББА), этоксибензильден бутиланилина (ЭББА) и цианбифенила (5ЦБ), обладающие мезофазой при комнатной температуре.

#### 14.2.1. Изучение дефектов микрорельефа

Контроль дефектов микрорельефа является одной из важных задач технологии оптического производства. НЖК позволяет визуализировать дефекты микрорельефа (царапины, микротрещины, выколки, посторонние включения и др.), невидимые в оптический

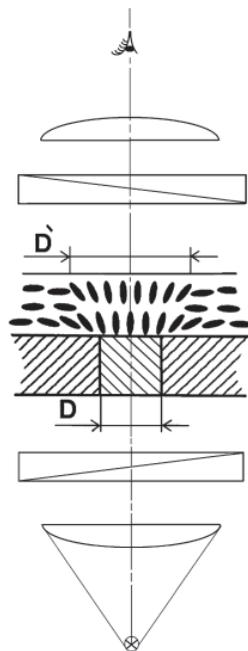


Рис. 14.1. Деформация слоя НЖК в области дефекта D

микроскоп без слоя НЖК. При этом НЖК не изменяет состояния поверхности. Это подтверждено изучением поверхности стекла марки К8 после воздействия на нее слоя МББА в течение нескольких недель теневым методом с использованием светящейся точки площадью  $0,2 \text{ мм}^2$ . Интерференционные измерения, проведенные с точностью до  $0,002 \lambda$ , показали, что рельеф и состояние поверхности не изменились.

Возможность визуализации дефектов микрорельефа позволяет установить связь между условиями обработки поверхности и ее качеством. Три группы образцов боросиликатных стекол марки К8 диаметром 25,4 мм и толщиной 5 мм полировались различными по размеру полировочными порошками оксида церия. Первая группа полировалась частицами со средним диаметром 0,2 мкм, вторая — 0,1 мкм, а третью обрабатывали, как и вторую, но длительность обработки была на 3 часа больше. Результаты, приведенные на рис. 14.2а, б, в выявляют зависимость между режимами обработки и размерами микроцарапин [14]. С уменьшением размера частиц полировального порошка с 0,2 до 0,1 мкм соответственно уменьшаются размеры микроцарапин. Проведено исследование тех же образцов механическим профилометром фирмы «Талистеп» и оптическим профилометром фирмы «Зуко». Оба независимых метода дали хорошие совпадения с результатами, полученными методом НЖК. Максимальная ширина микроцарапин составляла 1,0–4,0 мкм при глубине 10–20 Å. Метод НЖК существенно проще и дешевле, чем использование упомянутых профилометров.

Достоинством метода НЖК является возможность изучения не только плоских поверхностей, но и профилей сложной конфигурации. Текучесть НЖК позволяет контролировать неплоские поверхности, полости труднодоступных стволков, каналов, щелей, поверхности регулярно-дискретных микроструктур: микроканальных пластин, волоконно-оптических элементов, дифракционных решеток. На практике высокие требования к качеству внутренних поверхностей предъявляют к микроканальным пластинам (МКП), используемым в приборах ночного видения. Серия экспериментов по изучению качества внутренних поверхностей отдельных микроканалов, склеенных в один слой параллельно друг другу, описана в работе [15]. Внутренний диаметр образцов составлял 20 мкм, длина — 15 мм (рис. 14.3). НЖК заполнял микроканалы под действием капиллярных сил и самопроизвольно однородно ориентировался

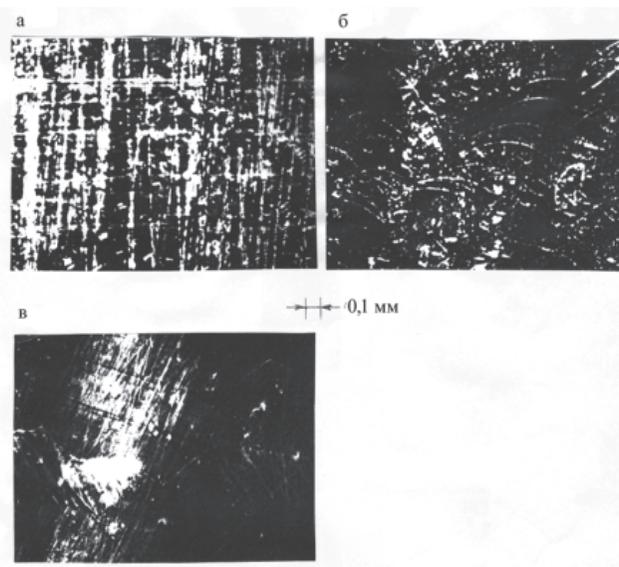


Рис. 14.2. Характерный вид микроцарапин, выявленных методом НЖК при полировке поверхности стекла различными по размеру порошками оксида церия: *a* — вертикальные царапины, полученные при использовании частиц 0,2 мкм; *б* — круговые царапины от частиц 0,1 мкм; *в* — царапины от частиц 0,1 мкм, но время полировки было на 3 часа больше. МББА,  $T = 18^{\circ}\text{C}$  [14]

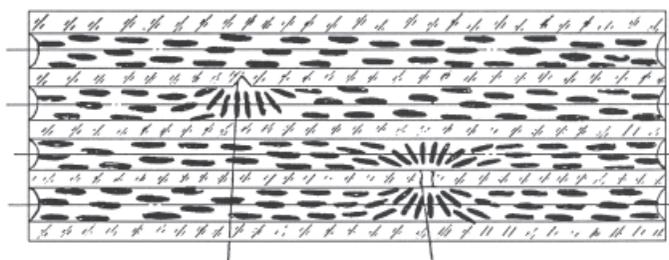


Рис. 14.3. Локальные ориентационные деформации НЖК в зоне дефектов микрорельефа внутренних поверхностей микроканалов. При несквозном дефекте (1) наблюдается зона деформаций в одном канале; при сквозном дефекте (2) наблюдаются две зоны деформации в соседних микроканалах

под влиянием стенок. В местах локальных дефектов микрорельефа наблюдались зоны локальных ориентационных деформаций НЖК. Поскольку наблюдать за состоянием внутренних поверхностей МКП со стороны стенок невозможно из-за их непрозрачности, было предложено осуществлять контроль слоев со стороны их торцов [16]. Объектом исследования были изготовленные из свинцово-содержащего стекла МКП диаметром 30 мм, толщиной 0,5 мм и диаметром каналов 9,5 мкм.

Микроканалы заполняли НЖК на всю их длину и наблюдали в микроскоп за распределением интенсивности излучения в сечении микроканала. Если внутренняя поверхность имеет локальные нарушения микрорельефа, посторонние включения, изменения структурной однородности или загрязнения, то вблизи них слой НЖК деформируется, что изменяет наблюдаемое распределение интенсивности  $I(x, y)$  в сечении микроканалов. Фотометрирование распределений интенсивности излучения, проходящего через дефектные и бездефектные микроканалы, показало их существенные различия. Сравнение распределений интенсивности для нескольких тысяч реальных микроканалов выполнялось с помощью ЭВМ ИБАС (Германия), что занимало около 3 мин.

Описанный метод позволял уверенно отличать дефектные микроканалы от бездефектных, но не давал информацию о характере самих дефектов. Поэтому было предложено проводить наблюдения за интенсивностью излучения, проходящим через МКП, при температуре вблизи фазового перехода НЖК-изотропная жидкость (ИЖ) при медленном нагревании образцов. Анализ показал, что в дефектных микроканалах переход в ИЖ происходит при повышенной температуре. Исследования показали, что сдвиг температуры фазового перехода НЖК-ИЖ ( $\Delta T$ ) зависит от размеров ориентационных неоднородностей в зоне дефекта. При допущении, что дефект на внутренней поверхности представляет собой выколку в виде сферы радиуса  $r$ ,  $\Delta T$  в зоне дефекта можно описать уравнением Клайперона-Томпсона:

$$\Delta T = \frac{2T_1\gamma}{q\rho r}, \quad (14.37)$$

где  $T_1$  — температура фазового перехода НЖК-ИЖ,  $\gamma$  — межфазная энергия на границе НЖК-твердое тело; по нашим измерениям  $\gamma = 35$  мДж/м<sup>2</sup>; для подложки  $\gamma = 16$  мДж/м<sup>2</sup>;  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> — плотность НЖК;  $q = 2,14 \cdot 10^3$  Дж/кг — скрытая энергия фазового перехода НЖК-ИЖ.

Из уравнения (14.37) видно, что по величине  $\Delta T$  можно оценить размеры дефектов на внутренней поверхности микроканалов. Расчетная зависимость  $\Delta T = f(r)$  и эксперименты по измерению  $\Delta T$  в микроканалах с диаметром 1, 2 и 5 мкм показали хорошее совпадение. Кроме того, многократно воспроизводимые наблюдения за дефектными каналами, заполненными НЖК, показали, что при  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$  НЖК во всех каналах переходит в изотропную жидкость. Это позволяет оценить минимальный дефект микрорельефа как  $r = 0,2$  мкм [16]. НЖК после операции контроля удаляют из микроканалов с помощью растворителей.

#### 14.2.2. Изучение структурных дефектов в материалах

Теория полей локальных деформаций слоя НЖК была использована для анализа его ориентации в окрестности структурных дефектов (рис. 14.4).

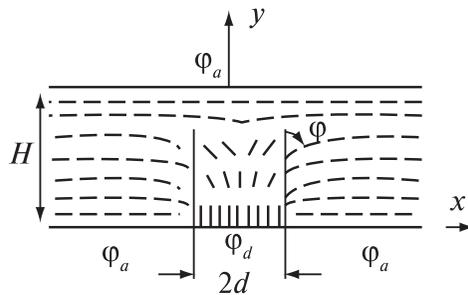


Рис. 14.4. Обособленный ориентационный дефект с наклоном молекул  $\varphi_a$

Ориентация молекул НЖК в окрестности структурного дефекта описывается уравнением (14.38).

$$\pi \frac{\varphi(x, y) - \varphi_a}{\varphi_d - \varphi_a} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh}(D - X) \operatorname{ctg} \frac{Y}{2}}{\operatorname{ch}(D - X) + 1} + \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{sh}(D + X) \operatorname{ctg} \frac{Y}{2}}{\operatorname{ch}(D - X) + 1};$$

$$X = \frac{\pi x}{H}, \quad Y = \frac{\pi y}{H}, \quad D = \frac{\pi d}{H}. \quad (14.38)$$

В толстом слое ( $H \geq d$ ) границы становятся неразличимы. Однако в тонких слоях НЖК открывается уникальная возможность непосредственной визуализации структурных неоднородностей поверхности. Если для выявления объемных дефектов материалов разработаны различные методы интроскопии, включая эффективные рентгеновские методы, то изучение свойств поверхности осуществляется методами микроскопии различных модификаций и сложными в расшифровке методами эллипсометрии. Недаром говорят, что *если Бог изобрел материалы, то дьявол — поверхности*.

Физическая однородность является одной из важнейших характеристик поверхности, часто отражающей объемные свойства материала и определяющей возможности его использования. НЖК позволяют исследовать свойства поверхности кристаллов, минералов, стекол, металлов, твердых компонентов жидких растворов, а также поверхностей биологических объектов.

#### *Выявление типа симметрии на плоскости твердых кристаллов*

При нанесении тонкого слоя НЖК на свежий скол твердого монокристалла он разбивается на зоны с одинаковой ориентацией директора. В начале прошлого века этот вопрос изучался в работах Ч. Могена (1913 г.), Ф. Гранжана (1916 г.), П. Гоберта (1938 г.) и Х. Цохера (1948 г.) [17]. Основное внимание в экспериментах уделялось изучению поведения молекул ЖК на поверхности, чем изучению свойств самих поверхностей. Однако было показано, что легкое направление ориентации связано со свойствами симметрии твердого кристалла. Поведение капли нематика (МББА, 5ЦБ, смеси толанов) на поверхности монокристаллов с разной симметрией изучено в работе [18, 19]. Так, на сколе кристалла NaCl, имеющем симметрию  $4m$ , центр капли разделен на 4 примерно одинаковых сегмента, что подтверждает указанный тип симметрии. На рис. 14.5 показана выявленная связь между плоскостями симметрии и направлением легкой ориентации молекул нематика Н8 (эвтектическая смесь МББА и ЭББА). В узлах симметрии обнаружены области локальных искажений в ориентации НЖК, вызванные локальным электрическим полем, создаваемым некомпенсированными зарядами.

Описанный метод является прямым методом выявления типа симметрии в монокристаллах.

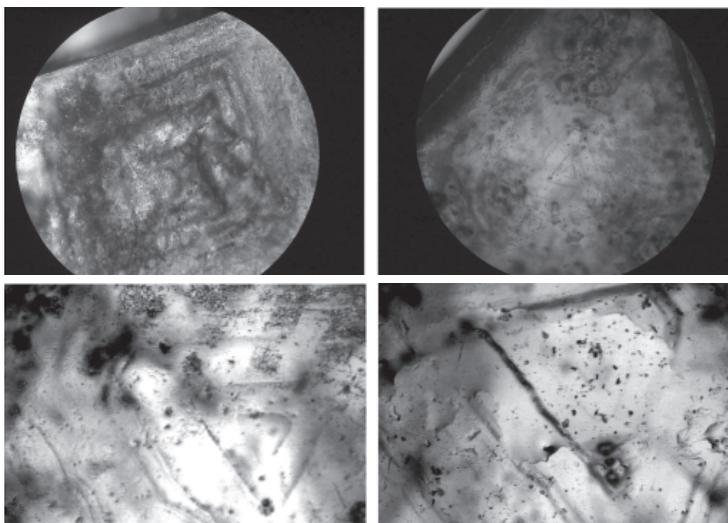


Рис. 14.5. Связь между плоскостями симметрии и направлением легкой ориентации нематика Н8 на сколах кристалла KCL (вверху слева) и поверхности кварца (вверху справа). Увеличение 50х. В нижнем ряду показано, что сторонние включения в кварцах искажают его симметрию. Увеличение 100х

#### *Выявление границ двойников в твердых кристаллах*

В оптическом приборостроении для изготовления поляризационных элементов используется исландский шпат, к структурной однородности которого предъявляют высокие требования. Использование материала с оптическими неоднородностями для этой цели недопустимо. Для контроля его однородности применяют теневые, коллиматорные, поляризационные и интерференционные методы. Однако такие структурные дефекты, как двойниковые границы, этими методами выявляются не всегда. Двойниковые границы можно выявить травлением поверхностей в кислотах, однако это приводит к разрушению полированных поверхностей.

На рис. 14.6 показана граница двойников в образце исландского шпата, визуализированная с помощью НЖК [20]. Достоверность выявления именно этой границы была подтверждена травлением: протравленная линия границы совпала с линией, выявленной ме-

тодом НЖК. Области двойников характеризуются различной самопроизвольной ориентацией НЖК на их поверхностях, легко различимой визуально. Метод выявляет тонкие детали вростков, не обнаруживаемые травлением (рис. 14.7).

В случае, когда структурные свойства двойников различаются мало, визуализируемая граница наблюдается с малым контрастом (рис. 14.8а). Метод НЖК позволяет повысить контраст в изображении границы двойников, если использовать фазовый переход нематика в изотропную жидкость [21]. Вследствие известной анизотропии свойств исландского шпата энергия сцепления НЖК с поверхностью по обе стороны двойниковой границы разная. Тогда при медленном нагревании (или охлаждении) образца до изотропной фазы в первую очередь произойдет фазовый переход в области с меньшей энергией сцепления (рис. 14.8б), а при дальнейшем на-

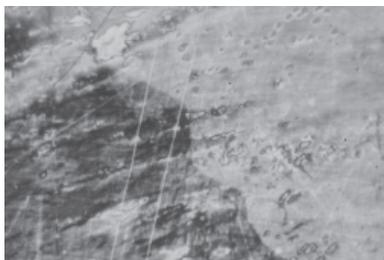


Рис. 14.6. Граница двойников в исландском шпате, визуализированная НЖК. МББА, 50х



Рис. 14.7. Визуализация двойниковых вростков в исландском шпате НЖК. МББА, 250х

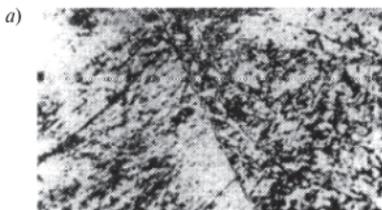


Рис. 14.8. Изображение границы двойников в исландском шпате, получаемое НЖК при комнатной температуре, имеет невысокий оптический контраст (а). Он будет увеличен при нагревании НЖК до температуры фазового перехода в ИЖ (б). МББА:ЭББА;  $T_a=20^{\circ}\text{C}$ .  $T_b=53,4^{\circ}\text{C}$ . 50х

гревании — в области с большей энергией сцепления. Разница в температуре фазового перехода НЖК при контакте с поверхностью двойников составила примерно  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Это означает, что фазовый переход можно эффективно использовать для визуализации двойниковой границы с максимальным оптическим контрастом. Метод позволяет регистрировать разницу в энергии сцепления НЖК с подложкой менее чем в  $1 \cdot 10^{-3}$  эрг/см<sup>2</sup>.

На рис. 14.9 показано изображение двойников в пьезокристаллическом резонаторе на основе оптического кварца АТ-среза, используемом для дальней космической связи на частотах несколько МГц. Резонаторы представляют собой пластины с мембраной, получаемые утонением ее центральной части. Толщина мембраны определяется требуемой частотой колебаний и составляет единицы микрометров, в то время как периферийная часть имеет достаточную толщину и прочность.

К существенным изменениям резонансных частот приводит двойникование кварца, которое может возникать в процессе ионного травления при утонении мембраны вследствие тепловых и механических воздействий. Применение НЖК позволило обнаружить двойниковую границу в кварцевом пьезорезонаторе (рис. 14.10) [22].

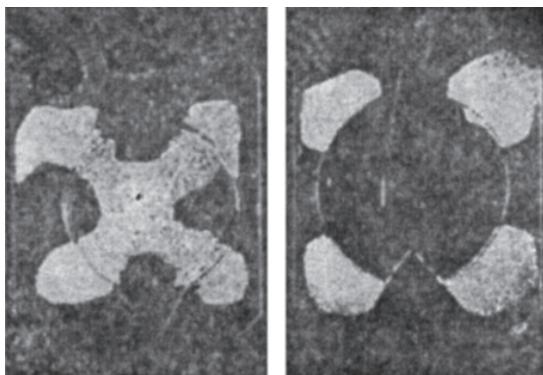


Рис. 14.9. Двойниковые образования в кристаллических кварцевых элементах: слева — полный сформировавшийся двойник; справа — неполный двойник (внизу пунктиром обозначен контур, выявленный НЖК); 2х, МБА:ЭББА

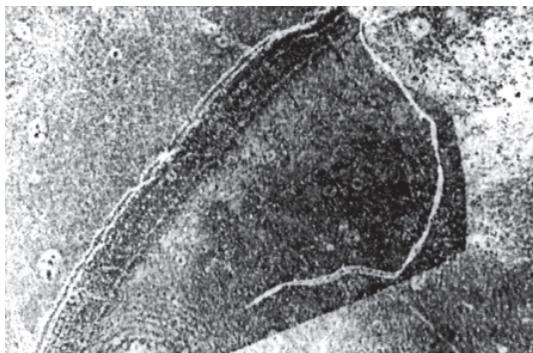


Рис. 14.10. Двойниковая граница в кварцевом пьезорезонаторе, визуализированная методом травления в бифториде аммония (извилистая линия), и методом НЖК (темная зона). МВВА: ЭББА,  $T=20^{\circ}\text{C}$ , 25x

Метод НЖК, по сравнению с другими, является неразрушающим и имеет более высокую точность в выявлении двойниковой границы.

*Выявление структурных блоков в твердых слюдах (мусковит)*

На рис. 14.11 показаны визуализированные структурные неоднородности в слюдах  $\{\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH},\text{F})_2\}$ , представляющие собой алюмо-кислородные слои и слои катионов.

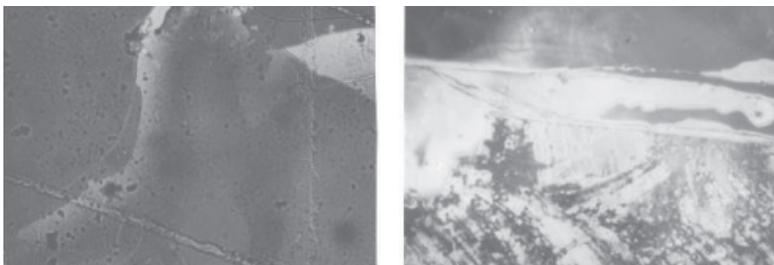


Рис. 14.11. Структурные неоднородности в слюдах (мусковит), выявленные методом НЖК. МББА,  $T=20^{\circ}\text{C}$ . 100x

Метод дает возможность выборки образцов с повышенной однородностью, не содержащих внутренние пустоты и может быть использован для контроля изоляционных свойств слоев слюды для электротехнических изделий.

#### *Визуализация структурных дефектов в лазерных кристаллах*

При выращивании кристаллов для лазерных применений требуется обеспечение их высоких нелинейно-оптических характеристик, зависящих от структурной однородности образцов. Особенно высокие требования предъявляются к однородности кристаллов с внутрирезонаторной генерации второй гармоники (ГВГ) лазеров, работающих в непрерывном режиме. Структурные дефекты снижают эффективность преобразования частоты. Проблема состояла в том, что процесс ГВГ происходит во всем объеме кристалла, а НЖК выявляет только структурные дефекты поверхности.

Объектами исследования были кристаллы  $\text{KTiOPO}_4$  (КТР), обладающие высокими нелинейно-оптическими характеристиками. Исследовались естественные грани (100), (201) и поверхности, перпендикулярные направлению синхронизма для ГВГ на длине волны 1,06 мкм. В образцах, дающих некачественную картину ГВГ, методом НЖК были обнаружены структурные неоднородности (рис. 14.12).

Их расположение было сопоставлено с теневыми картинками дефектов удвоения частоты излучения по пространственному распределению второй гармоники по сечению кристалла, что показало их

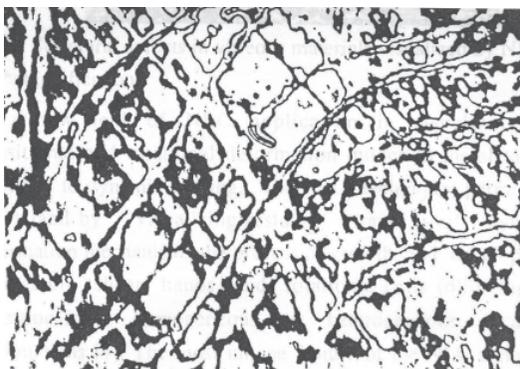


Рис. 14.12. Структурные дефекты в кристалле КТР, 100х [23]

удовлетворительное совпадение. Причем метод НЖК выявляет структурные дефекты с более высоким пространственным разрешением, чем метод ГВГ. Эффективность метода была подтверждена экспериментами с серией кристаллов КТР. Это позволяет рекомендовать метод НЖК для простого прогнозирования свойств и выбора бездефектного материала на ранней стадии его обработки [23].

*Визуализация гетерофазных структур в стеклообразных материалах*

Для задач оптической записи, хранения и обработки материалов разработаны светочувствительные неорганические материалы — ситаллы и мультихромные стекла. Их регистрирующие свойства основаны на необратимых гетерофазных превращениях (возникновении кристаллической фазы в стеклообразной матрице), происходящих в результате воздействия излучения и теплового поля. Под действием УФ-излучения и последующей термообработки происходит катализируемая кристаллизация — рост микрокристаллов  $\text{Li}_2\text{OSiO}_2$  в фотоситаллах и  $\text{NaF}(\text{NaAg})\text{Br}$  в мультихромных стеклах. В облученной зоне в результате фазового разделения изменяются плотность, показатель преломления, объем, механические и диэлектрические свойства. Эффекты изменения показателя поглощения, преломления и объема используются для записи информации, голограмм и создания элементов микрооптики. Для изучения процессов кристаллизации и визуализации превращений кристаллической и стеклообразных фаз в стеклах использовался метод НЖК.

Объектом исследования служило натриевоцинкосиликатное мультихромное стекло, сенсibilизированное ионами серебра и цезия. Изготовленные из него полированные пластины подвергали воздействию УФ излучения импульсного азотного лазера ЛГИ ( $\lambda = 347$  нм, средняя мощность 10 мВт при частоте следования импульсов 100 Гц, диаметр пятна облучения 3 мм, экспозиция 3 Дж/см<sup>2</sup>). Для записи голограммы использовали дифракционную решетку с частотой 100 мм<sup>-1</sup>, прозрачную в УФ области спектра. Оригинал накладывали на образец мультихромного стекла и производили экспонирование. Облученные образцы подвергали обработке в течение 1,5 часов при температуре 520°C. Такой режим приводил в зоне облучения к восстановлению ионов серебра и росту кристаллической фазы. С увеличением дозы УФ излучения уменьшаются размеры микрокристаллов и увеличивается их концентрация.

На рис.14.13 показаны изображения распределения интенсивности излучения по сечению лазерного пучка, облученного участка

образца этим пучком и увеличенная фотография фрагмента этого участка с картинкой, визуализированной методом НЖК. На границе облученной и необлученной областей выявлены крупные структурные неоднородности, отождествляемые с кристаллическими образованиями. Справа от границы монокристаллы отсутствуют. Слева по мере смещения к центру облученной зоны наблюдаются увеличение концентрации кристаллической фазы и уменьшение размеров монокристаллов.

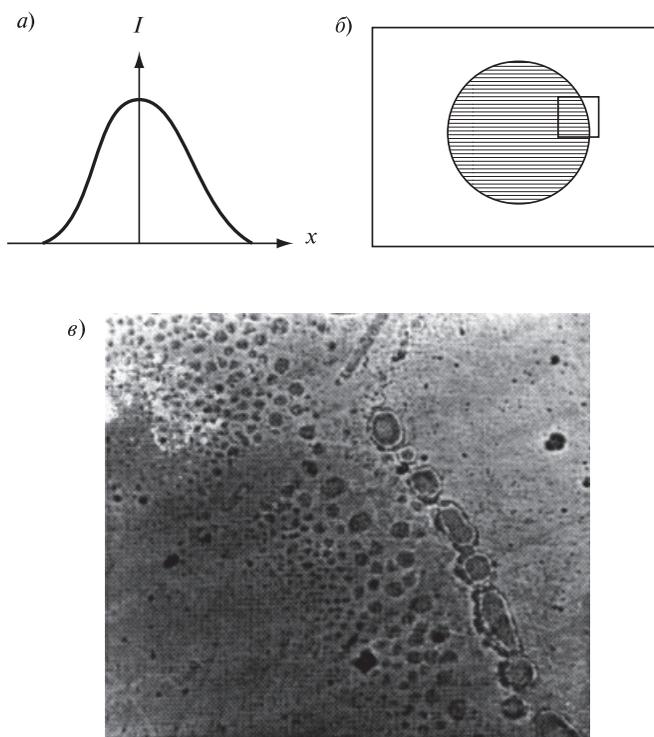


Рис. 14.13. Схема распределения интенсивности излучения в сечении лазерного пучка (а), в облученной части образца с выделенным фрагментом (б) и фотография фрагмента этого участка (в). 1300 х. МББА:ЭББА

Такое распределение согласуется с распределением интенсивности излучения в лазерном пучке и, таким образом, с дозой облучения. Обращает на себя внимание регулярная пространственная модуляция монокристаллов в облученной зоне: периоды записываемой одномерной голограммы и дифракционной решетки, наблюдаемой на фотографии, совпадают. Это иллюстрирует возможность метода НЖК наблюдать за генезисом кристаллической фазы и ее пространственным распределением [24].

#### *Визуализация дефектов на поверхности кремния*

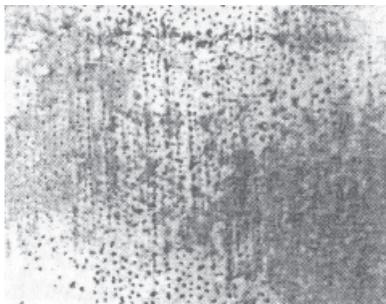


Рис. 14.14. Точечные дефекты кристаллической решетки и скопления дислокаций, выявленные методом НЖК на подложке кремния. 500х. МББА:ЭББА [25]

Метод НЖК позволяет выявлять точечные дефекты на подложках кремния и германия (рис. 14.14).

Другим объектом исследования были пленки  $\alpha$ -Si:H, наносимые на подложки Si *p*-типа методом магнетронного распыления. Результаты изучения их поверхности методом НЖК приведены на рис. 14.15 и показывают возможность выявлять структурные неоднородности, вызванные собственными дефектами подложки. Так, аналогичные дефекты оказались выявлены на противопо-

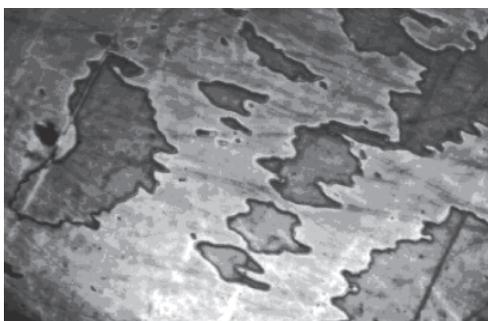


Рис. 14.15 Структурные дефекты, выявленные на поверхности  $\alpha$ -Si:H

ложной стороне подложки, не содержащей пленки  $\alpha$ -Si:H. Этот факт демонстрирует влияние морфологии подложки на структурную неоднородность пленок  $\alpha$ -Si:H.

Методом НЖК были выявлены скопления дислокаций на поверхности кремниевых подложек и установлена связь между технологией изготовления и плотностью распределения скопления дислокаций (рис. 14.16) [25].



Рис. 14.16. Визуализация областей скопления дислокаций в слое кремния  $\alpha$ -Si/Fe до отжига (слева) и после отжига при температуре  $800^{\circ}\text{C}$  в течение 2 ч (справа). МББА:ЭББА. 200х.  $T = 20^{\circ}\text{C}$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что НЖК можно использовать для контроля качества полупроводниковых материалов.

#### *Изучение проводимости полимерных структур*

Практический интерес представляют материалы, электронной структурой которых можно управлять. Одним из таких материалов является полианилин (ПА). Проводимость ПА зависит от степени окисления и микроструктуры. На рис. 14.17 показана возможность выявления связи изменения структуры ПА с изменением его проводимости. Полностью восстановленный материал имеет структуру лейкоэмеральдина, обладающую низкой проводимостью (I). Его структура, визуализированная с помощью НЖК, приведена на рис. 14.17 слева. После окисления полианилина возникает структура пернигранилина (III), обладающего высокой проводимостью (рис. 14.17, справа). Наибольший интерес вызывает структура эмеральдина (II), имеющего промежуточную величину проводимости, природа которой до конца не выяснена (рис. 14.17, в середине) [27].

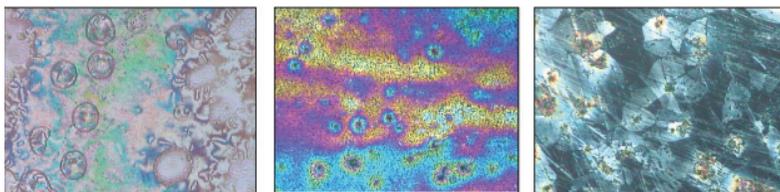


Рис. 14.17. Различные структуры полианилина, выявленные с помощью НЖК: лейкоэмеральдин, обладающий низкой проводимостью (слева), пернигранилин, обладающий высокой проводимостью (справа), эмеральдин, имеющий промежуточную величину проводимости (в середине)

### ***14.2.3. Изучение структуры твердых компонентов растворов***

Изучение свойств растворов является актуальной задачей в медицине, биологии, системах безопасности, парфюмерии, пищевой промышленности и других областях. Часто основные свойства растворов определяются структурой твердых компонентов, а их структурная однородность характеризует качество. Контроль качества растворов является сложной задачей, обычно связанной с объективной диагностикой запахов и вкуса.

С позиций материаловедения — это проблема визуализации структуры источников вкуса и запаха. Объективные методы их распознавания развиваются по пути использования электронных устройств искусственного носа и языка [28]. Однако все эти методы остаются слепыми, не позволяя визуализировать структуры раздражителей.

Твердые компоненты растворов явились новым классом объектов, исследуемых методом НЖК с последующей оптической обработкой изображений для их распознавания. Дозированные капли раствора наносились на пробные стекла с помощью прибора Affymetrix GMS 417 Arrayer (Genetic MicroSystems) или вручную белочкой кисточкой при температуре 20°C и влажности 60%. Слой НЖК наносился на осадок раствора после его испарения в эксикаторе или на свежем воздухе. При этом летучие компоненты растворов исчезают, что может ограничить применение метода.

#### ***Детектирование структуры компонентов парфюмерных материалов***

Объектами исследования служили образцы туалетной воды и духов. Результаты выявления их структур показаны на рис. 14.18 и

14.19. Структуры содержат специфические ароматические включения, изображения которых настолько различны, что легко идентифицируются визуально (рис.14.18).

Структуры твердых компонентов лаванды и ряда духов показаны на рис. 14.19.

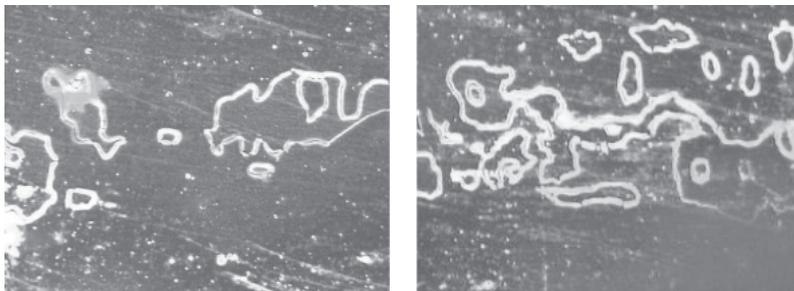


Рис. 14.18. Структуры твердых компонентов туалетной воды, визуализированные смесью нематиков МБА:ЭВА. 32х.  $T = 20^{\circ}\text{C}$

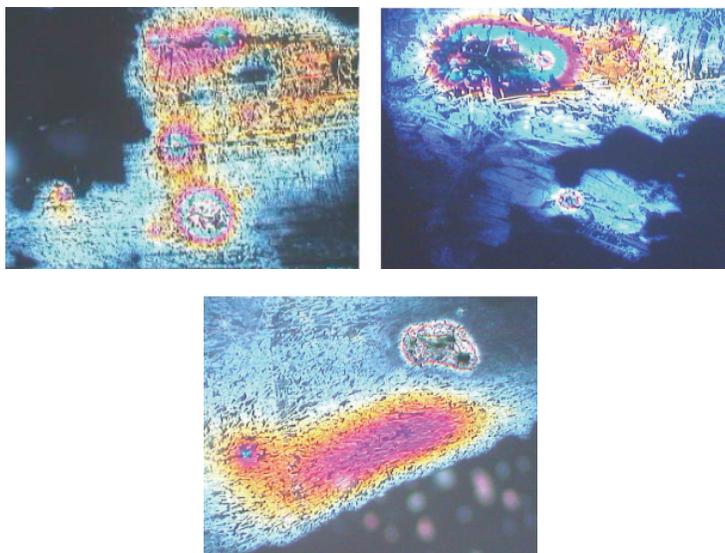


Рис. 14.19. Структуры твердых компонентов лаванды и ряда духов. МБА:ЭВА. 25х.  $T = 20^{\circ}\text{C}$

В специальных случаях для распознавания изображений структур можно использовать разработанные методы оптической обработки изображений. Так можно осуществлять контроль качества изделий и выявлять фальсифицированные продукты.

Предложена новая методика проверки устойчивости духов, основанная на измерении времени перехода нанесенного НЖК в изотропное состояние. Она иллюстрируется примером, приведенным на рис. 14.20.

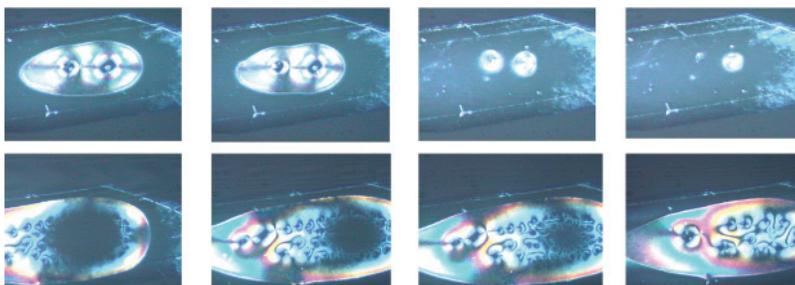


Рис. 14.20. Переход капли НЖК, нанесенной на твердые компоненты духов после их испарения, в изотропное состояние (верхний ряд, время перехода 22 мин). После полного испарения духов наблюдается обратный переход в нематическую фазу (нижний ряд, время перехода 36 мин). Духи Валентина. МВВА:ЭВВА 25х.  $T = 20^{\circ}\text{C}$

Было замечено, что при нанесении дозированной капли НЖК на твердые компоненты духов, НЖК переходит в изотропное состояние. Он вызывается облаком молекул духов, разрывающим связи молекул НЖК в мезофазе. Кинетика перехода показана в верхнем ряду рис. 14.20. После полного испарения молекул духов происходит обратный переход из изотропной фазы в нематическую (нижний ряд на рис. 14.20). Длительность нахождения НЖК в изотропном состоянии зависит от типа НЖК, размера капли и температуры. Этот параметр можно использовать как новый объективный критерий для оценки устойчивости духов при стандартных условиях проведения измерений.

#### *Детектирование структуры компонентов чая*

Качество чая зависит от его вкуса и аромата, хотя результат определяется индивидуальным пристрастием. В наше время контроль

качества проводится дегустатором. Субъективное восприятие качества чая можно заменить объективным контролем. Применение НЖК позволяет получить изображения структуры различных сортов чая. Такой подход не рассматривается альтернативным к дегустационному. Напротив, полученные изображения структур позволяют сопоставить дегустатору субъективные впечатления с результатами объективного анализа. Объектами исследования были различные чаи, в том числе элитные сорта, привезенные из специализированных магазинов Индии: Lipton, Lloyd & Gerson, Pr. Java, Pr. Noori, Sir Kent, Sun Cha и др. (рис. 14.21).

Применение НЖК дает новую информацию о структурах чая. Различные сорта имеют различные структуры, в то время как различные образцы чая одного сорта имеют одинаковые структуры, легко идентифицируемые визуально. Изученные структуры отличались по цвету. Большинство чаев после высушивания формировали тонкие пленки типа полимерного слоя. Границы пленки имели небольшие отличия от центральной зоны и зависели от качества чая. Дорогие сорта чая имели меньше посторонних включений.

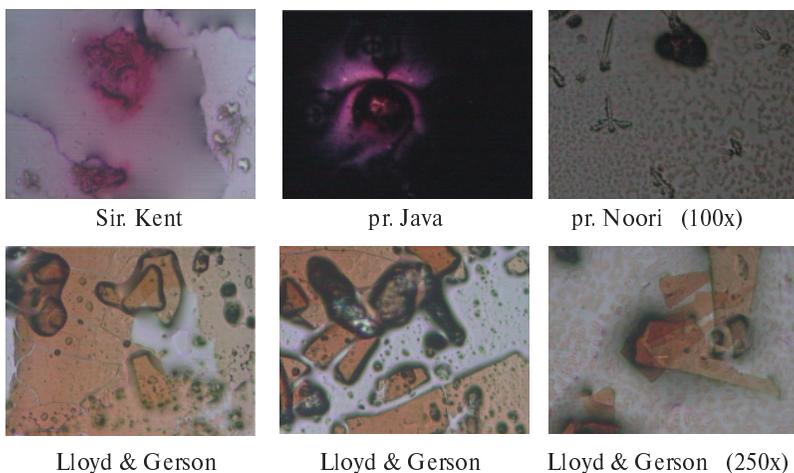


Рис. 14.21. Структуры различных сортов чая, визуализированные методом НЖК. МББА:ЭББА.  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , 100х

### *Детектирование структуры компонентов вин*

Объектами исследования были распространенные сорта французских вин: Каберне, Мерло, Пино и др. Их структуры были изучены по описанному выше методу и представлены при увеличении 100х на рис. 14.22. Анализ показывает, что структуры разных сортов вин заметно отличаются, а вина более высокого качества имеют меньшее количество включений.

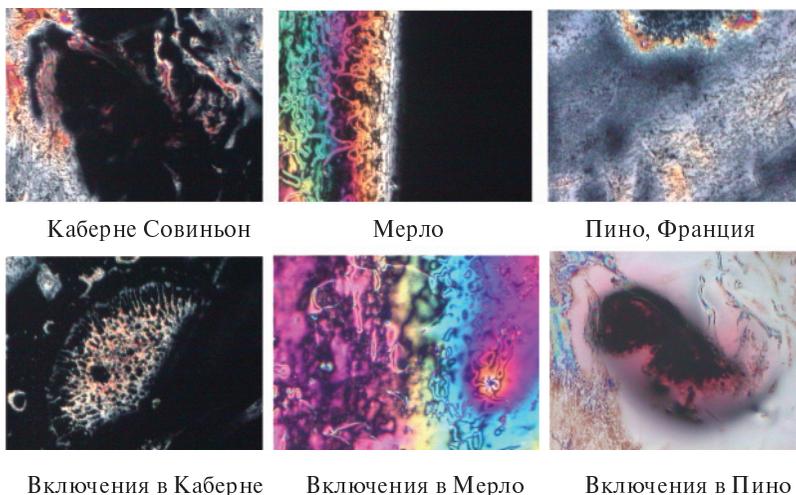


Рис. 14.22. Структуры вин, визуализированные смесью МББА:ЭББА — верхний ряд, 100х. Включения (осадок) — нижний ряд, 250х.  $T = 20^{\circ}\text{C}$

Метод НЖК также не является альтернативным к дегустационному. Напротив, полученные изображения структур позволяют сопоставить дегустатору субъективные впечатления с результатами объективного анализа [29].

Применение метода НЖК к изучению структур твердых компонентов растворов позволяет получить о них уникальную информацию, которую не дают другие методы. Это открывает возможности для выявления содержащихся в растворах опасных или вредных компонентов, таких как наркотики, яды и взрывчатые вещества. Для этого методы, описанные в экспериментах, необходимо развить до стандартизированных методик, что требует решения ряда методи-

ческих задач (обеспечение дозирования и выбора оптимальных материалов, идентичность условий при выполнении контроля, учет влияния летучих компонентов).

#### ***14.2.4. Изучение структуры биологических объектов***

В данном разделе основное внимание уделяется применению НЖК в биофотонике для выявления патологий в сложных биологических объектах. Ниже приводятся примеры эффективного использования метода НЖК при изучении тканей кожи, детектировании злокачественных новообразований, идентификации вирусов гриппа и выявления патологий в эритроцитах.

##### *Изучение структурных неоднородностей в гистологических срезах тканей человека*

Объектами исследования были образцы срезов кожи человека с хроническим воспалением в дерме и реактивным утолщением покрывающего ее эпидермиса. Изучались срезы фиксированной в формалине и замороженной ткани, помещенной на предметное стекло и не покрытое покровным стеклом. Срезы окрашивались гематоксилином, придающим фиолетовый цвет ядрам клеток, и эозином, придающим розовый цвет цитоплазме и межклеточному веществу [30]. Результаты исследований представлены на рис. 14.23.

Традиционная методика дает изображение структуры ткани с различимыми клетками эпидермиса, одинаково воспринимающими окраску, т. е. обладающими однотипными свойствами. При декорировании того же препарата слоем НЖК выявляются новые свойства клеток эпидермиса. В поверхностных слоях они имеют иной вид, чем

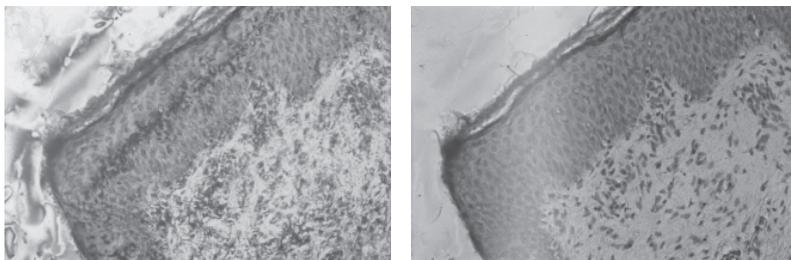


Рис. 14.23. Микрофотографии срезов кожи человека; слева — с использованием только микроскопа; справа — с помощью микроскопа и НЖК. 300х. МББА:ЭББА.  $T = 20^{\circ}\text{C}$  [31]

в базальных. Эта картина неизменно воспроизводится при многократном смывании НЖК растворителем (спирт, ацетон) и последующем повторном нанесении НЖК. Эпидермис в норме обладает слоистостью, причем базальный слой является ростковым, где расположены наиболее молодые клетки, а приповерхностный — наиболее зрелым, куда клетки перемещаются по мере их созревания. По мере созревания клеток в их цитоплазме происходит накопление белка кератина. При завершении жизненного цикла поверхностные клетки превращаются в роговые чешуйки, состоящие из кератина и его производных. НЖК выявляют различное содержание кератина в этих клетках. В этом случае можно говорить об утолщении эпидермиса при хроническом воспалении кожи за счет базального росткового слоя. Соотношения зрелого и незрелого слоев клеток эпидермиса на разных его участках существенно отличается. Эти различия не видны в оптический микроскоп в обычном микропрепарате. Этим показано, что метод НЖК позволяет получать новую дополнительную информацию о структуре биологических тканей в норме и при патологии [31].

#### *Применение НЖК для объективной диагностики злокачественных опухолей*

Известно, что проблема борьбы со злокачественными опухолями является одной из актуальных в медицине. Существует задача микроскопического определения злокачественного или доброкачественного характера опухоли. Исследования показали, что молекулы определенных классов НЖК, например МБА, ориентируются гомеотропно на поверхности срезов злокачественных опухолей, в то время как на поверхности срезов здоровых тканей имеют планарную или наклонную ориентацию [32, 33]. При наблюдении в поляризационный микроскоп области срезов со злокачественными опухолями выглядят темными, а здоровые ткани — светлыми или окрашенными в различные цвета (рис. 14.24).

Обнаруженное явление было использовано как новый критерий для объективной диагностики злокачественных опухолей. Были объяснены причины различной ориентации молекул НЖК на злокачественной и здоровой ткани и развиты новые представления о механизме роста злокачественных опухолей. Изучение характера декорирования 220 срезов тканей животных и человека с различными патологиями (в 130 случаях имелись различные виды злокачественных новообразований), подтвердило наблюдавшиеся различия между злокачественными опухолями и здоровыми тканями. Примеры сравнительного изучения злокачественных опухолей методами красителей и НЖК приведены на рис. 14.25а, б, в, г.

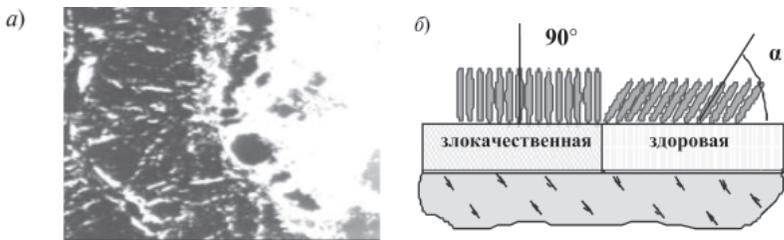


Рис. 14.24: а — фотография границы раздела области рака прямой кишки *adenocarcinoma* (слева) и окружающей здоровой ткани (справа), выявленной слоем НЖК; б — модель ориентации молекул НЖК на злокачественной и здоровой ткани

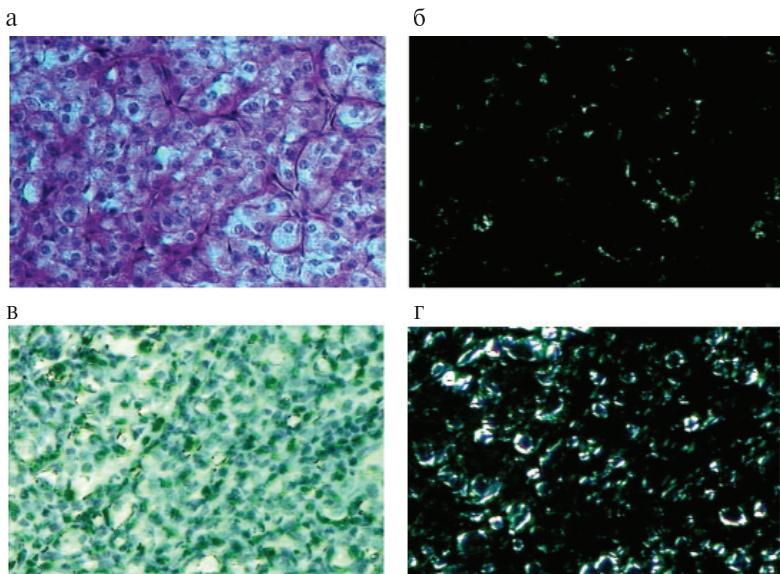


Рис. 14.25. Результаты сравнения злокачественных опухолей методами красителей (левый ряд) и НЖК (правый ряд) для образцов с раком почек (верхний ряд) и раком желудка (нижний ряд). МББА: ЭББА, 200x

Метод НЖК позволяет просто выявить темные зоны (рис. 14.25б, г), подозрительные на злокачественные образования.

Для расчета поверхностного натяжения  $\gamma_{SV}$  злокачественных и здоровых тканей использовалось уравнение Янга и Ньюмана [34]:

$$\gamma_{SL} = 2(\gamma_{LV} \times \gamma_{SV})^{1/2} e^{-0,00015 (\gamma_{LV} - \gamma_{SV})^2}; \quad (14.39)$$

$S$  — индекс твердой поверхности;  $L$  — жидкости;  $V$  — пара.

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_{LV} \cos\theta \quad (14.40)$$

Экспериментальные данные для МББА при  $t = 20^\circ\text{C}$  составляют  $30 \text{ дин/см}^2$ . Согласно измерениям  $\gamma_{SV}$  тканей, выполненным теневым методом, и расчетам:  $\gamma_{SV} = 26 \text{ дин/см}^2$  для злокачественных опухолей,  $\gamma_{SV} = 32 \text{ дин/см}^2$  для здоровых тканей (при точности измерений  $0,5 \text{ дин/см}^2$ ). Эксперименты с 11 типами тканей человека показали, что контактный угол смачивания на поверхности здоровых тканей на 30% больше, чем на злокачественных. Эти различия достаточны для выполнения правила, изложенного в работе [35], согласно которому гомеотропная ориентация молекул НЖК возникает в случае, когда  $\gamma_{LC} > \gamma_S$ , а планарная (или наклонная) ориентация возникает в случае, когда  $\gamma_{LC} < \gamma_S$ . Правило оказалось справедливым при декорировании всех типов злокачественных опухолей во всех экспериментах, выполнявшихся в течение 5 лет. Различия в ориентации ЖК на злокачественных и здоровых тканях объясняются различием их поверхностного натяжения.

Этот результат был подтвержден также в экспериментах *in vivo* при анализе мазков злокачественной ткани мыши (рис. 14.26). Причина различного поверхностного натяжения злокачественных опухолей и здоровых тканей связана с биохимическими особенностями злокачественных клеток. Поверхностное натяжение срезов биологических тканей определяется свойствами тонкой границы, заключенной между собственно тканью и слоем НЖК, выполняющей функцию командного слоя.

По своей природе это слой структурированной клеточными коллоидами (преимущественно белковыми) воды, напоминающий строение ЖК вследствие связывания ее молекул водородными связями (между атомом водорода одной и атомом кислорода другой молекулы воды). Толщина такого слоя лежит в пределах от 100 до 10000 Е. Было выявлено, что на поверхности срезов злокачественных опухолей вода имеет большую упорядоченность и большую толщину по сравнению со здоровой тканью. Это свойство можно объяс-

нить большей концентрацией белка и меньшей концентрацией жиров в интенсивно делящихся злокачественных клетках [36]. Поэтому энергия сцепления молекул НЖК с поверхностью срезов злокачественных опухолей оказывается выше энергии сцепления со срезами здоровой ткани (рис. 14.27).

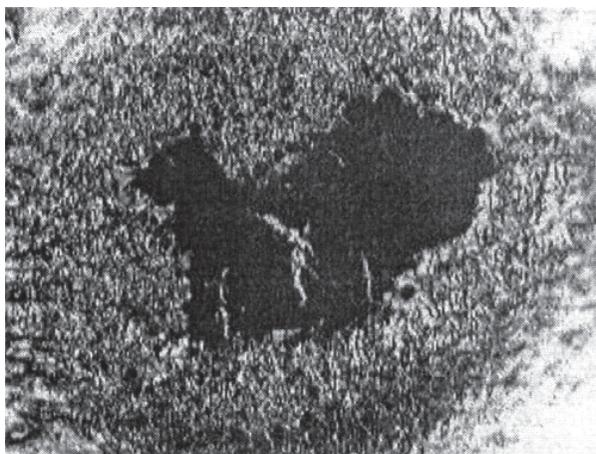


Рис. 14.26. Мазок ткани мыши, декорированный МББА (темная область) *in vivo*, 125x

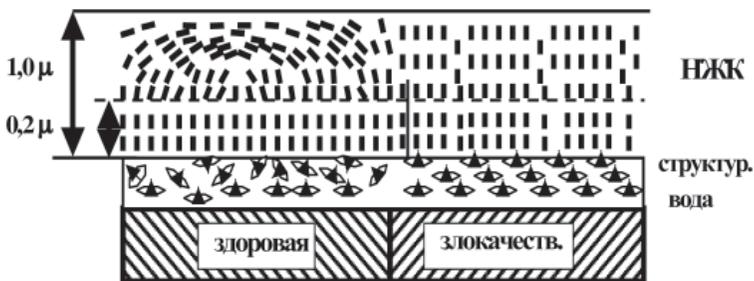


Рис. 14.27. Модельное представление о влиянии структурированности воды в пограничном слое на характер ориентации молекул НЖК на поверхности среза злокачественной опухоли и на границе со здоровой тканью

По этой причине над поверхностью злокачественной опухоли НЖК имеет гомеотропную ориентацию по всей толщине слоя НЖК (~1,0 мкм), а над здоровой тканью гомеотропная ориентация распространяется на меньшую толщину слоя НЖК, значения которой колебались в зависимости от вида ткани от 0,1 до 0,3 мкм. При удалении от границы гомеотропная ориентация переходит в планарную. Наблюдаемое изменение ориентации известно как локальный переход Фредерикса [1] и идентифицируется в проходящем поляризованном свете в виде светлой или окрашенной области.

Методы НЖК в изучении свойств злокачественных опухолей позволяют по-новому взглянуть на проблему ракового роста и метастазирования. В частности можно предположить, что скорость роста и метастазирование определяются кооперативными динамическими изменениями между показателями поверхностного натяжения опухоли (и ее метастазов) и поверхностного натяжения окружающих тканей. Предложенная гипотеза при ее независимом экспериментальном подтверждении может раскрыть вопросы злокачественного роста и метастазирования, относящиеся к избирательности и «излюбленной» локализации быстрорастущих метастазов злокачественных опухолей, частого отсутствия метастазов сарком в лимфатических узлах, долгих сроков субклинического существования опухолей, причин быстро и медленно прогрессирующего роста опухолей и наличия различных гистологических вариантов одной и той же опухоли в первичном очаге и ее метастазах.

Одним из ограничений в применении метода НЖК в диагностике злокачественных опухолей является необходимость получения среза ткани для проведения исследования, что может представлять трудности. В этой связи представляет интерес получение объектов исследования без применения хирургического вмешательства. Одним из возможных решений является изучение естественных человеческих выделений, например, мочи. Образцы мочи можно изучать по методике, разработанной для изучения твердых компонентов растворов, изложенной выше. Результаты исследования образцов мочи пациентов, страдающих мочеполовыми болезнями, приведены на рис. 14.28.

Цитологический анализ распределения ядер в осадках мочи, выполненный с помощью нового ПОМ и сопоставленный с традиционным урологическим исследованием, позволил отнести пациентов к группе риска прогрессирующего развития злокачественных опухолей. Индикатором служили области гомеотропной ориентации НЖК (темные зоны), причина формирования которых была проанализирова-

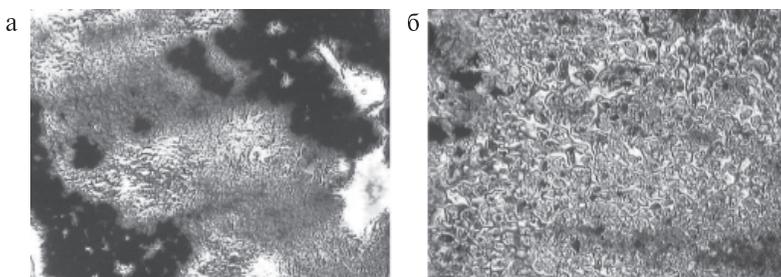


Рис. 14.28. Результаты проведения структурного анализа твердых компонентов мочи при различных патологиях: а — рак мочеточника; б — рак почек. МБА, 100х

на выше. Полученные результаты открывают возможности для структурного анализа патологий в других биологических жидкостях.

#### *Применение НЖК для независимой диагностики вирусов гриппа*

Проблема диагностики вирусов гриппа чрезвычайно актуальна, поскольку служит для предотвращения эпидемий и даже пандемии в мировом масштабе. Существующие методы диагностики основаны на использовании визуализации следов взаимодействия вирусов и антитела с помощью красителей и флуоресцентных меток [37]. К сожалению, они не дают возможности непосредственно наблюдать модификации вирусов гриппа. К тому же они требуют несколько дней для установления диагноза и содержат много операций. В работе [38] описана возможность визуализации вирусов разной структуры с помощью ЖК, наносимых на изучаемую поверхность, содержащую вирусы с различной упаковкой. Положительные результаты были получены при использовании слоев полианилина, обеспечивающих хорошую адгезию антител на стеклянных пластинах [39]. Другая методика, разработанная в институте ЖК в Кенте (США), основана на использовании дефицитных лиотропных ЖК типа хромоников [40]. Эти методы дороги и также не позволяют визуализировать непосредственно модификации вирусов.

В работе [41] был предложен простой, экспрессный и информативный метод с использованием дешевого НЖК, не требующий применения полианилинового слоя. На стеклянной подложке помещалась структура «вирус-антитело», на который наносился тонкий слой НЖК. Результаты изучения препаратов приведены на рис. 14.29.

В случае взаимодействия несогласованности структур «вирус-антитело» комплементарной реакции не происходит, что можно непосредственно наблюдать.

редственно наблюдать в поляризационный микроскоп (рис. 14.29б). При совпадении структур происходит комплементарная реакция, о чем свидетельствует возникновение кристаллоподобной сегментной структуры (рис. 14.29в).

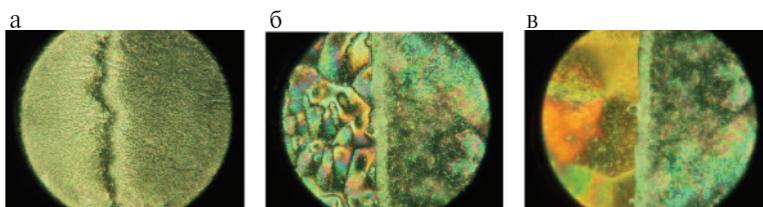


Рис. 14.29. Визуализация картины взаимодействия структур «вирус-антитело»: а — образец вируса гриппа модификации А (слева — с нанесенным слоем НЖК, справа — без слоя НЖК); б — образец структуры «вирус А-антитело В» (слева — с нанесенным слоем НЖК, справа — без слоя НЖК); в — образец структуры «вирус В-антитело В» (слева — с нанесенным слоем НЖК, справа — без слоя НЖК); МББА:ЭББА. 500х

Анализ картины следов взаимодействия вируса и антитела показывает, что в случае несогласованности структур наблюдается мозаичное изображение, состоящее из небольших блоков нерегулярной формы. В случае взаимодействия согласованных структур изменяется характер их связей, что проявляется в возникновении изображений регулярных блоков симметрии 6-го порядка (рис. 14.29г).

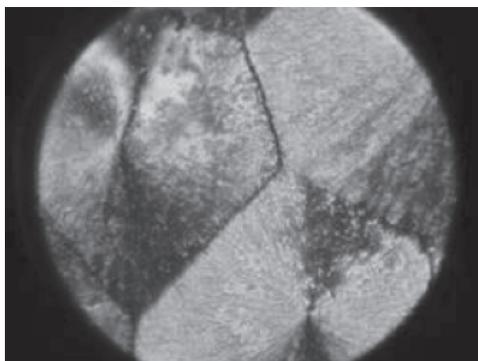


Рис.14.29.г Следы взаимодействия вируса и антитела в виде регулярных блоков симметрии 6-го порядка

Аналогичные результаты были получены в экспериментах, проведенных в другом научном центре без применения полианилинового слоя (рис. 14.30).

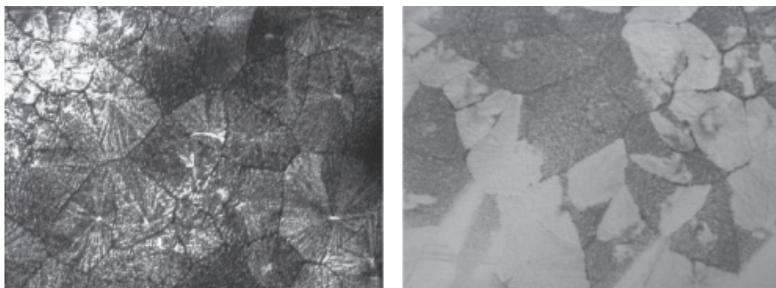


Рис. 14.30. Картина следов взаимодействия компланарных структур вируса В и антитела В на поверхности препарата без применения полианилинового слоя. МББА:ЭББА.  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ; увеличение 500х

Использование НЖК открывает новые возможности в идентификации типа вирусов и их модификаций по сравнению со спектроскопическим и флуоресцентным методами.

#### *Выявление патологических изменений в эритроцитах*

Изучение вязкоупругих свойств эритроцитов является актуальной задачей при установлении ранней стадии лейкемии, малярии и установлении допустимых нагрузок на пациента. Решающим параметром в этих случаях оказывается упругость эритроцитов, ответственная за их перемещение по капиллярам. Для выявления патологических нарушений в эритроцитах были разработаны различные методы. Метод НЖК можно использовать как альтернативный метод диагностики. Объектом исследования был мазок крови, размещенный на стеклянной подложке и высушенный без доступа загрязнений на открытом воздухе. На образец наносился тонкий слой НЖК и наблюдался в поляризационный микроскоп. Результаты наблюдения приведены на рис. 14.31. Было обнаружено, что в НЖК матрице здоровые эритроциты при взаимодействии с анизотропными молекулами НЖК деформируются, принимая форму прямоугольников. Причиной этому является анизотропия межмолекулярного взаимодействия в системе. В то же время эритроциты с патологией принимают деформированную конфигурацию, что объясняется нарушением их упругости (рис. 14.31)

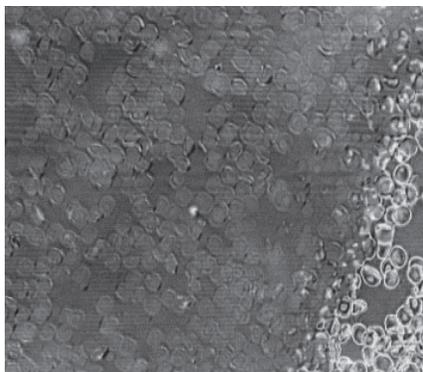


Рис. 14.31. Изображение эритроцитов в НЖК матрице: в слое НЖК эритроциты без патологий имеют прямоугольную форму, а вне зоны НЖК — овальную; эритроциты с патологическими нарушениями в слое НЖКА имеют деформированную конфигурацию. НЖК — 5ЦБ, 250х

Дополнительно возникновение прямоугольной формы у мембран эритроцитов было подтверждено методом лазерной дифракции. Предложенный метод может использоваться как независимый экспрессный метод для диагностики патологических изменений эритроцитов.

### 14.3. Визуализация структур с неоднородными магнитными полями

Структурные неоднородности в магнитных материалах оказались тесно связаны с областями однородной ориентации магнитных доменов. Поэтому представляется логичным рассмотреть в настоящей главе вопросы визуализации структур с неоднородными магнитными полями.

#### *Визуализация магнитных доменов в минералах*

Для изучения топографии магнитных полей в минералах обычно использовались либо метод магнитных эмульсий, либо эффекты Фарадея [42]. Получаемая с помощью эмульсий картина магнитных доменов выглядит хаотичной, и ее расшифровка вызывает трудности. На рис. 14.32 показаны в сравнении картины магнитных доменов на одной и той же поверхности кристаллов пирротина, визуализированные методами магнитных эмульсий и НЖК.

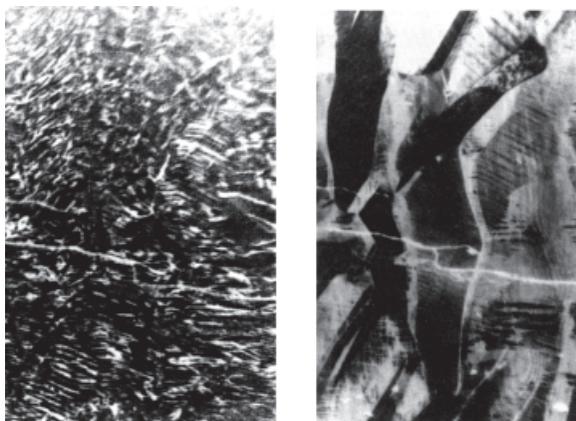


Рис. 14.32. Структура магнитных доменов на поверхности кристаллов пирротина, визуализированная методами магнитных эмульсий (слева) и НЖК (эвтектическая смесь МББА и ЭББА) (справа);  $T = 20^\circ\text{C}$ , 300х

Метод ЖК дает дополнительную информацию о структурных неоднородностях изучаемой поверхности и выявляет направления намагничивания в каждой точке поверхности, в том числе внутри отдельных блоков и зерен [40]. В каждом блоке домены имеют регулярную ориентацию, и вся картина обретает ясность.

Метод НЖК является новым инструментом для изучения магнитных свойств минералов, например, отличия структуры магнитных доменов в минералах различных месторождений.

*Визуализация магнитных доменов в материалах для запоминающих устройств*

Тонкие пленки в виде двойных слоев  $(\text{YLa})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ , выращенные на подложке  $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ , используются в запоминающих устройствах с высокой плотностью записи информации, основанных на переориентации цилиндрических магнитных доменов (ЦМД). Магнитооптические дефекты в упорядочении доменов могут явиться причиной дефектов в работе запоминающих устройств. Это явилось причиной изучения ЦМД. Вектор  $\mathbf{H}$ -поля в пленке может быть направлен параллельно или перпендикулярно к вектору оптической поляризации  $\mathbf{P}$ . Когда  $\mathbf{H} \perp \mathbf{P}$ , визуализацию ЦМД можно осуществить с помощью магнитооптического эффекта Фарадея. Когда  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{P}$ , эф-

фект Фарадея не позволяет визуализировать ЦМД, однако это можно осуществить с помощью НЖК (рис. 14.33).

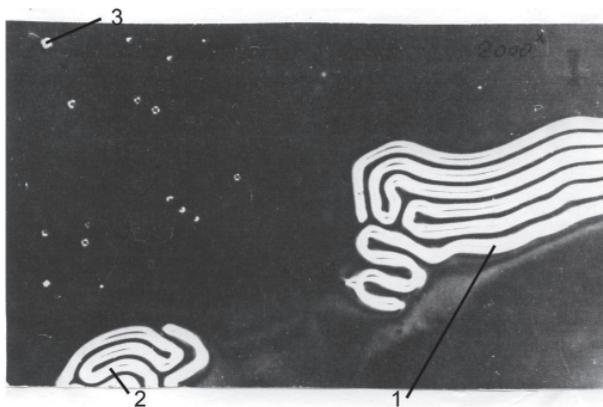


Рис. 14.33. Структуры магнитных доменов, выявленные с помощью НЖК: полосчатые (1), лабиринтные (2) и цилиндрические (3).  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , 5СВ, 2000х

Показаны различные структуры магнитных доменов, визуализированные с помощью НЖК: полосчатые (1), лабиринтные (2) и цилиндрические (3). Методом НЖК было также установлено, что регулярные структуры магнитных доменов искажаются под воздействием дефектов в материале.

#### *Визуализация магнитных доменов в тонких пленках на основе сплавов кобальта*

Тонкие пленки на основе сплавов Со используются в кораблестроении в качестве материала для экранирования магнитных полей. Они получили название аморфных по результатам рентгеноструктурных исследований, хотя структура их поверхности изучена недостаточно. Магнитная структура этих пленок зависит от технологии их изготовления. Для выявления их магнитной структуры использовались методы магнитной эмульсии и НЖК.

Размеры магнитных доменов в пленках на основе сплавов Со оказались меньше, чем разрешающая способность оптического микроскопа. Для увеличения размеров доменов прикладывалось поле от постоянного магнита. С помощью НЖК была выявлена морфо-

логия поверхности пленки, содержащие зерна различного химического состава, декорированные в различные цвета (рис. 14.34). Этот результат позволяет изучать причину неоднородности магнитных структур материалов не вслепую, а в связи с однородностью морфологии. Размеры доменов в зернах были в пределах от 1 до 10 мкм, изредка до 20 мкм. По сравнению с методом эмульсий НЖК позволяют определять напряженности магнитных полей доменов.

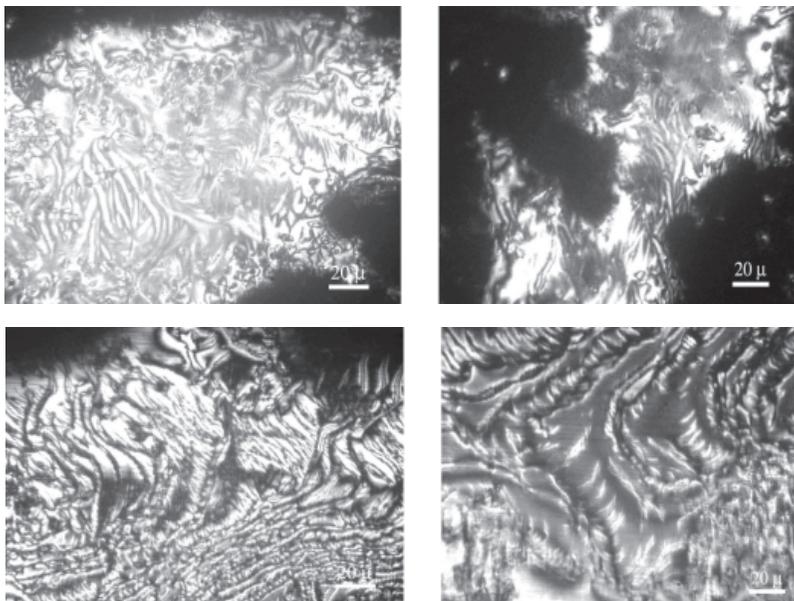


Рис. 14.34. Изображения магнитных доменов на поверхности аморфных пленок, визуализированные методом НЖК (МБА:ЭББА), размером от 1 до 10 мкм,  $t = 20^{\circ}\text{C}$ . Домены наблюдаются внутри визуализированных поликристаллических зерен

Для сокращения времени воздействия и увеличения чувствительности к магнитному полю был использован новый класс ЖК, содержащий редкоземельные металлы с гигантской величиной  $\Delta\chi$ , обусловленной вкладом парамагнитной анизотропии ионов лантаноидов [44]. Слои металломезогенов на основе редкоземельных металлов переориентировались магнитным полем доменов за доли секунды. Использовались ЖК координационные соединения осно-

ваний Шиффа с ионами Tb(III) —  $L_3Tb(C_{12}H_{25}SO_4)_3$  [45]. Используемый ЖК материал имел температуру мезофазы ТК 84 СЖК 115 ИЖ и гигантскую величину  $\Delta\chi = -22800 \cdot 10^{-6} \text{см}^3/\text{моль}$ . Это приводило к быстрой переориентации слоя ЖК под воздействием магнитных полей доменов. Другой особенностью этого класса соединений является их способность к переохлаждению. После охлаждения образца из мезофазы до комнатной температуры со скоростью 2–3 град/мин он сохраняет зарегистрированную в мезофазе структуру доменов. Этот «эффект памяти» открывает новые возможности для изучения неоднородных магнитных полей в материалах.

Проведенный анализ позволил уточнить представление об аморфности исследуемых пленок, что справедливо при изучении малых размеров образцов рентгеновскими методами. Методом оптической микроскопии с использованием термотропных ЖК надежно установлена поликристаллическая структура «аморфных» пленок. Этот результат открывает новые возможности в изучении природы неоднородных магнитных структур материала и ее связи с морфологией образцов. Он является независимым физическим методом для визуализации структуры доменов на поверхности магнитных материалов в статическом и динамическом режимах, обладающим высокой чувствительностью и пространственным разрешением.

Метод ЖК показал свою эффективность при изучении неоднородных магнитных полей на поверхности минералов, пленок ферромагнитных материалов и пленок на основе сплавов кобальта. Достоинством метода ЖК по сравнению с методом магнитных эмульсий является возможность визуализации неоднородных магнитных полей на поверхности материалов одновременно с визуализацией структурных неоднородностей материалов. Другим достоинством метода ЖК является его метрологические возможности, позволяющие рассчитывать напряженности локальных магнитных полей на поверхности образцов. Слои ЖК, охлажденные до твердокристаллического состояния, сохраняют зарегистрированное в мезофазе изображение неоднородных магнитных полей и структурных неоднородностей в твердокристаллическом состоянии (эффект памяти).

Результаты применения ЖК для изучения свойств поверхности разных материалов и изделий приведены в работе [46]. Следует также отметить применение НЖК для защиты ценных бумаг [47] и для визуализации ориентации слоев ряда органических соединений и замороженных слоев Лэнгмюр-блоджеттовских пленок [48].

## Литература к главе 14

1. *Томилин М.Г.* Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. Изд. Политехника. СПб. 2001. 325 с.
2. *Аэро Э.Л.* Двулучепреломление НЖК вблизи неоднородной поверхности // Оптика и спектроскопия. 1986. Т.60. Вып. 2. С. 347–353.
3. *Миранцев Л.В.* Деформированная смектическая А-структура в НЖК вблизи поверхности твердой подложки с микрорельефом // Тез. докл. XV межд. конф. «Математические модели, методы потенциала и конечных элементов в механике деформируемых тел», 19–22.06.1996. СПб. Изд. СПб ГТУ. С. 87.
4. *Гохштейн А.Я.* Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. М.: Наука. 1976. 399 с.
5. *Аэро Э.Л., Бахшиев Н.Г., Томилин М.Г.* Визуализация поверхностных дефектов различной природы с помощью НЖК // Оптика жидких кристаллов. Л.: ГОИ. 1986. Т.60. Вып. 194. С. 91–121.
6. *Бахшиев Н.Г.* Спектроскопия межмолекулярных взаимодействий. Л.: Наука. 1976. 263 с.
7. *De Jew W.H., Classen W.A.P.* The elastic constants of NLC terminally substituted azoxybenzenes // J. Chem. Phys. 1977/ Vol. 67. № 8. P. 3705–3712
8. *Аэро Э.Л., Томилин М.Г.* К теории устройств отображения информации на ЖК // Мат. 3-го отрасл. семинара «Опт. свойства ЖК и их применение». Л.: ГОИ. 1984. С. 98–115.
9. *Аэро Э.Л., Бахшиев Н.Г., Томилин М.Г.* Визуализация поверхностных дефектов различной природы с помощью НЖК // Оптика жидких кристаллов. Л.: ГОИ. 1986. Т. 60. Вып. 194. С. 91–121.
10. *Аэро Э.Л.* Двулучепреломление НЖК вблизи неоднородной поверхности // Оптика и спектроскопия. 1986. Т.60. Вып.2. С. 347–353.
11. *Аэро Э.Л., Томилин М.Г.* Применение ЖК для неразрушающего контроля оптических материалов, деталей и изделий // Журнал ОМП. 1987. № 8. С. 50–69.
12. *Томилин М.Г., Барсуков О.А.* Новый поляризационный микроскоп с расширенными функциональными возможностями // Опт. и спектр. 2010. №1. С. 122–128.
13. *Tomilin M.G.* LC vision // Optical information processing. SPIE, 1993. Vol. 2051. P. 286–294.
14. *Tomilin M.G., Marioge R.-P, Mercier R., Mullot M., Tissot G., Bernstein L., Roblin G.* The use of NLC in detection of polished glass surface defects // Optics (Paris). 1994. Vol. 25. № 5. P. 195–199.
15. *Томилин М.Г.* ЖК в исследовании состояния внутренних поверхностей микроканалов // Журнал ОМП. 1989. № 6. С. 41–43.
16. *Томилин М.Г., Полухин В.Н., Левин П.В.* НЖК в неразрушающем контроле микроканальных элементов // Опт. журн. 1998. Т.65. № 7. С. 55–57.

17. *Sonin A.* The surface physics of LCs. Amsterdam: Gordon and Breach Publ. 1995. P. 118–122.
18. *Tikhomirova N.A., Ginsberg A.V.* NLC drop's behavior on the anisotropic surface // Advances in LC research and application. Pergamon Press, Oxford-Budapest. 1980. P. 651–655.
19. *Tikhomirova N.A., Dontsova L.I., Pikin S.A.* Electrodiffusion process in FLC sandwiches // Proceed of V-th ICSC on LC. Odessa. 1983. Vol. 1. Part. 2. P. 189.
20. *Ivanyuk G. Yu., Tomilin M.G.* NLC thin layer application for analysis // Liquid Crystals. 1993. Vol. 14. № 5. P. 1599–1606.
21. *Tomilin M.G., Flegontov Yu.A.* The application of phase transitions in LC vision // Abstr. Book of 16-th ILCC. Kent, Ohio: Kent state university. 1996. P. 106.
22. *Пасынкова О.В., Рубан Ю.В., Томили М.Г., Чудор И.В.* Визуализация структурных неоднородностей кристаллических элементов из оптического кварца // Журн. ОМП, 1991. № 7. С. 69–71.
23. *Калинцев А.Г., Рахманова А.Р., Томили М.Г., Якобсон В.Э.* Структурные дефекты в кристаллах КТП и их связь с эффективностью удвоения частоты излучения // Опт. журн. 1995. № 11. С. 86–88.
24. *Глебов Л.Б., Мухамадеева А.Р., Никаноров Н.В., Томили М.Г.* Применение НЖК для визуализации гетерофазных структур в стеклообразных материалах // Опт. журн. 1994. № 7. С. 63–64.
25. *Kerpeleva S. Yu., Tomilin M. G., Terukov E. I.* LC Vision: The New Application to Silicon Surface Defects Testing. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2001 Vol. 368. P. 1–8.
26. *Керпелева С.Ю., Кудоярова В.Х., Томили М.Г., Теруков Е.И.* Визуализация дефектов поверхности кремниевых материалов методом НЖК / Опт. журн. 2003. № 7. С. 71–73.
27. *Томили М.Г., Иванов В.Ф., Чеберяко К.В., Ванников А.В.* Использование нематиков для изучения неоднородности проводимости полимерных структур // Опт. журн. 2004. Т. 71. № 11. С. 95–96.
28. *Tomilin M.G.* LC vision application to objective detecting solutions smell and taste // Book of Abstract 12<sup>th</sup> International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals, October 1–5, 2007. Hotel NH, Puebla City, Mexico, O-11. P. 34.
29. Bulgarian patent. Reg. N 110231/ 13.10. 2008.
30. *Tomilin M.G., Povzun S.A.* The application of NLC for decoration structural inhomogeneities in histological sections of human tissues // Sov. J. Opt. Techn., 1998. Vol. 7. P. 58.
31. *Томили М.Г., Повзун С.А.* Применение ЖК для декорирования структурных неоднородностей в гистологических срезах тканей человека // Опт. журн., 1998. Т. 65, № 7. С. 58–59.
32. *Томили М.Г., Повзун С.А., Киранов А.А.* Применение нематиков для оптической диагностики злокачественных опухолей // Опт. журн., 1999. Т. 66, № 1. С. 141–144.

33. *Томилин М.Г., Повзун С.А., Киранов А.А.* Применение нематиков для объективной диагностики злокачественных опухолей // Журнал научн. и прикл. фотогр. 1999. Т. 44. №4. С. 27–31.

34. *Томилин М.Г., Повзун С.А., Грибанова Е.В., Ефимова Т.А.* Исследование с помощью нематиков поверхностного натяжения тканей с целью диагностики злокачественных опухолей // Опт. журн. 2001. Т. 68. № 9. С. 73–77.

35. *Kahn F.J., Taylor C.N., Shonhorn H.* Surface-produced alignment of LCs // Proceed. IEEE. 1973. Vol. 61. P. 823–829.

36. *Томилин М.Г., Курмашов А.Ф., Повзун С.А.* Использование нематических жидких кристаллов для диагностики злокачественных опухолей // Журнал «Жидкие кристаллы и их практическое использование», Иваново. 2004. Вып. 2. С. 86–90.

## Глава 15

### ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

ЖК материалы используют для визуализации распределения электрических полей и их локальных неоднородностей. Это позволило применить ЖК для обнаружения структурных неоднородностей полупроводниковых материалов, дефектов в диэлектрических слоях и изделиях микроэлектроники, для исследования доменной структуры сегнетоэлектриков и электрических полей биологических объектов.

#### 15.1. Теоретическое описание деформации директора в неоднородных электрических полях

##### 15.1.1. *Общая теория деформации НЖК в неоднородных электрических полях*

Визуализация неоднородных электрических полей вызвана деформацией НЖК — пространственными искажениями поля директора  $\mathbf{n}(x, y, z)$ . Они возникают в результате конкурентного ориентирующего действия на НЖК электрического поля и твердых поверхностей.

В работе [1] разработан общий метод решения двумерных задач вида  $\mathbf{n}(x, y, E)$ , которые получены для НЖК ячеек с криволинейными границами и различным образом заданными электрическими потенциалами.

Рассмотрим изгибные деформации векторных линий поля директора  $\mathbf{n}(x, y)$ , происходящие в плоскости  $(x, y)$ . Деформации кру-

чения при этом из рассмотрения исключаются. Уравнение изгибных деформаций в электрическом поле имеет вид:

$$\mathbf{n} \times [K_{11} \text{grad div } \mathbf{n} - K_{33} \text{rot rot } \mathbf{n} + \Delta \epsilon (\mathbf{E} \mathbf{n}) \mathbf{E}] = 0 \quad (15.1)$$

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} \quad (15.2)$$

Здесь  $K_{11}$  и  $K_{33}$  — упругие модули поперечного и продольного изгибов;  $\Delta \epsilon$  — диэлектрическая анизотропия;  $\epsilon_{\parallel}$  и  $\epsilon_{\perp}$  — диэлектрическая проницаемость НЖК в продольном и поперечном направлениях.

Далее рассматривается одноконстантное приближение  $K_{11} = K_{33} = K$ . Также в уравнение (15.1) не включают линейные по  $E$  члены, связанные с флексоэлектрической поляризацией, полагая, что

$$e(\partial E / \partial x) \ll \Delta \epsilon E^2 \rightarrow e / \Delta \epsilon \ll Ed. \quad (15.3)$$

Здесь  $e \approx 10^{-4}$  СГСЕ — флексоэлектрическая константа.

Хотя сильно полярные НЖК с большими значениями  $\Delta \epsilon$  специально не рассматриваются, особое внимание уделяется большим электрическим полям, превышающим пороговые значения, когда  $Ed > 3$  СГСЕ ( $E = 1$  В/мм,  $d$  — толщина слоя). Для малых полей пренебрежение флексоэффектом возможно в тех случаях, когда он просто отсутствует (например, в силу симметрии формы молекул НЖК). Другим важным условием является отсутствие проводимости слоя НЖК, определяющее диэлектрический режим переориентации молекул в электрическом поле.

С учетом этих замечаний перепишем уравнение (15.1), введя углы  $\varphi$  и  $\psi$  ориентации векторов  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{E}$  по отношению к оси  $oy$  с помощью соотношений:

$$n_x = \sin \varphi, \quad n_y = \cos \varphi,$$

$$E_x = E \sin \psi, \quad E_y = E \cos \psi. \quad (15.4)$$

Тогда уравнение (15.1) примет вид:

$$K \nabla^2 (2\alpha) - E^2 \Delta \epsilon \sin 2\alpha = -2K \nabla^2 \psi. \quad \alpha = \varphi - \psi. \quad (15.5)$$

Здесь  $\alpha$  — угол между векторами  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{E}$ .

Уравнения электрического поля таковы:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } U, \quad \text{div } \mathbf{D} = 0, \quad \mathbf{D} = \epsilon_{\perp} \mathbf{E} + \Delta \epsilon (\mathbf{E} \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (15.6)$$

Здесь  $U$  — электрический потенциал,  $\mathbf{D}$  — вектор индукции поля, который удобнее переписать в виде:

$$\mathbf{D} = 1/2(\epsilon_{\parallel} + \epsilon_{\perp}) [E_{\parallel} + E_{\perp}] + \epsilon_{\parallel}(E - E_{\perp}) \quad (15.7)$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}) / (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \quad (15.8)$$

Здесь  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$  — составляющие вектора  $\mathbf{E}$  вдоль  $\mathbf{n}$  и в перпендикулярном направлении. Поскольку  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\parallel} + \mathbf{E}_{\perp}$ , то при  $\varepsilon = 0$  приходим к линейной зависимости между векторами  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{E}$ :

$$\mathbf{D}_0 = 1/2(\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}) \mathbf{E}; \quad \varepsilon = 0. \quad (15.9)$$

Тогда из уравнения (15.6) следует, что электрический потенциал  $U_0$  в этом же приближении удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\nabla^2 U = 0, \quad (15.10)$$

т. е. является гармонической функцией. Это свойство играет определяющую роль в решении нелинейного уравнения (15.5). Обоснуем малость параметра  $\varepsilon$ , определенного в уравнении (15.8). Для слабо полярных НЖК  $\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_{\perp}$ . С ростом полярности НЖК величина  $\varepsilon$  возрастает, но даже для сильно полярных соединений  $\varepsilon \geq 1$ . Это позволяет развить метод возмущений по  $\varepsilon$ . Исключая сильно полярные НЖК, можно ограничиться нулевым приближением при анализе нелинейного уравнения (15.5).

В нулевом приближении после решения уравнения Лапласа нужно перейти к уравнению (15.5), где величины  $\mathbf{E}_0$  и  $\psi$  находятся по электрическому потенциалу  $U_0$ , теперь известному. Анализ уравнения (15.5) опирается на принцип конформационных преобразований, позволяющих существенно упростить вид уравнения и перейти к задаче с простой геометрией области  $S_u$ .

Окончательные результаты преобразования уравнения (15.5) принимают вид следующих соотношений:

$$\nabla^2 \psi = 0, \quad \nabla^2 = E^2 \nabla_U^2 \quad (15.11)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \nabla^2 &= (\partial^2/\partial x^2) + (\partial^2/\partial y^2); \\ \nabla_u^2 &= (\partial^2/\partial U^2) + (\partial^2/\partial V^2), \end{aligned} \quad (15.12)$$

Величины  $U$  и  $V$  — комплексно сопряженные потенциалы электрического поля, такие, что  $U(x, y) = \text{const}$  и  $V(x, y) = \text{const}$ , — представляют собой уравнения эквипотенциалей и силовых линий  $\mathbf{E}$ -поля соответственно. С учетом выражения (15.11) уравнение (15.5) приобретает более простой вид:

$$\nabla_u^2(2\alpha) - U_{\varepsilon}^{-2} \sin 2\alpha = 0. \quad U_{\varepsilon} = \sqrt{K/\Delta\varepsilon} \quad (15.13)$$

Здесь  $U_{\varepsilon}$  — характеристический потенциал, зависящий лишь от свойств НЖК.

В результате получается также нелинейное, но более простого вида уравнение в плоскости  $(U, V)$ , не содержащее переменного коэффициента в правой части, как в равенстве (15.5). При конформном преобразовании относительный угол  $\alpha$  между двумя векторами сохраняется. Поэтому решение (15.13)  $\alpha(U, V)$  переводится в плоскость  $(x, y)$  просто раскрытием зависимости функций  $U$  и  $V$  от координат  $x, y$ :

$$\varphi(x, y) = \alpha[U(x, y), V(x, y)] + \psi(x, y);$$

$$\psi(x, y) = \arctg(U'_x/U'_y); \quad (15.14)$$

$$U'_x = \partial U/\partial x; \quad U'_y = \partial U/\partial y \quad (15.15)$$

Очевидно, ориентационное поле  $\varphi$  зависит непосредственно от электрических потенциалов  $U, V$  и их производных, т. е. составляющих вектора напряженности  $E_x, E_y$ . Через них просто выражается угловая функция  $\psi$ . Относительный угол  $\alpha$  как функция  $U, V$  уточняется путем решения нелинейного уравнения синус-Гельмгольца (15.13).

При решении конкретных задач по визуализации распределения  $E$ -полей на изучаемых поверхностях граничные условия могут быть различными. Некоторые примеры решения приведены в работе [1].

### **15.1.2. Деформация директора НЖК и электрооптический отклик в неоднородных полях**

Развитие теоретических представлений о поведении НЖК в пространственно неоднородных электрических полях было сделано в работах [2–4]. Рассмотрены электрооптические эффекты при различных типах начальной ориентации в пространственно неоднородных полях разнообразных форм: гармоническое поле, поле от края плоского конденсатора, поле точечного заряда, поле с осевой симметрией. Отмечены основные особенности электрооптики НЖК в неоднородных полях по сравнению со случаем однородного поля:

— эффект является пороговым только в случае отсутствия проекции поля на направление начальной ориентации молекул. В противном случае эффект является беспороговым: НЖК реагирует на малейшее изменение пространственно неоднородного поля;

— НЖК реагирует не на величину поля, а на его изменение по координатам;

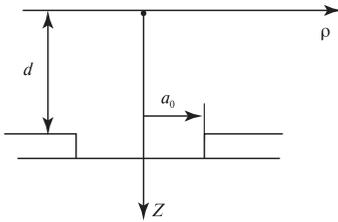


Рис. 15.1 Цилиндрическая пора радиусом  $a_0$  в диэлектрическом слое

— в случае малой диэлектрической анизотропии и/или больших значений градиентов неоднородного электрического на поведение ЖК оказывает существенное влияние деформация, обусловленная флексоэффектом;

— чувствительность и разрешающая способность ЖК слоя зависят от диэлектрической анизотропии вещества и его модулей упругости.

Приведем расчет деформации директора в случае пространственно неоднородного поля, представляющий интерес для дефектоскопии поверхности. В работе [4] рассчитана деформация директора НЖК в неоднородном поле с осевой симметрией (рис. 15.1).

Граничные условия для потенциала электрического поля в цилиндрической системе координат  $(\rho, \varphi, z)$  имеют вид:

$$U|_{z=d} = U_0(\rho) = \{0 \text{ при } \rho > a_0; U_0 \text{ при } \rho < a_0\}$$

$$U|_{z=0} \equiv 0 \quad (15.16)$$

Потенциал вида (15.16) имеет место, например, в случае, когда приложенное поле экранируется всюду, кроме области, имеющей форму круга радиусом  $a_0$ . Примером является сквозная цилиндрическая пора радиусом  $a_0$  в диэлектрическом слое на проводящей подложке при выполнении условия, что произведение удельного сопротивления диэлектрического поля на его толщину существенно больше соответствующего произведения для НЖК. Тогда при наличии дефекта в диэлектрическом слое все напряжение, приложенное к образцу, будет падать в области нематика. Потенциал на стеклянном электроде  $U|_{z=0}$  принят за нуль.

Рассмотрены радиально симметричные малые деформации директора первоначально гомеотропно ориентированного НЖК в неоднородном электрическом поле с граничными условиями (15.16):

$$\mathbf{n} = (\theta, 0, 1), \quad |\theta| \ll 1. \quad (15.17)$$

Электрическое поле находится при решении задачи Лапласа для потенциала  $U(\rho, z)$  в слое ЖК:

$$\varepsilon_{\perp} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial \rho} \right) + \varepsilon_{ii} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (15.18)$$

$$E = -\text{grad}U = \left( -\frac{\partial U}{\partial \rho}, 0, -\frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (15.19)$$

С помощью преобразования Ханкеля первого порядка из уравнений 15.18 и 15.19 с граничными условиями (15.16) найдено распределение потенциала в слое НЖК:

$$U(\rho', z') = U_0 a_0' \int_0^{\infty} I_1(a_0' \xi) I_0(\rho' \xi) \frac{\text{sh} \xi z'}{\text{sh} \xi} d\xi, \quad (15.20)$$

где  $\rho' = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \frac{\rho}{d}$ ,  $z' = \frac{z}{d}$  — безразмерные координаты.  $I_0, I_1$  — функ-

ции Бесселя нулевого и первого порядков,  $a_0' = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \frac{a_0}{d}$ .

Далее рассчитана деформация директора НЖК, удовлетворяющая минимуму функционала свободной энергии в пространственно неоднородном поле с потенциалом  $U(\rho', z')$  (15.20). Если диэлектрическая анизотропия ЖК мала:

$$U_0 \leq \frac{(e_{11} + e_{33})4\pi}{\Delta\varepsilon}, \quad (15.21)$$

то деформация директора целиком определяется флексоэлектрическим эффектом в неоднородном электрическом поле. Используя уравнение Эйлера для функционала свободной энергии [5] в предположении равенства всех модулей упругости и с учетом радиальной симметрии, получим:

$$\frac{\partial}{\partial \rho'} \left( \frac{1}{\rho'} \frac{\partial}{\partial \rho'} (\rho' \theta) \right) + \beta' \frac{\partial^2 \theta}{\partial (z')^2} + a_f \frac{\partial^2 U}{\partial \rho' \partial z'} = 0, \quad (15.22)$$

где  $\beta' = \frac{K_{33} \varepsilon_{\perp}}{K_{11} \varepsilon_{\parallel}}$ ,  $a_f = \frac{e_{11} + e_{33}}{K_{11}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}}$ .

Подставляя в уравнение (15.22)  $U(\rho', z')$  из (15.20) и используя граничные условия для угла  $\theta|_{z'=0} = \theta|_{z'=1}$ , получим в случае  $\beta' \neq 1$

$$\theta = \frac{1}{\xi^2 (\beta' - 1)} \left[ ch \xi z' - ch \frac{\xi z'}{\beta'} - \frac{sh \frac{\xi z'}{\beta'}}{sh \frac{\xi}{\beta'}} \left( ch \xi - ch \frac{\xi}{\beta'} \right) \right] \quad (15.23)$$

При  $\beta' = 1$  («резонансное» условие) или  $\frac{K_{33}}{K_{11}} = \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}$ , угол деформации и достигает максимально возможных значений:

$$\theta = \frac{1}{2} A_f (z' - 1) \int_0^{\infty} I_1 \left( \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \frac{a_0}{d} \xi \right) I_0 \left( \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \frac{\rho}{d} \xi \right) \xi \frac{sh \xi z'}{sh \xi} d\xi, \quad (15.24)$$

где 
$$A_f = \frac{U_0 (e_{11} + e_{33}) a_0}{K_{11} d}$$

Фазовая задержка, соответствующая данной деформации  $\theta$ , равна:

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= \frac{2\pi d}{\lambda} \int_0^1 \left( \frac{n_{\parallel} n_{\perp}}{\sqrt{n_{\parallel}^2 \cos^2 \theta + n_{\perp}^2 \sin^2 \theta}} - n_{\perp} \right) dz' \approx \\ &\approx \frac{\pi d}{\lambda} n_{\perp} \left( 1 - \frac{n_{\perp}^2}{n_{\parallel}^2} \right) \int_0^1 \theta^2 (z') dz' = \frac{\pi d}{\lambda} n_{\perp} \left( 1 - \frac{n_{\perp}^2}{n_{\parallel}^2} \right) \langle \theta^2 \rangle, \end{aligned} \quad (15.25)$$

где  $\langle \theta^2 \rangle$  — среднее по толщине слоя значение деформации  $\theta^2$ .

Приведенные формулы были использованы для численного расчета распределения директора и двойного лучепреломления слоя НЖК в области поры. Результаты свидетельствуют о том, что в центре поры деформация равна нулю, а на краю, где неоднородность поля максимальна, деформация также достигает максимума (рис. 15.2, кривые 2 и 2'). Величина средней деформации директора при одном и том же напряжении возрастает с ростом размера поры. Таким образом, при данном приложенном напряжении НЖК в окрестности пор малых размеров может иметь электрооптический отклик, меньший, чем порог разрешения глаза или фотоприемника. Для визуализации этих пор необходимо увеличение напряжения. Это приводит к уве-

личению числа визуализированных дефектов с возрастанием величины приложенного напряжения. Расчет показал, что область деформации НЖК превосходит размер поры. Полуширина кривой  $\langle \theta^2 \rangle$  на уровне ее полувысоты ( $\Delta$ ) характеризует разрешение слоя ЖК [6, 7], а также является величиной, характеризующей протяженность области деформации директора вне поры. Анализ полученных результатов расчета позволяет сделать вывод о том, что величина  $\Delta/a_0$  возрастает с уменьшением размера поры, т. е. область деформации директора (по отношению к размеру поры) больше в случае малых дефектов. Диэлектрическая анизотропия НЖК влияет как на высоту кривой  $\langle \theta^2 \rangle(\rho/d)$ , так и на ее ширину. Максимальная величина  $\langle \theta^2 \rangle$ , достигаемая при данном напряжении  $U_0$ , характеризует чувствительность ЖК при визуализации дефекта. Расчет показал, что  $\langle \theta^2 \rangle_{\max}$  достигает наибольшего значения при условии резонанса (рис. 15.3), т. е. при выполнении условия

полнении условия  $\frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} \approx \frac{K_{33}}{K_{11}} \approx 1$ . При изменении этого отношения

чувствительность падает, причем более резкое уменьшение наблюдается для веществ с отрицательной анизотропией ( $\epsilon_{\parallel}/\epsilon_{\perp} < 1$ ).

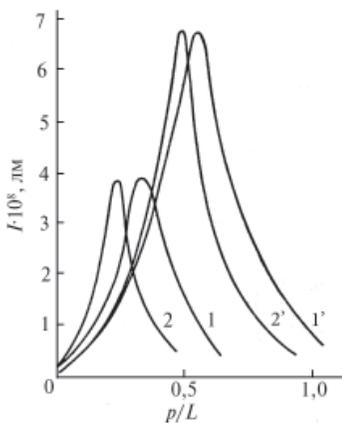


Рис. 15.2. Зависимость оптического отклика МБА для пор разных размеров (10 и 20 мкм) от расстояния от центра поры: 1, 1' — экспериментальные кривые; 2, 2' — теоретические

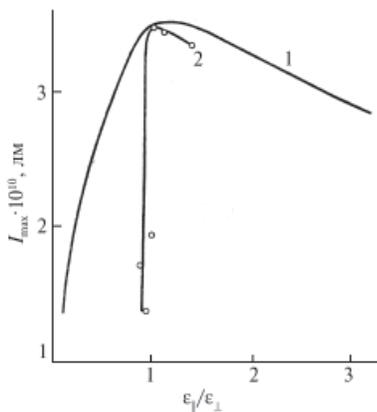


Рис. 15.3. Зависимость максимального оптического отклика от диэлектрической анизотропии НЖК. 1 — теоретическая, 2 — экспериментальная

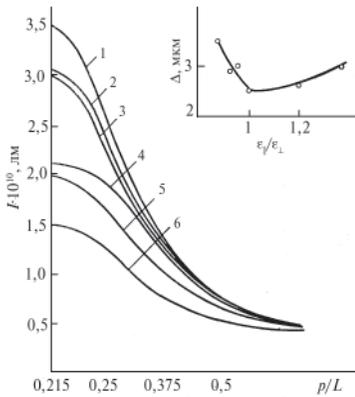


Рис. 15.4 Оптический отклик НЖК вблизи края поры диаметром 5 мкм для НЖК с разными величинами  $\frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}}$ : 1 — 1,0; 2 — 1,06; 3 — 1,34; 4 — 0,89; 5 — 0,98; 6 — 0,92. На вставке — разрешающая способность различных НЖК ( $\Delta$ )

этом достигаются максимальные значения фазовой задержки);

— величины модулей упругости должны быть минимальны;

— молекулы НЖК в исходном состоянии должны быть ориентированы гомеотропно;

— необходимо выполнение условия  $\frac{K_{33}}{K_{11}} \approx \frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} = 1$ .

Основные выводы теории были проверены экспериментально [3, 7]. Для этих целей была создана тестовая структура, где на кремнии *p*-типа был выращен диэлектрический слой оксида кремния толщиной около 1,5 мкм. В этом слое с помощью фотолитографии были созданы окна разных размеров в диапазоне от 2 до 100 мкм, окисел в которых был вытравлен. В качестве второго электрода в ЖК ячейке использовалась стеклянная пластина с прозрачным проводящим покрытием. Толщина слоя НЖК была 20 мкм. Использовались смеси НЖК с различной величиной диэлектрической анизотропии. Они

Разрешающая способность слоя НЖК заданной толщины *d* также существенно зависит от его диэлектрической анизотропии (рис. 15.4).

Наименьшую полуширину (большую разрешающую способность) имеет НЖК с параметрами, близкими к резонансным. Результаты расчета  $\langle \theta^2 \rangle_{\max}$  для разных значений модулей упругости  $K_{33}$  и  $K_{11}$ , свидетельствуют об уменьшении чувствительности НЖК с ростом их модулей упругости, причем  $K_{11}$  оказывает большее влияние, чем  $K_{33}$ . Разрешающая способность НЖК практически не зависит от модулей упругости.

Проведенный анализ позволил сформулировать требования к оптимальному ЖК материалу для дефектоскопии [8]:

— оптическая анизотропия должна быть максимальна (при

были составлены на основе МББА ( $\Delta\epsilon = 0,59$ ) и ЖК-440 ( $\Delta\epsilon = 0,4$ ), к ним добавлялись НЖК с положительной анизотропией. Экспериментальные результаты представлены на рис. 15.2, 15.3 и 15.4, которые удовлетворительно согласуются с теоретическими. Смещение максимумов по отношению к теоретическим (рис. 15.2) вызвано не идеальностью формы окна в диэлектрическом слое. Результаты эксперимента подтверждают, что оптимальной является резонансная смесь

$\left( \frac{K_{33}}{K_{11}} \approx \frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} = 1 \right)$ , так как она имеет максимальные значения чувстви-

тельности и разрешающей способности (рис. 15.5).

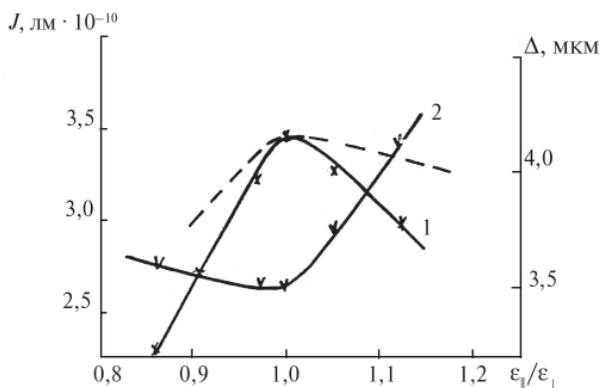


Рис. 15.5. Зависимость чувствительности (1) и разрешающей

способности (2) НЖК от  $\frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}}$ . Штриховая кривая —

теоретическая зависимость.

Проведенные исследования влияния электропроводности НЖК на величину электрооптического отклика показали, что с ростом электропроводности его чувствительность и разрешающая способность уменьшаются.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что деформация директора НЖК в пространственно неоднородном электрическом поле в окрестности дефекта обусловлена флексоэлектрическим эффектом.

## 15.2. Визуализация дефектов с помощью НЖК

### 15.2.1. Визуализация дефектов в диэлектрических слоях

Для современных интегральных схем (ИС) характерен рост степени интеграции. Он достигается за счет уменьшения размера элементов, что способствует активации различных процессов деградации. Диэлектрические пленки, применяемые в производстве больших интегральных схем, несут значительную функциональную нагрузку. Дефекты ухудшают электрические и изоляционные свойства диэлектрических слоев, вызывая отказ ИС, потенциальную ненадежность приборов. Для проверки качества диэлектрических слоев в процессе производства применяются различные методы контроля. Предпочтение отдается неразрушающим методам, к которым относится метод на основе НЖК. Он является экспрессным, не требует дорогостоящего оборудования и позволяет визуализировать дефекты на всей контролируемой поверхности.

Для дефектоскопии диэлектрических пленок были сначала использованы неориентированные НЖК. В области дефектов при приложении электрического поля наблюдалось динамическое рассеяние света (ДРС), вызванное протеканием тока силой примерно  $3 \cdot 10^{-2}$  А/м<sup>2</sup> через слой ЖК [9]. Этот метод имел ряд недостатков: для визуализации дефектов необходимы существенные токи, он имеет недостаточно высокую чувствительность и низкую контрастность. В работе [10] впервые для этих целей были использованы ориентационные эффекты в НЖК. Ячейка, используемая для визуализации дефектов, показана на рис. 15.6.

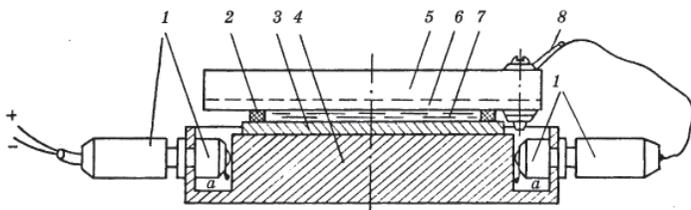


Рис. 15.6. Схема ЖК ячейки для визуализации дефектов в диэлектрическом слое: 1, 8 — разъемы; 2 — прокладка; 3 — изучаемая пластина с диэлектрическим слоем; 4 — металлическое основание; 5 — стеклянная пластина; 6 — прозрачный электрод; 7 — слой НЖК, наблюдаемый в поляризационный микроскоп

На основании 4 помещали исследуемую пластину 3 с диэлектрическим слоем. На нее наносили слой НЖК 7, толщина которого ( $d = 40$  мкм) задавалась прокладками 2. Сверху располагалась стеклянная пластина с прозрачным электродом 6. Напряжение подводилось через разъемы 1 и 8. Ячейку помещали на предметный столик поляризационного микроскопа. Для исследования использовались гомеотропно ориентированные слои НЖК. При подаче напряжения на ячейку в окрестности дефекта наблюдается локальная переориентация молекул ЖК, вызванная наличием в этой области неоднородного электрического поля. При наблюдении в параллельных лучах оптический отклик НЖК аналогичен коноскопической фигуре (рис. 15.7). Причем характер оптического отклика не зависит от знака и величины диэлектрической анизотропии НЖК и одинаков для различных диэлектрических слоев. В центре коноскопического креста молекулы перпендикулярны подложке, а остальные — наклонены и располагаются по образующим коаксиальных конусов. При фиксированном напряжении наблюдаются кресты разных размеров, что свидетельствует о разных размерах визуализируемых дефектов. С увеличением напряжения увеличивается угол наклона молекул  $\theta$ , что приводит к возрастанию оптической разности хода. В связи с этим наблюдается рост коноскопического крес-

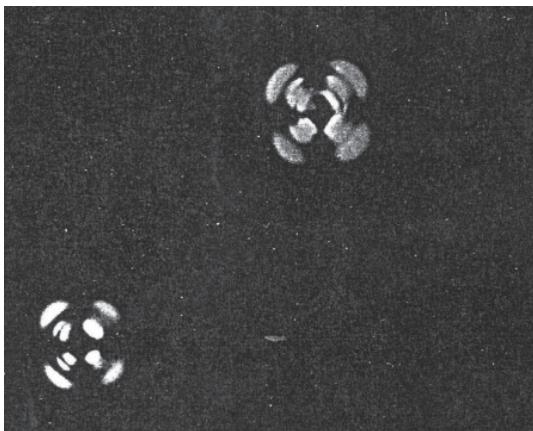


Рис. 15.7. Оптический отклик НЖК в окрестности дефектов, 120х

та и увеличение числа изохром. Увеличение напряжения также приводит к появлению новых крестов: число визуализируемых дефектов возрастает с ростом напряжения (рис. 15.8).

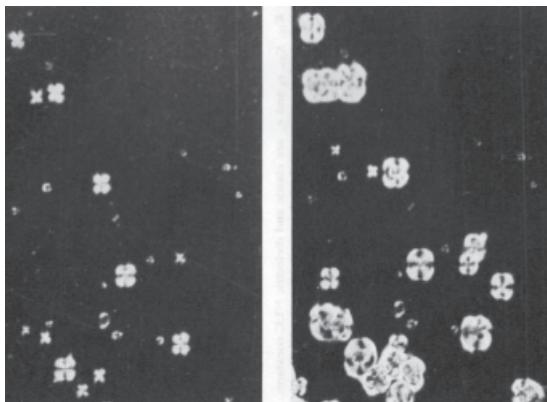


Рис. 15.8. Визуализация дефектов в диэлектрических слоях двуокиси кремния: слева —  $U=18$  В; справа —  $U=22$  В, 120x

Проведенное сопоставление метода НЖК на основе ориентационных эффектов с методом ДРС показало, что напряжение визуализации одних и тех же дефектов при использовании ДРС в 3–4 раза выше, а ток через дефект увеличивается примерно на порядок. Напряжение визуализации ( $U_v$ ) дефектов зависит от полярности напряжения, приложенного к ЖК ячейке. Для биполярных дефектов, обнаруживаемых при обеих полярностях, напряжение визуализации ниже при отрицательном смещении на кремниевой подложке [10].

На рис. 15.9 представлены зависимости числа визуализируемых дефектов в двуокиси кремния от напряжения: кривая 1 получена при отрицательном смещении на кремнии, 2 — при обратной полярности. Дефекты, представленные кривой 2, являются биполярными. Разница в числе дефектов, определяемых кривыми 1 и 2, определяют число монополярных дефектов, т. е. наблюдаемых только при отрицательной полярности на кремнии. Как показали многочисленные измерения [11–13], число монополярных дефектов существенно выше, чем биполярных.

Чувствительность метода к полярности напряжения позволяет идентифицировать обнаруживаемые дефекты. Изучение тех же дефектов с помощью растрового электронного микроскопа показало, что к биполярным дефектам относятся сквозные поры, царапины, проводящие включения, пронизывающие пленку насквозь. К монополярным дефектам относятся несквозные поры, выступы и неровности рельефа поверхности подложки, нарушения однородности окисла. В работах [11, 12] рассмотрен механизм визуализации биполярных и монополярных дефектов. В отсутствии дефектов для термического окисла и НЖК выполняется условие:  $\rho_1 L \ll \rho_2 d$ , где  $\rho_1$ ,  $L$  и  $\rho_2$ ,  $d$  — удельные сопротивления и толщины диагностируемого диэлектрического слоя и НЖК соответственно. Это условие приводит к тому, что напряжение на ЖК ниже порога В-эффекта и его гомеотропная ориентация остается невозмущенной, что при скрещенных поляризаторах фиксируется как темный фон. В центре биполярного дефекта диэлектрический слой отсутствует, и напряжение падает на слое ЖК. На краях дефекта электрическое поле является сильно неоднородным, в этой области происходит деформация директора, вызванная флексоэлектрическим эффектом [3]. Установлена эмпирическая зависимость между размером сквозной поры ( $a_0$ ) и напряжением ее визуализации:  $a_0 \approx 47/U^2$  [8]. Монополярные дефекты визуализируются только при отрицательной полярности напряжения на кремнии. В области этих дефектов наблюдается локальное усиление электрического поля, приводящее к возникновению токов утечки (при  $E \geq 5$  МВ/см). Оптический отклик НЖК возникает только над теми местами  $\text{SiO}_2$ , где величина тока достаточна для компенсации положительного заряда на границе  $\text{SiO}_2$ -НЖК [14]. Для визуализации тех же дефектов при

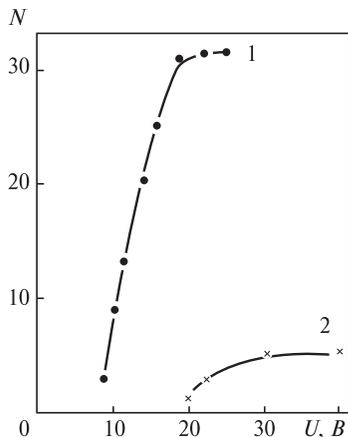


Рис. 15.9. Зависимость числа визуализируемых дефектов  $N$  от напряжения  $U$ : 1 — для отрицательного смещения на кремниевой подложке; 2 — обратная полярность

Это условие приводит к тому, что напряжение на ЖК ниже порога В-эффекта и его гомеотропная ориентация остается невозмущенной, что при скрещенных поляризаторах фиксируется как темный фон. В центре биполярного дефекта диэлектрический слой отсутствует, и напряжение падает на слое ЖК. На краях дефекта электрическое поле является сильно неоднородным, в этой области происходит деформация директора, вызванная флексоэлектрическим эффектом [3]. Установлена эмпирическая зависимость между размером сквозной поры ( $a_0$ ) и напряжением ее визуализации:  $a_0 \approx 47/U^2$  [8]. Монополярные дефекты визуализируются только при отрицательной полярности напряжения на кремнии. В области этих дефектов наблюдается локальное усиление электрического поля, приводящее к возникновению токов утечки (при  $E \geq 5$  МВ/см). Оптический отклик НЖК возникает только над теми местами  $\text{SiO}_2$ , где величина тока достаточна для компенсации положительного заряда на границе  $\text{SiO}_2$ -НЖК [14]. Для визуализации тех же дефектов при

положительной полярности на кремнии электрическое поле в оксиде (в области дефекта) должно достигать очень высоких значений. Вследствие того, что рабочие напряжения в ЖК ячейке ограничены напряжением пробоя, указанные дефекты удается визуализировать только при отрицательном потенциале на кремнии. Метод НЖК по измерению напряжений визуализации монополярных дефектов позволяет рассчитать коэффициент усиления поля неровностями подложки и плотности тока утечки в этих местах [15].

Проведенные исследования показали, что чувствительность метода НЖК (минимальный размер обнаруживаемого дефекта) определяется величиной предельного рабочего напряжения ( $U_{\text{пред.}}$ ), приложенного к ЖК ячейке [8]. В таблице 15.1 приведены значения  $U_{\text{пред.}}$  для разных толщин оксида и соответствующие им значения чувствительности.

Таблица 15.1

**Чувствительность метода НЖК для разных толщин диэлектрических пленок**

d SiO <sub>2</sub> , нм	$U_{\text{пред.}}$ , В	Чувствительность, мкм
10	11	0,39
20	18	0,15
30	23	0,09
40	28	0,06
50	30	0,05
60	36	0,04
80	48	0,02
100	60	0,01

Столь высокая чувствительность обусловлена тем, что область деформации в слое НЖК значительно больше величины дефекта.

Неразрушающий характер метода НЖК, его экспрессность, простота используемого оборудования в сочетании с высокой чувствительностью и разрешающей способностью делают его полезным для обнаружения дефектов в диэлектрических слоях на проводящих подложках.

### *15.2.2. Визуализация электрически активных дефектов поверхности полупроводниковых пластин*

В настоящее время наиболее широко используемым полупроводниковым материалом является кремний, поэтому проблема не совершенства и примесей в кристаллах кремния всегда была одной из главных в технологии производства ИС.

Для исследования дефектности поверхности кремниевых пластин были использованы НЖК [8, 15, 16]. Гомеотропно ориентированный ЖК, нанесенный на кремний, переориентируется при приложении напряжения, равного пороговому напряжению В-эффекта. Если на поверхности кремния имеются дефекты, в окрестности которых имеется неоднородное электрическое поле, то переориентация в этой области носит беспороговый характер. Однако диапазон рабочих напряжений для выявления дефектов на поверхности кремния ограничивается в этом случае пороговым напряжением В-эффекта (примерно 4В при использовании МБА). В случае применения НЖК с  $\Delta\epsilon = 0$  происходит расширение диапазона рабочих напряжений за счет устранения В-эффекта. Однако, при напряжении около 5,5 В в этом веществе появляются домены типа мальтийских крестов (ЭГДН-домены), что ограничивает сверху рабочий диапазон напряжений. Оптический отклик НЖК в окрестности дефектов различного типа разный. Для того, чтобы выявить соответствие между откликом и типом дефекта, проводились исследования обнаруженных дефектов с помощью растрового электронного микроскопа и селективного травления. Сравнение результатов позволило идентифицировать обнаруженные с помощью НЖК дефекты по характеру их оптического отклика. Микрофотографии с оптическим откликом НЖК в окрестности различных дефектов на поверхности кремниевых пластин приведены на рис. 15.10–15.14. При исследовании дефектности нескольких партий пластин кремния КДБ-20 (100) были визуализированы дефекты, оптический отклик которых имел форму коноскопического креста (рис. 15.10). Выявленные с помощью травления дефекты имели вид плоскодонных ямок, что позволило классифицировать их как микродефекты.

В работе [15] проведено исследование дефектности пластин, прошедших термообработку с резким перепадом температур. Наличие больших термомеханических напряжений в кремнии привело к образованию дислокаций. Большое количество дислокаций и дислокационных петель обнаружено в процесс травления. Сравне-

ние результатов методов НЖК и травления позволяет сделать вывод о том, что НЖК визуализируют скопления электрически активных дислокаций, декорированных такими примесями, как Ni, Cu, Fe, Na, Co из газов и других химреактивов. Наблюдаемые в этом случае с помощью НЖК дефекты имеют вид замкнутых кривых различных конфигураций размером 10-500 мкм (рис. 15.11).

Метод НЖК позволяет визуализировать распределение примеси в кремнии. На рис. 15.12 показаны результаты исследования поверхности пластин кремния КЭФ-7,5 (100), в которые была проведена имплантация золота. При приложении импульсного электрического поля в НЖК на темном поле появляются белые пятна; при дальнейшем увеличении напряжения они растут и появляются новые.

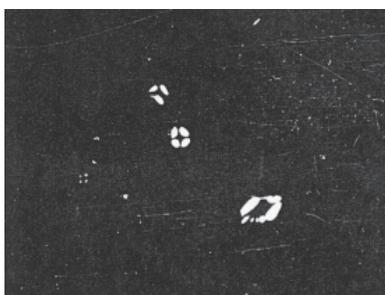


Рис. 15.10. Электрически активные микродефекты. Увеличение 120х

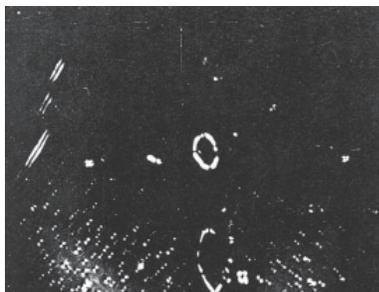


Рис. 15.11. Скопления электрически активных дислокаций, декорированных металлическими примесями, 120х



Рис. 15.12. Визуализация локальных «островков» примеси на поверхности кремния. Напряжение 4В, 120х



Рис. 15.13. Визуализация быстро диффундирующей примеси (расстояние между полосами 30 мкм)

На рис. 15.13 показана визуализация быстро диффундирующей примеси (полосчатое легирование).

С помощью НЖК при приложении электрического поля можно также визуализировать механические нарушения поверхности кремниевых пластин, невидимые в микроскоп без НЖК (рис. 15.14).

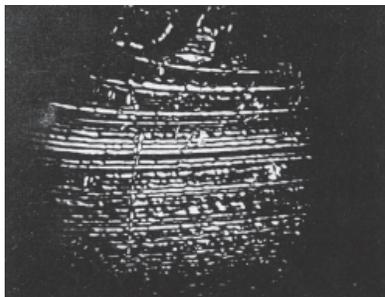


Рис. 15.14. Визуализированные НЖК следы шлифовки кремния, 120х

### ***15.2.3. Визуализация неоднородных электрических полей и дефектов в монокристаллах полупроводников в пространственных модуляторах света на ЖК***

Визуализация неоднородных электрических полей с помощью ЖК лежит в основе широкого класса оптически управляемых транспарантов (ОУТ). В них при изучении закономерностей формирования изображений было обнаружено, что помимо самого изображения в световом пучке, отраженном от поверхности полупроводника, присутствует и скрытое артефактное изображение [17]. Сопоставление фрагментов артефактных изображений с картинками избирательного химического травления полупроводника ОУТ показало, что они обусловлены дефектами кристаллической структуры полупроводника: дислокациями, собственными и примесными дефектами и их комплексами. Оптическая система для визуализации дефектов кристаллической структуры высокоомных полупроводников приведена на рис. 15.15. Она преобразует черно-белые полутоновые изображения в псевдоцветные с последующей спектральной селекцией для усиления слабоконтрастных деталей — структурных неоднородностей материала. На электроды освещаемой с двух сторон ЖК ячейки подавалось импульсное или синусоидальное напряжение, создающее в



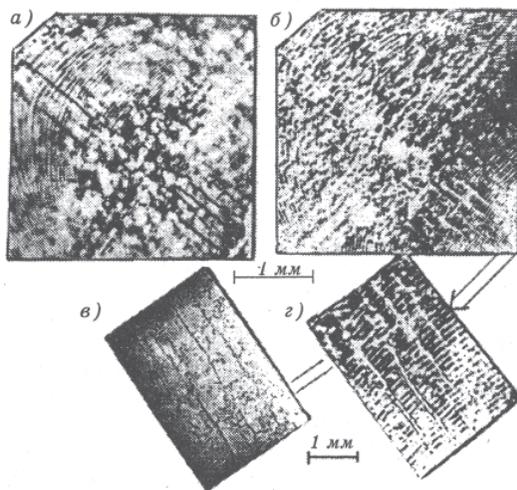


Рис. 15.16. Сопоставление изображений структурных дефектов в пластине арсенида галлия (а) с картиной избирательного травления (б, з) той же пластины: а — режим питания ЖКЯ —  $U=80В$ ,  $f \approx 100$  кГц; б, в — дислокационные стенки и полосы роста, выявленные травлением; в — участок пластины, тождественный изображенному на рис. з, д с дислокациями, выявленными травителем

исследования были пластины арсенида галлия марки АГРПМ-3 и фосфида индия марки ФИП-1. Результаты выявления структурных дефектов в полупроводниках методами ЖК и травления приведены на рис. 15.16.

#### 15.2.4. Визуализация доменных структур в сегнетоэлектриках

Известен ряд методов для наблюдения и изучения статических и динамических доменных структур в сегнетоэлектриках. Однако они применимы только для случая, когда сегнетоэлектрические домены разного знака имеют различную ориентацию оптических индикатрис. В случае коллинеарных сегнетоэлектриков с оптически неразличимыми доменами эти методы неприменимы и для их контроля используют разрушающие методы, основанные на различной

скорости травления доменов разной полярности. Метод НЖК основан на изменении ориентации директора на сколе сегнетоэлектрика и лишен упомянутых недостатков [18, 19].

На рис. 15.17 приведена характерная картина доменного строения триглицидсульфата (ТГС), визуализированная с помощью НЖК на сколе (010) кристалла. На обоих доменах ориентация слоя НЖК планарная, но на домене с отрицательным направлением спонтанной поляризации на поверхности (010) директор ориентирован вдоль направления [001], а на домене с положительным выходом спонтанной поляризации на поверхность — вдоль направления [508] или [702]. Установлено, что ориентационные энергии на обоих направлениях очень близки, но для [508] или [702] эта энергия меньше. Метод позволяет визуализировать домены размером до 1 мкм на сколах полярных сегнетоэлектриков любой толщины и полярной площади.



Рис. 15.17. Статическая 180-градусная доменная структура монокристалла ТГС, визуализируемая слоем НЖК на сколе (010), 100х

Движение объемного заряда в нематике под колеблющимися доменными стенками приводит к конвективным течениям, которые вызывают изменение упорядочения в слое НЖК. При наблюдении в поляризационный микроскоп области доменных стенок хорошо различимы.

Важное значение имеет визуализация дефектов в кристаллах, возникающих при их облучении ионизирующей радиацией. Если кристалл ТГС в монодоменном состоянии облучить рентгеновским излучением через маску и затем приложить внешнее постоянное электрическое поле, то изменяется поляризация только необлучен-

ной части образца. При этом четко выявляется граница между облученной и необлученной зонами образца (рис. 15.18).

Чувствительность метода НЖК позволила выявлять дефекты поверхности, возникающие при ее исследовании с помощью растрового электронного микроскопа. Ранее полагали, что облучение электронами с энергией в несколько килоэлектронвольт не изменяет свойств поверхности. Однако метод НЖК выявил дефекты, сохраняющиеся более года после облучения ТГС (рис. 15.19).

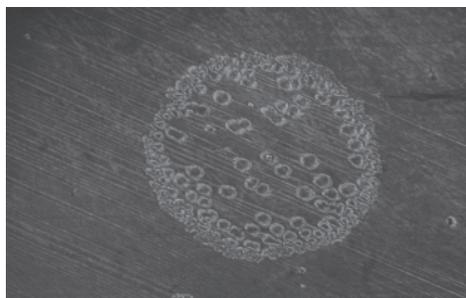


Рис. 15.18. Визуализация методом НЖК продольных доменов и радиационных дефектов на участке сегнетоэлектрического кристалла ТГС (Cu-излучение;  $D = 0,2$  мрад; толщина ТГС 1 мм); смесь МБА:ЭББА. 50х

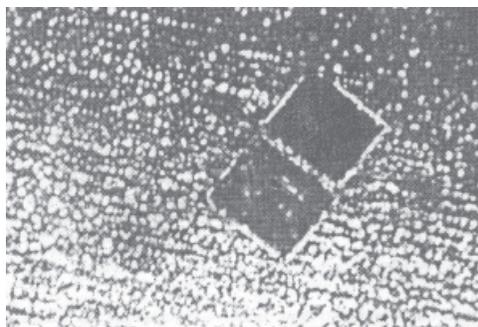


Рис. 15.19. Поверхность ТГС, локально облученная электронами. Визуализированы прямоугольные радиационные дефекты, сохраняющиеся более года после облучения. Увеличение 100х

### ***15.2.5 Применение НЖК для контроля технологических операций при изготовлении интегральных схем и проверки работоспособности приборов***

#### *Исследование дефектности пленок фоторезиста*

Фотолитография является одним из основных методов планарной технологии. В процессе фотолитографии используется светочувствительный полимер — фоторезист. Плотность дефектов в фоторезисте определяется как свойствами самого фоторезиста, так и условиями фотолитографической обработки. В работе [20] для исследования дефектности фоторезиста применены НЖК. Пленки фоторезиста наносили центрофугированием как непосредственно на кремниевую подложку, так и на слой оксида кремния. В последнем случае измерения проводились после того, как система  $\text{SiO}_2$ -фоторезист травилась в буферном травителе в течение времени, необходимого для полного удаления незащищенного фоторезистом окисла. Толщина фоторезиста в различных экспериментах была равна 0,8–1,0 мкм. В готовом к нанесению фоторезисте ФП-383 проверяли наличие загрязняющих металлических примесей эмиссионной спектроскопией и фотометрией пламени (для щелочных металлов). Отдельные партии фоторезиста сильно загрязнены щелочными металлами, преимущественно, натрием. Выявление дефектов в пленках фоторезиста происходит аналогично визуализации дефектов в пленках двуокиси кремния, но вместо инъекции и туннелирования электронов через ФП-383 под действием поля дрейфуют заряженные ионы (для фоторезиста на кремнии). Когда под фоторезистом находится пленка окисла, то механизм усложняется, включая в себя туннелирование электронов через окисел, перенос заряда ионами в фоторезисте и перераспределение электрического поля в системе диэлектриков с увеличением доли, приложенной к НЖК. Проводилось сравнение результатов измерений дефектности с медно-желатиновым методом (пластина делилась на две половины — для контроля обоими методами). Результаты свидетельствуют о большей чувствительности метода НЖК. Использование метода НЖК позволило проследить за изменением дефектности в слое ФП-383 на начальных стадиях его обработки: после нанесения и сушки; после проявления в растворе КОН; после повторной сушки; после травления в буферном растворе для пленок двуокиси кремния.

Показано, что метод НЖК может быть успешно применен для обработки технологических операций, связанных с использованием фоторезиста.

*Определение толщины диэлектрических пленок на пластинах и в контактных окнах интегральных схем*

Проведенные в работе [21] исследования В-эффекта в структуре НЖК-SiO<sub>2</sub>-Si показали, что пороговое напряжение линейно возрастает с ростом толщины окисла кремния. Наклон прямой зависит от полярности приложенного напряжения и для данной толщины оксида при прямом включении (минус на Si) порог В-эффекта ниже, чем при обратном. Эти результаты использованы для определения толщины SiO<sub>2</sub> и визуализации распределения толщины по пластине. На рис. 15.20 приведена фотография пластин с тонким диэлектриком в центре (наблюдается В-эффект), а по обе стороны от него — толстый диэлектрик, в котором визуализированы дефекты.

В этом случае граница оксидов не является четкой и метод НЖК позволяет ее детально исследовать. Точность определения толщины сверхтонких окислов (около 10 нм) составляет 1–2 ангстрема. Метод НЖК был применен для измерения толщин различных оксидов (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.).

Одной из операций технологического маршрута при изготовлении ИС является формирование окон для обеспечения контактов к поликремнию и к р-п-переходам. В слое оксида с помощью травителя происходит вскрытие контактных окон. Наличие пленки двуокиси кремния в окне может привести к отсутствию контактов между

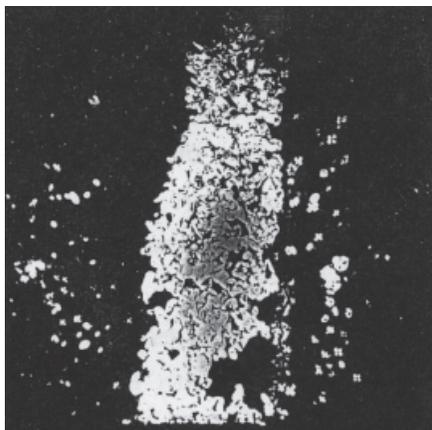


Рис. 15.20. Визуализация границы «толстый-тонкий» диэлектрик с помощью НЖК

алюминием и кремнием или к образованию барьера. Для контроля полноты вскрытия контактных окон в диэлектрических слоях ИС необходимо оценивать толщину окисла в них. Эллипсометрический метод не пригоден для этой цели из-за малой площади окон. Метод НЖК был успешно применен для этих целей [22, 23]. На рис. 15.21 показан оптический отклик НЖК в области контактных окон тестового кристалла.

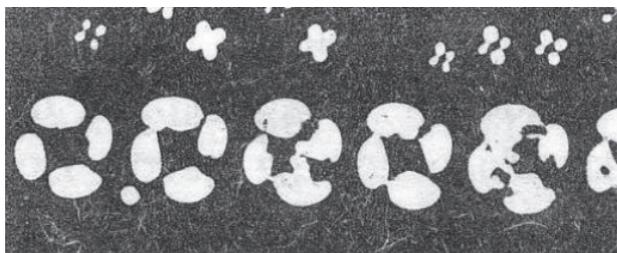


Рис. 15.21. Визуализация контактных окон ИС с помощью НЖК, 120х

Неодинаковость свечения окон одного размера свидетельствует об их разном вскрытии. Для определения толщины остаточного окисла исследовались вольт-контрастные характеристики (ВКХ) НЖК в окрестности окон, из которых определялось напряжение высвечивания  $U_0$ . Это напряжение, при котором интенсивность све-

та на ВКХ равна  $I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2}$ . Напряжение визуализации для окон

размером менее 10 мкм зависит от полярности приложенного напряжения и с ростом толщины окисла оно линейно возрастает. Были построены градуировочные графики  $U_0(d)$  для окон разных размеров. Для этих целей использовались тестовые пластины, содержащие группы контактных окон разных размеров, а также окна большой площади, в которых толщину окисла измеряли с помощью эллипсометра. На рис. 15.22 приведен градуировочный график для окон размером  $(4 \times 4)$  мкм<sup>2</sup> (прямая 2).

Зависимости  $U_0(d)$  для НЖК в области окон отличаются от аналогичных зависимостей для однородного электрического поля (рис. 15.22). Напряжение высвечивания резко уменьшается с ростом размера окна для малых окон (менее 10 мкм) и незначительно изменяется при дальнейшем увеличении размера окна (рис. 15.23).

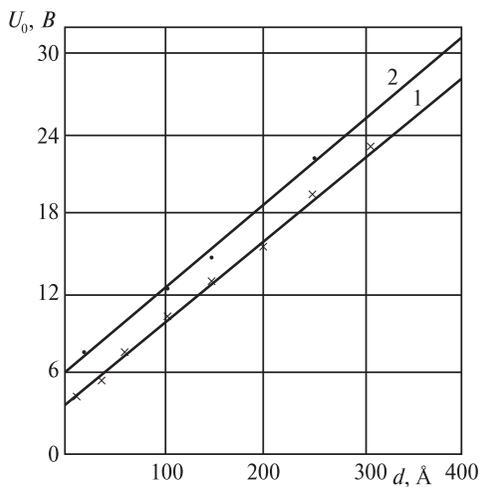


Рис. 15.22. Зависимость напряжения высвечивания НЖК в области окон ( $4 \times 4$ ) мкм<sup>2</sup> (прямая 2) и порогового напряжения В-эффекта от толщины SiO<sub>2</sub> (прямая 1). Градуировочные прямые приведены для случая положительной полярности на кремнии

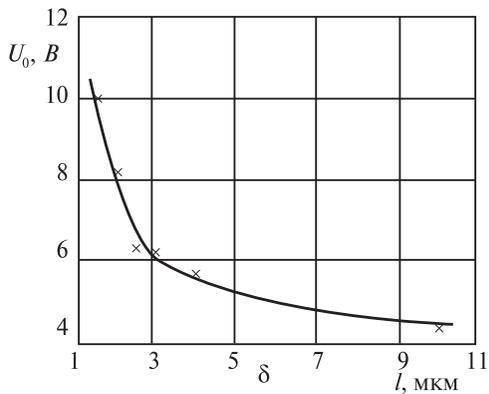


Рис. 15.23. Зависимость напряжения высвечивания от размера окна

Градуировочные графики позволили определить толщину окисла в контактных окнах после соответствующей технологической операции и производить отбраковку пластин с плохо вскрытыми контактными окнами.

#### *Визуализация закороченных плавающих затворов и нарушений металлизации*

Наличие сквозных дефектов окисла под формируемыми затворами МДП транзисторов приводит к замыканию затворов на подложку и выводу транзисторов из строя. Обнаружение закороченных затворов на ранней стадии изготовления дает возможность оценить масштаб поражения кристаллов ИС и принять решение либо о продолжении изготовления, либо об отбраковке продукции. В работах [16, 21, 24] для визуализации закороченных плавающих затворов в схемах перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства (ППЗУ) на МДП транзисторах с лавинной инжекцией зарядов (ЛИЗ) были использованы НЖК. Если имеются затворы, закороченные на кремниевую подложку, то их потенциал равен потенциалу подложки. Тогда все напряжение в этом месте приложено к слою НЖК и данный затвор высвечивается. На рис. 15.24 показан визуализированный с помощью НЖК закороченный затвор, а на рис. 15.25 видна закороченная на подложку цепочка затворов из поликристаллического кремния. Результаты визуализации закороченных затворов в готовых серийно выпускаемых микросхемах ПЗУ на МНОП элементах памяти отражены в работе [24].

НЖК были применены для обнаружения мест разрыва алюминиевых шин [24, 25]. Пластина готовится так же, как и для провер-

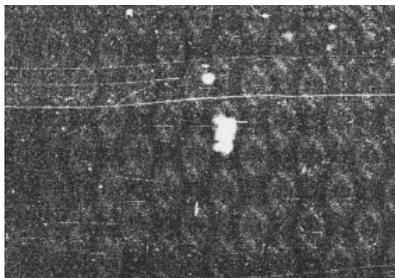


Рис. 15.24. Визуализация закороченного затвора, 120х

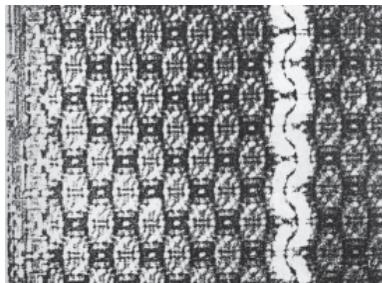


Рис. 15.25. Визуализация цепочки закороченных затворов, 120х

ки диэлектрических слоев. Подача потенциала осуществляется через подложку путем прямого смешения  $p$ - $n$ -переходов, соединенных с шинами. Все алюминиевые шины, на которые подается потенциал, визуализируются с помощью НЖК. Если в шине есть разрыв, то, начиная с места разрыва, шина остается темной (рис. 15.26).

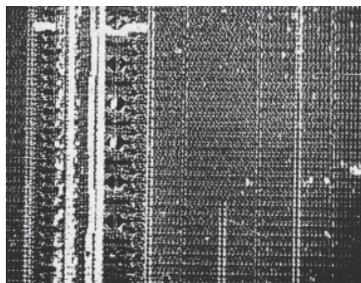


Рис. 15.26. Визуализация обрыва металлизации на одной из столбцовых шин в матрице ячейки памяти ИС с ЛИЗ МДПТ, 120х

### *Анализ дефектности готовых ИС с помощью НЖК*

Метод НЖК в диагностике ИС позволяет визуализировать места коротких замыканий (КЗ) и утечек в диэлектрических слоях, проверять работоспособность ИС, находить дефектные каскады, исследовать качество проводящих слоев (царапины, обрывы, замыкания).

Рассмотренные ранее случаи применения НЖК основаны на приложении к нему электрического поля извне через анализируемый элемент конструкции ИС. Для контроля работы ИС используются внутренние электрические поля, возникающие в результате подключения к контактным площадкам схем питающих напряжений и подачи на выводы схем тактовых сигналов. Впервые метод НЖК был предложен в работе [26] и существенно улучшен в дальнейшем [27–30, 24, 25]. Над элементами, находящимися под определенным потенциалом, возникают рассеянные электрические поля. За счет вертикальной составляющей поля в гомеотропном слое НЖК с  $\Delta\epsilon < 0$  происходит переориентация молекул, приводящая к визуализации электрического поля данного элемента. Исследование готовых ИС проводилось как на образцах, собранных в корпус, так и на пластинах с кристаллами микросхем. Для создания ЖКЯ над ИС, собранной в корпус, в качестве покровного стекла использовались столбики высотой до 4 мм с прозрачным электродом на стороне, обращенной к ИС. Одна из боковых сторон столбика была металлизирована для обеспечения контакта с прозрачным электродом. Визуализация постоянных электрических полей ИС возможна только в случае отсутствия пассивирующего защитного окисла. При наличии окисла использовались импульсные сигналы и переменное синусоидальное напряжение в диапазоне частот  $10^2$ – $10^4$  Гц. Для

визуализации электрических полей ИС использовались два способа [24]. Первый способ заключается в наблюдении локальных изменений ориентации в тонком слое НЖК, находящегося в контакте с действующей ИС, за счет электрических полей ИС. Во втором способе помимо напряжения, приложенного к анализируемым элементам ИС, подается напряжение к электроду на стеклянной пластине. Это позволяет усиливать или ослаблять электрическое поле ИС. В качестве примера приведем результаты исследования готовых ИС на МДТ транзисторах (ЛИЗ МДПТ) с ультрафиолетовым стиранием. Микросхема исследовалась в режиме записи. На рис. 15.27 в дешифраторе столбцов просветлялись шины питания и столбцовые шины в матрице в соответствии с выбранным адресом. Строчные шины закрыты толстым слоем окисла, поэтому в постоянном поле не визуализируются, но о выборе строки можно судить по свечению соответствующей шины в дешифраторе строк (короткая горизонтальная полоска на рис. 15.27). Путем перебора напряжений на адресных входах выбирались ячейки памяти, при этом обнаруживались обрывы металлизации (рис. 15.26). Проверялось также прохождение импульсов записи к ячейкам памяти. На рис. 15.28 показана зона ключей дешифратора столбцов (дефекты отсутствуют).

Видны светящиеся и несветящиеся шины, которые имеют контакт с диффузионными областями. Отсутствие свечения над от-

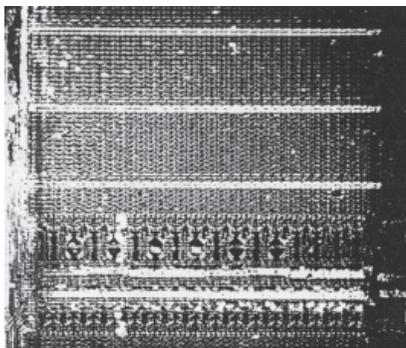


Рис. 15.27. Визуализация шин питания и столбцовых шин в матрице ячеек памяти, 50х

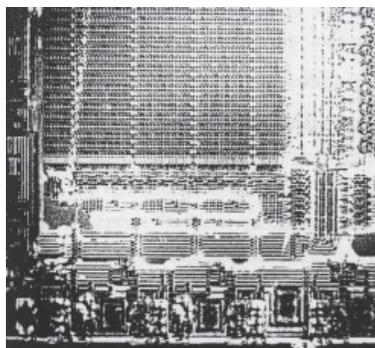


Рис. 15.28. Визуализация шин в зоне ключей дешифратора столбцов, 50х

дельными шинами свидетельствует о некачественном вскрытии контактных окон к диффузионным областям. Проверка работоспособности схемы на ЛИЗ МДПТ занимала 5–10 минут. Применение НЖК для визуализации потенциалов позволяет проверять функциональность ИС, определять местоположение внутренних узлов и визуально их исследовать. Метод прост и недорог и может быть использован в дополнение к другим.

Одна из задач анализа дефектных ИС — определение причины короткого замыкания электродов через изоляцию между собой и на подложку. Первым шагом при достижении этой цели является локализация КЗ. Для этих целей используют ряд методов, одним из которых является применение ЖК. Впервые применения нашли ХЖК. Использование НЖК для визуализации мест перегрева ИС позволило увеличить разрешающую способность [31, 32]. При переходе в изотропное состояние НЖК не обладает двулучепреломлением и потому в скрещенных поляроидах места перегрева кажутся темными (термооптический эффект). В приведенных ранее работах использовался неориентированный НЖК, что затрудняло измерения из-за наличия дисклинаций. В работе [33] было предложено использовать гомеотропно ориентированный НЖК в ячейке. При скрещенных поляроидах места локального перегрева высвечиваются при достижении температуры просветления. Сравнение методов НЖК и ХЖК при исследовании 40 кристаллов ИС, свидетельствует о том, что разрешающая способность НЖК (около 5 мкм) в 3–4 раза выше, чем для ХЖК. Чувствительность метода НЖК, примерно в 3 раза выше, чем для ХЖК и в 7 раз выше, чем для термоиндикаторных ХЖК пленок.

### **15.3. Визуализация электрических полей биологических объектов**

Изучение электрических полей биологических объектов является эффективным диагностическим средством в медицине и биологии. За последние полвека получил развитие метод газоразрядной визуализации (ГРВ). Он основан на регистрации изображения приповерхностных электрических полей объектов живой и неживой природы при разряде в конденсаторе. Изображения возникают при воздействии высоковольтных полей (десятки кВ) высокой частоты (десятки кГц) при возбуждении молекул воздуха или газа, сопровождаемого излучением фотонов при их возвращении из возбужденного состояния в невозбужденное [34]. Недостатком этого метода является наличие высоковольтных полей, которые могут

изменять поверхностные поля. В работе [35] описан новый оптический метод детектирования полей биологических объектов, основанный на электрооптических эффектах в НЖК. Объектом исследования был человеческий волос диаметром около 10 мкм, помещенный в полость электрооптической ЖКЯ с толщиной слоя НЖК 80 мкм. Малые толщины слоя НЖК позволяют исследовать электрический рельеф на поверхности объектов при малых напряжениях внешнего электрического поля. На поверхности подложек задавалась планарная ориентация НЖК. ЖКЯ заполнялась материалом ЖК-1289 ( $\Delta n = 0,169$ ;  $\Delta \epsilon > 0$ ) разработки НИИОПиК. Удельная электропроводность составляла величину  $\approx 1 \cdot 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Исследовались три ЖКЯ, в каждую помещалось по три образца волоса параллельно направлению ориентации. Волосы с помощью прокладок размещались в средней части ячейки. Они принадлежали молодому человеку, не были ни окрашены, ни подвержены болезни. Измерительная установка содержала поляризационный микроскоп с исследуемой ЖКЯ на рабочем столе и цифровой камерой, генератор низкочастотного напряжения и вольтметр. Наблюдения производились в режиме на просвет; регистрация статических и переходных динамических процессов переориентации слоя НЖК осуществлялась цифровой фотокамерой. В отсутствие внешнего поля в окрестности волоса наблюдалась небольшая деформация слоев НЖК, вызванная влиянием поверхности на ориентацию прилегающих слоев. Выявлялись дефекты рельефа поверхности волоса и его формы (рис. 15.29).

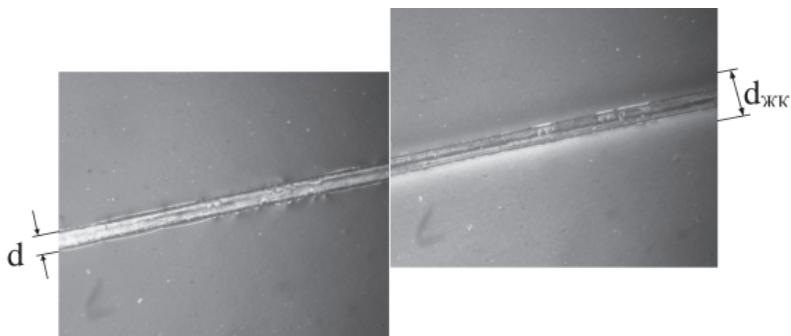


Рис. 15.29. Изображение деформированного слоя НЖК в одной из ЖКЯ в зоне волоса диаметром 10 мкм через день после срезания, наблюдаемое в поляризованный микроскоп: а —  $U=0$  В; б —  $U=10$  В,  $f=1$  Гц,  $d_{жкк}/d=3,25 \pm 0,15$

Диаметр зоны деформации НЖК  $d_{\text{жк}}$  измерялся и сопоставлялся с диаметром волоса  $d$ . Область деформации  $d_{\text{жк}}$  в отсутствии внешнего поля ( $U=0$ ) составляла в среднем величину  $1,3d$ . При подаче напряжения 2В в диапазоне частот 1–10 Гц область деформации слоя НЖК вблизи волоса увеличивалась за доли секунды [36]. С увеличением напряжения область деформации плавно возрастала. Измерения проводились для напряжения 10 В на частоте 1 Гц. При этих условиях более четко наблюдалась граница области деформации НЖК. В начальный момент времени область деформации  $d_{\text{жк}}$  для свежесрезанного («живого») волоса имела величину  $3,5d$  (рис. 15.29 б). Исследовалась зависимость области деформации ЖК ( $d_{\text{жк}}$ ) от времени. Обобщенные результаты исследований для трех ячеек приведены на рис. 15.30. Со временем величина  $d_{\text{жк}}$  плавно уменьшалась и на 9-й день после срезания достигала в среднем величины  $2,3d$ . Такую же величину  $d_{\text{жк}}$  имели образцы после года хранения (рис. 15.30, кривая 4) или после температурного воздействия в  $120^{\circ}\text{C}$ , убивающего живую ткань (рис. 15.30, кривая 4) [36, 37]. После 9-го дня дальнейшее уменьшение деформированной зоны не зарегистрировано.

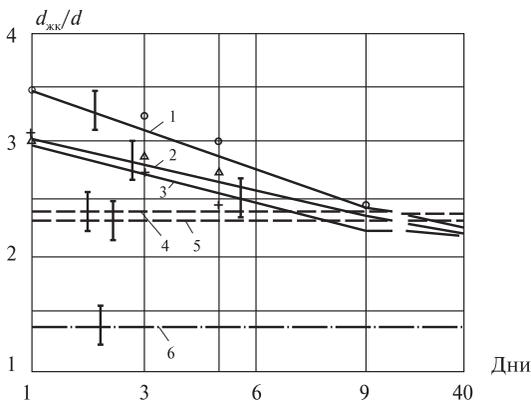


Рис. 15.30. Результаты исследований зависимости деформированных областей ЖК ( $d_{\text{жк}}/d$ ) при  $U=10$  В,  $f=1$  Гц: 1, 2, 3 — через день после срезания; 4 — через год после срезания волоса; 5 — после температурного воздействия на образец в  $120^{\circ}\text{C}$ ; 6 — в отсутствии электрического поля; деформация вызвана воздействием поверхности образца

Полученные результаты были сопоставлены с результатами исследования интенсивности свечения волоса методом ГРВ, выполненные под руководством профессора К.Г. Короткова (СПбГУ ИТМО). Изменение интенсивности свечения волоса человека во времени для двух образцов после момента их срезания с головы испытуемых показаны на рис. 15.31. Характер зависимостей, представленных на рис. 15.30 и 15.31, совпадает.

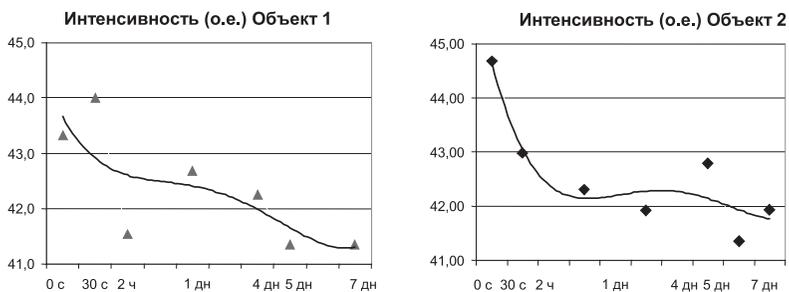


Рис. 15.31. Изменение интенсивности свечения волоса человека во времени для двух образцов после их срезания с головы испытуемых. Получено методом ГРВ [35]

Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о возможности применения ЖК для визуализации биологических полей объектов и их динамики во времени. При этом ЖК ведут себя как пространственно-временной модулятор света, осуществляя локальную модуляцию излучения в реальном масштабе времени. Особенностью изучаемого биологического объекта является наличие собственного электрического поля. Возникающая зона деформации НЖК в окрестности волоса вызвана суперпозицией поля биологического объекта и внешнего электрического поля.

Высокая чувствительность и пространственная разрешающая способность, экспрессность, неразрушающее воздействие на объект, простота и низкая стоимость явились основанием для применения метода НЖК в изучении приповерхностных электрических полей биологических объектов. Преимущество предложенного метода состоит в использовании низковольтных электрооптических эффектов в НЖК, не вызывающих заметных изменений свойств поверхности изучаемых объектов. Метод НЖК позволяет определять значения соб-

ственных полей биологических объектов. Его применение для изучения электрических полей живых и неживых объектов малых размеров открывает возможности для использования в биологии и медицине.

### Литература к главе 15

1. *Аэро Э.Л.* Электро- и магнитооптические эффекты в криволинейных областях, заполненных НЖК // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 79. Вып. 2. С. 320–328.
2. *Чигринов В.Г.* Расчет распределения директора в слое ЖК, находящегося в неоднородном электрическом поле // В.сб. Жидкие кристаллы. Иваново. 1977. С. 51–88.
3. *Невская Г.Е., Чигринов В.Г., Дзенис С.Ф., Коркишко Т.В.* Визуализация пространственно неоднородных электрических полей в диэлектрических слоях с помощью нематических жидких кристаллов // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 66. Вып. 1. С. 145–149.
4. *Chigrinov V.* Electrooptics of a NLC in a spatially nonuniform field // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1990. Vol. 179. P. 71–91.
5. *Чигринов В.Г.* Ориентационные эффекты в НЖК в электрическом и магнитном полях // Кристаллография. 1982. Вып. 2. С. 404–429.
6. *Невская Г.Е., Коркишко Т.В., Парфенов А.В., Чигринов В.Г.* Визуализация дефектов в диэлектрических покрытиях с помощью жидких кристаллов // М.: ФИАН. 1987. 35с. (Препринт № 292).
7. *Чигринов В.Г., Коркишко Т.В., Невская Г.Е., Рубцов А.Е.* Оптимизация метода НЖК для дефектоскопии твердых поверхностей в электрическом поле // Обзоры по электронной технике. Серия 8. 1989. Вып. 2(1439). 51 с.
8. *Невская Г.Е., Чигринов В.Г., Тихомиров И.В., Дзенис С.Ф., Береснев Г.А.* Электрофизика структуры жидкий кристалл — диэлектрик — полупроводник // Известия АН СССР. Серия физ. 1989. Т. 33. № 10. С. 2016–2029.
9. *Zakzouk A.K., Eccleston W., Stuart R.A.* Polarity dependent oxide defects using liquid crystals // Sol. st. electron. 1976. Vol. 19. № 2 P. 133–135.
10. *Лужин В.А., Невская Г.Е.* Обнаружение дефектов в изолирующем слое окисла на кремнии с помощью жидких кристаллов // В сб. Электронное полупроводниковое приборостроение. Новосибирск. 1980. С. 132–137.
11. *Невская Г.Е., Потапов Н.П., Рубцов А.Е.* Контроль дефектности диэлектрических слоев с помощью жидких кристаллов // В сб. Полупроводниковая тензометрия. Новосибирск. 1983. С. 46–47.
12. *Колкер Б.И., Невская Г.Е., Рубцов А.Е.* Обнаружении монополярных дефектов в пленках SiO<sub>2</sub> // Микроэлектроника. Сер.3. 1985. Вып. 2. С. 40–41.
13. *Гриценко Н.И., Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Мошель Н.В.* Анализ дефектов тонких диэлектрических пленок на проводящих подложках // Микроэлектроника. 1984. Т. 13. № 5. С. 468–471.

14. *Невская Г.Е., Тихомиров И.В.* Влияние полярности напряжения на электрофизические процессы в структуре Si–SiO<sub>2</sub>-ЖК //ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 3. С. 210–212.

15. *Невская Г.Е., Макарова О.В., Балакирев О.А., Потанов Н.П.* Обнаружение электрически активных дефектов поверхности кремниевых пластин // Поверхность, физика, химия, механика. 1989. № 3. С. 22–30.

16. *Chigrinov V.G., Nevskaya G.E.* Electro-optic LC methods for non-destructive testing of solid surfaces. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1991. Vol. 209. P. 9–18.

17. *Думаревский Ю.Д., Ковтанюк Н.Ф., Лапшин А.Н., Освенский В.Б., Шифрин С.С.* Визуализация дефектов в полупроводниковых монокристаллах структурами МДП-ЖК // В сб. Применение жидких кристаллов в неразрушающем контроле оптических материалов и изделий. Методические рекомендации. Под ред. М.Г. Томилина. Изд. ГОИ им. С.И. Вавилова. Л., 1987. С. 43–56.

18. *Tikhomirova N.A., Ginsberg A.V.* NLC drop's behavior on the anisotropic surface // Advances in LC research and application. Pergamon Press, Oxford-Budapest. 1980. P. 651–655.

19. *Tikhomirova N.A., Dontsova L.I., Pikin S.A.* Electrodifussion process in FLC sandwiches // Proceed of V-th ICSC on LC. Odessa. 1983. Vol. 1. Part. 2. P. 189.

20. *Рубцов А.Е., Невская Г.Е.* Изучение состава примесей и дефектности фоторезиста ФП-383 // Микроэлектроника. 1988. № 4. С. 67–71.

21. *Невская Г.Е., Рубцов А.Е., Березиков Д.Д.* Диагностика дефектов ИС с помощью В-эффекта в НЖК // Электронная техника. Сер. 8. 1984. Вып. 4. С. 28–32.

22. *Невская Г.Е.* Определение толщины остаточного окисла в контактных окнах ИС // В сб. Полупроводниковая тензометрия. Новосибирск. 1986. С. 54–56.

23. *Невская Г.Е.* Применение НЖК для определения толщины остаточного окисла в контактных окнах ИС // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. Вып. 5. С. 465–468.

24. *Невская Г.Е., Рубцов А.Е., Березиков Д.Д.* Применение полевого эффекта в НЖК для анализа ИС // В сб. Полупроводниковая тензометрия. Новосибирск. 1985. С. 72–81.

25. *Гриценко Н.И., Добролеж С.А., Клименко А.С., Коваль Ю.Д., Мошель Н.В.* НЖК в диагностике изделий тонкопленочной технологии // Электронная техника. Серия 8. 1987. Вып. 5. С. 21–26.

26. *Channin D.J.* LC technique for observing integrated –circuit operation // IEEE Trans. Electron Dev. 1974. ED-21. № 10. P. 650–652.

27. *Burns D.J.* Microcircuit analisis techniques using field-effect LCs // IEEE Trans. Electron. Dev. 1979. ED-26. № 1. P. 90–95.

28. *Березиков Д.Д., Лукин В.А., Невская Г.Е.* Обнаружение дефектов в ИС с применением ЖК // В сб. Электронное и полупроводниковое приборостроение. Новосибирск. 1980. С. 184–187.

29. *Гриценко Н.И., Коваль Ю.Д., Маркова О.З., Мошель Н.В.* Применение нематических жидких кристаллов для визуализации рассеянных полей изделий микроэлектроники // Микроэлектроника. 1980. Т. 9. № 5. С. 444–449.
30. *Гриценко Н.И., Кучеев С.И., Мошель Н.В.* Использование НЖК для неразрушающего контроля изделий микроэлектроники // Известия АН СССР. Серия физ. 1989. Т. 33. № 10. С. 2030–2045.
31. *Sinnadurai F.N.* A technique for the measurement of hot spots and iso-term profiles at the surfaces of the elements of hybrid microcircuits // Electro-comp. sci. techn. 1980. Vol. 6. P. 177–183.
32. *Aszodi G.* High resolution thermal mapping of microcircuits using NLCs // Sol. St. Electron. 1981. Vol. 24. № 12. P. 1127–1133.
33. *Невская Г.Е., Болдарев А.М., Рубцова О.Ю.* Визуализация мест локального перегрева в ИС с помощью НЖК // Электронная техника. Серия 8. 1989. Вып. 1. С. 170–172.
34. *Коротков К.Г.* Основы ГРВ биоэлектрографии. СПб: СПбГИТМО (ТУ). 2001. 360 с.
35. *Томилини М.Г., Иванова Н.Л., Коротков К.Г.* Оптические исследования волоса человека с помощью ЖК // Труды VII межд. конференции «Прикладная оптика 2006», СПб, 2006. Т. 4. С. 131–134.
36. *Tomilin M.G.* How to display biological objects E-field // SID-ME Chapter Spring Meeting, March 13–14, 2008. Abbe Center, Beutenberg Campus, Jena, Germany.
37. *Томилини М.Г.* Новый оптический метод изучения электрических полей биологических объектов // Журнал «ЖК и их практическое использование». Иваново. 2008. Вып. 4. С. 81–85.

## *Глава 16*

### **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Исследование распределения температур на поверхности является актуальной задачей в разных областях науки и техники. Особый интерес эта проблема представляет для медицины, материаловедения и приборостроения. ЖК материалы нашли применение для исследования аэродинамического нагрева и других теплофизических эффектов; визуализации невидимых ИК и СВЧ-излучений; определения зон перегрева в радио- и электрооборудовании; обнаружения зон утечки тепла; диагностики воспалительных очагов в медицине и ветеринарии, а также изготовления медицинских и бытовых термометров. Жидкие кристаллы также используются для визуализации акустических полей. В этом случае воздействие на ЖК осуществляется как за счет изменения температуры среды, так и за счет деформации.

Среди многих существующих методов изучения тепловых полей метод ЖК имеет ряд преимуществ: возможность получения панорамных (двумерных) изображений теплового поля, регистрация статических и динамических изображений, относительно высокая чувствительность и разрешающая способность, простота и дешевизна метода. ЖК используют как для контактных, так и для дистанционных измерений температуры. Наибольшее применение для изучения тепловых полей нашли ХЖК и в некоторых случаях СЖК. Первое сообщение о возможностях применения ХЖК для термодиагностики появилось в 1964 г. [1–3], и дальнейшее развитие это направление получило в основном в работах отечественных ученых [4, 5].

## 16.1. Визуализация тепловых полей с помощью ХЖК

Для измерения температуры с помощью ЖК используется эффект селективного рассеяния света периодической структурой холестерика. Они позволяют получать цветное панорамное изображение теплового поля исследуемой поверхности и по аномальному тепловыделению визуализировать различные дефекты. Высокая чувствительность ХЖК к небольшим изменениям температуры, их быстродействие и способность работать в широком диапазоне температур позволяют их использовать в качестве термоиндикаторов для измерений полей температур. Если тонкий слой холестерика помещен в тепловое поле, которое не перегревает его и не переводит в изотропную фазу, то по-разному нагретые его участки будут иметь разный цвет, или если ХЖК освещать монохроматическим светом, то — разную интенсивность. Зная заранее путем калибровки, какой температуре соответствует тот или иной цвет (или интенсивность), можно построить изотермическую карту изучаемого теплового поля. Жидкокристаллическая термография с применением свободных (некапсулированных) холестериков имеет довольно продолжительную историю [3]. Все, что было предложено для свободных ХЖК, в основном сохраняется и в случае применения ЖК композитов [4, 5].

В основе метода ХЖК лежит зависимость шага холестерической спирали  $p$  от температуры. Если шаг спирали порядка длины волны падающего света, то с изменением температуры холестерик будет менять цвет. Длина волны света  $\lambda_0$ , имеющего при интерференции максимальную интенсивность, определяется выражением:

$$\lambda_0 = 2\bar{n} \cdot d \cdot \sin\theta, \quad (16.1)$$

где  $d = p/2$  — период решетки;  $\theta$  — угол между падающим лучом и холестерической плоскостью,  $\bar{n}$  — показатель преломления вещества.

В реальных образцах холестериков имеется некоторая мозаичность — текстура состоит из блоков, в каждом из которых холестерические плоскости повернуты относительно друг друга и плоскости образца. В этом случае длина волны селективного рассеяния связана с углом падения  $\theta_n$  и углом наблюдения  $\theta_n$  и имеет вид:

$$\lambda_0 = np \cos \left\{ \frac{1}{2} \left[ \arcsin \left( \frac{\sin \theta_n}{\bar{n}} \right) + \arcsin \left( \frac{\sin \theta_n}{\bar{n}} \right) \right] \right\}. \quad (16.2)$$

У большинства эфиров холестерина шаг спирали уменьшается с ростом температуры ( $dp/dt < 0$ ), что приводит к смещению  $\lambda_0$  в сторону более коротких длин волн. В немато-холестерических смесях можно наблюдать все три типа зависимости шага от температуры ( $dp/dt = 0$ ,  $dp/dt < 0$ ,  $dp/dt > 0$ ) [5]. Известны смеси холестериков работающие в интервале температур  $-20 + 285^\circ\text{C}$ . Ширина температурного интервала  $\Delta T$  селективного отражения видимого света может изменяться от  $0,1$  до  $100^\circ\text{C}$ . Величина  $\Delta T$  определяет термочувствительность холестерика; применение смесей с  $\Delta T \approx 0,1-0,8$  К. позволяет регистрировать изменения температур до сотых долей градуса [5]. Термочувствительность ХЖК зависит от природы соединений. Чаще всего применяют эфиры холестерина, на основе которых составляется большое количество композиций с различной термочувствительностью в широком диапазоне температур. Особое развитие получили хиральные мезогенные вещества, молекулы которых не содержат холестерильных или каких-либо других стероидных колец — холестерогены.

При использовании ХЖК для термографии необходимо приблизительно знать диапазон температур, в котором предстоит работать. Слой ХЖК не должен нарушать тепловое поле исследуемой поверхности. Поэтому теплоемкость исследуемой поверхности должна быть больше теплоемкости ЖК покрытия. Скорость изменения теплового поля должна быть меньше постоянной времени используемых для термографии материалов. Оптимальная толщина покрытия составляет  $20-30$  мкм. Предварительно на поверхность наносится тонкий чернящий слой. Это связано с тем, что при падении света на слой ХЖК, он разделяется на две составляющие, одна из которых при определенной температуре селективно отражается, другая — проходит без изменения. Именно эта часть поглощается на границе ХЖК с поверхностью. В противном случае понижается контраст изображения. Необходимость чернения вызывает определенные неудобства. Другим недостатком ХЖК термоиндикаторов этого типа является заметная нестабильность их цветотемпературных характеристик во времени: под влиянием кислорода и УФ-излучения они окисляются. В аэродинамических экспериментах ЖК покрытие подвержено одновременному воздействию температуры и поверхностного трения. Чтобы защитить ЖК от механического сдвига, в них добавляется небольшое количество лака или клея. Более надежным способом защиты ЖК от механического воздействия и от окисления является капсулирование ЖК в полимерную матрицу [6]. Выбор полимерной матрицы и метод капсулирования опре-

деляются условиями эксперимента, в котором они используются. Материал, получаемый в результате капсулирования ЖК, может быть получен или в виде пленки, или в виде дисперсии отдельных капсул в какой-либо изотропной среде. При использовании ЖК, капсулированных в сферические капсулы, в качестве трассеров в жидкой среде возможно одновременное измерение трехмерных полей температуры и скорости [7]. Полимерная пленка с равномерно распределенными по ее толщине включениями ХЖК правильной почти сферической формы характеризуется очень узким и равномерным распределением капсул по размерам, отсутствием ликвации и достаточно высоким коэффициентом селективного отражения. В зависимости от типа полимера и технологии капсулирования пленки могут быть гидрофобными или гидрофильными. Выбор типа пленки определяется свойствами среды, в которой они должны применяться. Наибольшее распространение получили гидрофильные пленки на основе поливинилового спирта (ПВС) и гидрофобные на поливинилацетатной основе (ПВА).

Основные характеристики термоиндикаторных пленок приведены в таблице 16.1.

Таблица 16.1

Основные характеристики пленки:

оптимальная толщина пленки, мкм	20-30
рабочий температурный диапазон, °С	от -10 до +150
пороговая чувствительность, Вт/см <sup>2</sup>	10 <sup>-4</sup>
пространственное разрешение, лин/мм	5-7
постоянная времени, с	0,04-0,3
количество циклов использования	более 5000
временной ресурс, год	более 5
пленки нетоксичны	

Сравнительный анализ свойств ХЖК термоиндикаторов в чистом виде и в полимерной матрице приведен в таблице 16.2 [5].

Пленочные термоиндикаторы имеют меньшую чувствительность и меньший контраст цветов. Однако большая стабильность их свойств, удобство в использовании и достаточная для многих приложений чувствительность позволяют успешно их применять. Перед использованием термоиндикаторов определяют их цветотемпературные характеристики. Для этого проводится тарировка, которая в зависимости от необходимой точности измерений, может быть либо визуальной, либо с использованием спектральных методов.

**Характеристики термоиндикаторов с холестериками  
в свободном состоянии и капсулированными**

Тип термоиндикатора	Рабочий температурный диапазон, °С	Пороговая чувствительность, Вт/см <sup>2</sup>	Пространственное разрешение мм <sup>-1</sup>	Время запаздывания, мс	Временной ресурс, мес.
свободные ХЖК ХЖК+ ПВА	-40...+285	10 <sup>-9</sup>	10	150–200	3–4
	-10...+150	10 <sup>-4</sup>	5–7	200–300	Более 5 лет

При измерениях с помощью термоиндикаторной пленки на исследуемую поверхность наносится слой глицерина или теплопроводного смазочного материала, на который помещается пленка.

Изображение температурного поля объекта с помощью ХЖК можно получить неконтактным способом. В этом случае регистрирующий слой наносится на специальный экран. Пороговая чувствительность и пространственное разрешение таких визуализаторов определяются, в основном, толщиной экрана и температурной чувствительностью слоя ХЖК. Для повышения чувствительности экран иногда термостатируют. Узкотемпературные смеси ХЖК при толщине около 4мкм и при термостатировании имеют хорошие эксплуатационные характеристики: чувствительность — 10<sup>-6</sup> Дж/см<sup>2</sup> и разрешающую способность при регистрации импульсных полей ( $t = 10^{-4}$ с) до 100 лин/мм [5]. В настоящее время также используются ЖК материалы с двумя температурными зонами, на базе двух и более узкополосных ЖК композитов и материалы с «памятью».

Для измерения распределения температуры необходимо измерить длину волны, соответствующую пику интенсивности селективно отраженного света в каждой точке поверхности. Предназначенные для этой цели спектральные приборы непрактичны в условиях аэродинамического эксперимента. Используя для регистрации панорамного изображения видеозапись или ввод изображения в компьютер, задачу спектрального анализа с целью измерения температуры можно свести к анализу и цифровой обработке изображений. В зависимости от оптической схемы регистрации и калибровки все существующие методы измерения температур с помощью ЖК мож-

но разделить на две группы: методы, использующие регистрацию сигнала интенсивности селективного отражения монохроматического света; и методы, использующие регистрацию и обработку полного цветового телевизионного сигнала [8].

## 16.2. Сметические ЖК для термооптической записи информации

Сметические ЖК А нашли применение для регистрации оптической информации при воздействии на них тепловых полей (термозапись). Первые сообщения об использовании сметиков А для термозаписи с длительной памятью появились в работе [9]. Сметик А обладает рядом преимуществ по сравнению с другими ЖК: длительной памятью и возможностью быстрого стирания локальной информации. Для термозаписи использовался тонкий ориентированный плоский слой СЖК, находящийся между двумя подложками, покрытыми токопроводящим слоем  $\text{SnO}_2$ . Температура сметика была близка к температуре фазового перехода в нематическую фазу, что позволяло повысить пороговую чувствительность. Выбор ЖК материала с нематической фазой вызван тем, что она необходима для создания ориентированной структуры сметика. При прохождении лазерного луча через ячейку происходит нагревание сметика и его переход в изотропную фазу, что фиксируется оптически с помощью поляризационного микроскопа. Стирание информации производится переменным электрическим или тепловым полем. В работах [9, 10] приведены результаты исследования чувствительности, пространственного разрешения, динамического диапазона и контраста изображения сметика А. Величина пространственного разрешения для выбранных ЖК материалов примерно  $100 \text{ мкм}^{-1}$ , контраст изображения составлял 20:1, память — не менее года при условии хранения образца в сметической фазе [9]. Пороговая чувствительность тем выше, чем меньше диапазон существования нематической фазы и для исследуемых веществ имеет величину в интервале от  $1,55 \cdot 10^{-1}$  до  $4,75 \cdot 10^{-2} \text{ Дж см}^{-2}$ , динамический диапазон (отношение предельно допустимой плотности излучения к величине пороговой чувствительности) от 1,30 до 1,07 для разных веществ [10].

В работе [11] представлены результаты применения хиральной сегнетоэлектрической  $\text{C}^*$ -фазы для термооптической записи. Запись осуществлялась на ориентированные прозрачные в видимом свете текстуры сметиков. В результате их локального нагрева сметик

переходит в изотропную фазу и после быстрого охлаждения, происходящего после экспозиции, на фоне ориентируемой текстуры появляются рассеивающие свет участки. Возможно проецирование изображения на экран. Стирание изображения осуществляется приложением электрического поля или нагреванием образца до изотропного состояния с последующим медленным охлаждением до фазы С\*. Для длин волны лазерного излучения 0,69 и 1,05 мкм пороговая чувствительность  $\approx 1-10^{-1}$  Дж см<sup>-2</sup> в зависимости от длины волны записывающего излучения, динамический диапазон — примерно 10<sup>2</sup>, пространственное разрешение — 20 мм<sup>-1</sup>. Термозапись на СЖК может быть использована в различных устройствах отображения информации.

### **16.3 Результаты экспериментальных исследований тепловых полей с помощью ХЖК**

#### *Медицинская термография*

ЖК термография в сочетании с другими методами диагностики расширяет арсенал современных диагностических методов в медицине. Различные патологические процессы в организме оказывают влияние на распределение температуры на коже человека. Как правило, при патологических процессах нарушается симметрия теплового поля. Это обстоятельство лежит в основе контактной термографии. Простота, доступность и дешевизна метода термографии на основе ХЖК обеспечили возможность его применение в различных областях медицины. Можно выделить четыре главных направления: диагностика злокачественных образований, воспалительные процессы, нарушение кровообращения и невралгия, включающая болевые синдромы. Использование свободных ХЖК имеет неудобства, связанные с необходимостью чернения поверхности кожи на теле человека для усиления контраста цветового изображения. Поэтому большее применение приобрели термоиндикаторные пленки. Были разработаны пленки, отвечающие медицинским требованиям для различных диапазонов температур. Визуальный анализ термограмм позволяет определить расположение, размеры, форму, структуру очагов повышенной температуры и температурный перепад благодаря высокой температурной чувствительности ( $\Delta T/\Delta \lambda = 0,01^\circ\text{C}/\text{nm}$ ).

Детальные сведения о применении ХЖК в медицинской термографии изложены в многочисленных публикациях, анализ которых проведен в работе [12]. Примеры визуализации теплового поля человека приведены на рис. 16.1.

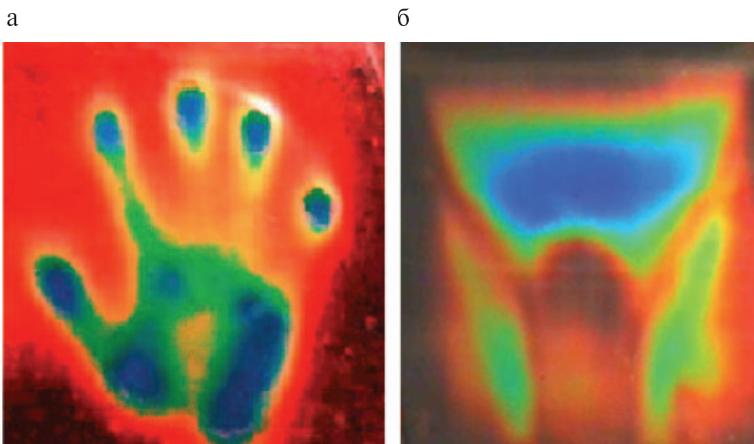


Рис. 16.1. Визуализация теплового поля человека: а — рука; б — молочная железа при воспалительном процессе.

*Фото Г. М. Жарковой*

Получили также распространение медицинские и бытовые термометры на основе ХЖК. Они, хотя и не обладают большой точностью, удобны в эксплуатации и безопасны, поскольку не содержат ртути и стекла.

#### *Дефектоскопия материалов и изделий*

Если на исследуемую поверхность материала нанести слой ХЖК и в объекте создать стационарный тепловой поток, нормальный к плоскости слоя холестерика, то в местах дефектов вследствие неоднородности коэффициента теплопроводности будут наблюдаться изменения картины теплового поля, регистрируемые слоем ХЖК. С помощью этого метода были исследованы на однородность крупногабаритные детали самолета «Боинг». Тепловой поток в этом случае создавался воздушным нагревом и охлаждением. В других случаях его задают с помощью однородно размещенных проводников, либо пропуская ток через образец. В последнем случае метод явился весьма удобным для контроля качества спаев листов металла или пластика и однородности термоизоляции диэлектриков [12].

ХЖК нашли применение для выявления мест локального перегрева в изделиях микроэлектроники [13, 14]. Локальный перегрев и температурные градиенты возникают в интегральных схемах при

наличии в них коротких замыканий, токов утечки и других повреждений. Минимальная мощность, необходимая для регистрации дефектов в ИС с многоуровневой разводкой составила 30 мВт при решающей способности около 20 мкм [15]. При анализе ИС с целью выяснения причин отказа необходимо знать места расположения дефектов, что успешно позволяют сделать ХЖК.

#### 16.4. ХЖК в аэродинамических исследованиях

Термоиндикаторные пленки на основе холестериков успешно применяются при испытании образцов авиационной и ракетной техники и их элементов. В аэродинамике метод ХЖК первым использовал Клейн [16], основные результаты его применения рассмотрены в работе [17]. Применение систем цифровой обработки видео изображений ЖК-термограмм [18–19] создало предпосылки для решения задачи ЖК термометрии на качественно новом уровне.

*Применение ХЖК термоиндикаторов для визуализации структуры дозвуковых течений*

При изменении структуры течения на дозвуковых режимах на поверхности моделей реализуются малые градиенты температур, для визуализации которых использовались ЖК термоиндикаторы с высокой температурной чувствительностью. Имеющиеся в литературе данные по визуализации структуры течения при низких дозвуковых скоростях выполнены с помощью методов шелковинок или сажа-масляной пленки и преимущественно для подветренной стороны.

Структуры течения вблизи поверхности прямого и стреловидного крыльев летальных аппаратов на наветренной стороне в дозвуковом потоке изучались с использованием ХЖК [20]. Полученные авторами результаты показывают, что при повышенной внешней турбулентности возможно появление организованных продольных вихревых структур. На рис. 16.2 приведены результаты визуализации структуры течения в пограничном слое на нижней половине наветренной поверхности крыла при больших закритических углах атаки  $\alpha$  в потоке за сеткой с уровнем турбулентности 1%. На первом кадре приведена картина визуализации при угле атаки  $0^\circ$ .

Сетка изменила характеристики набегающего потока, а крыло явилось индикатором изменения самих этих характеристик и их влияния. Изменяя расстояние до сетки или угол атаки, можно наблюдать в реальном времени изменение структуры течения в пограничном слое на поверхности крыла. Без сетки и при нулевом угле

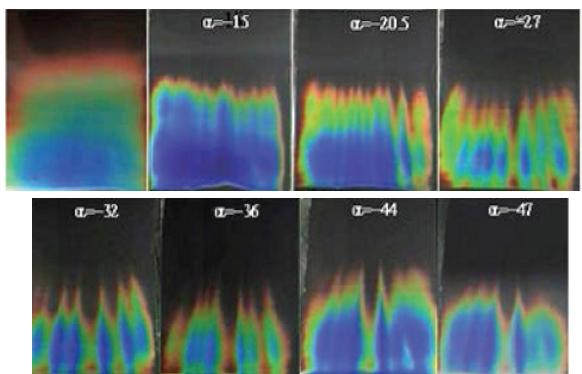


Рис. 16.2. Визуализация потока на наветренной поверхности крыла. Число Рейнольдса —  $1,76 \cdot 10^5$ ; уровень турбулентности 1%. [20]

атаки продольные структуры не наблюдались из-за слабого теплового эффекта или их отсутствия. С сеткой структуры появляются при углах близких к критическому  $18^\circ$ , и с увеличением угла их поперечный масштаб увеличивается.

Изучение трехмерной вихревой структуры отрывных течений и влияния на нее параметров внешнего потока является другой актуальной задачей, цель которой — поиск и разработка новых способов управления обтеканием. На рис. 16.3 приведено распределение

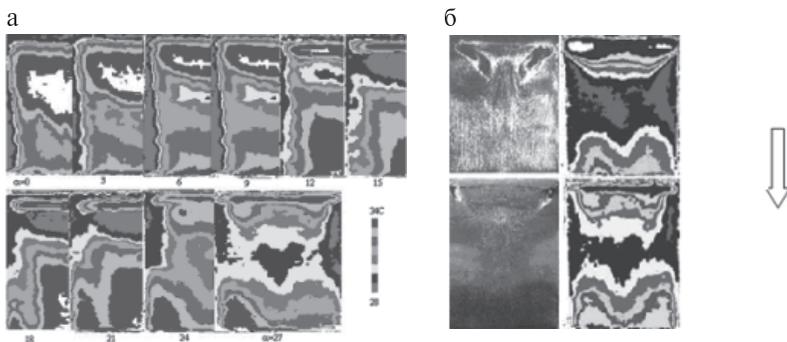


Рис. 16.3. Распределение температур на наветренной стороне крыла, полученное с помощью ЖК визуализации, в зависимости от угла атаки от малых углов до закритических (а) и с помощью масляной пленки (б) [20]

температур, полученное с помощью ЖК визуализации, в зависимости от угла атаки от малых углов до закритических.

Высокая чувствительность ХЖК композитов позволяет использовать их для визуализации аэродинамического нагрева, в частности при изучении перехода ламинарного течения в турбулентное. При этом переходе резко усиливаются процессы теплообмена и на поверхности модели возникает градиент температур, визуализируемый ХЖК.

#### *Применение ЖК термоиндикаторов для визуализации структуры гиперзвуковых течений*

Методика использования термоиндикаторов в экспериментах на до- и гиперзвуковых режимах существенно отличается. Поскольку на гиперзвуке толщина ЖК термоиндикатора должна быть значительно меньше, термоиндикаторный слой наносится напылением [21–23]. Визуализация, полученная методом ХЖК, позволяет выбрать места установки дискретных датчиков, контролировать ход эксперимента, например, состояние модели и наличие дефектов на поверхности, точность сборки деталей, положение модели в пространстве, наличие утечек тепла и т. д. Эти факторы непосредственно влияют на погрешность получаемых экспериментальных данных и при измерении только дискретными методами остаются неочевидными. Ниже приведены примеры визуализации поля температур в процессе нагрева разных моделей (рис. 16.4).

ХЖК термоиндикаторы применяются для измерения тепловых потоков в задачах обтекания тел высокоскоростным потоком. Разработаны методы стационарного и нестационарного теплового потока [17]. ЖК термография успешно применена для качественной и количественной диагностики пристенных течений в широком диа-

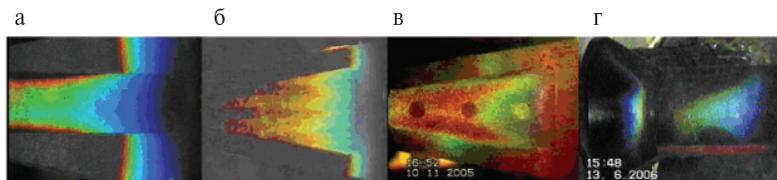


Рис. 16.4. Визуализация полей температур: а — при тангенциальном распространении теплового поля; б — при наличии вихрей, индуцированных шероховатостями; в — объемного потока, характеризующего качество модели; г — на коническом сопле при  $M = 21$  [21]

пазоне скоростей. Уникальные оптические свойства ХЖК, усовершенствованные экспериментальные методы и цифровая обработка видео изображений позволяют осуществить панорамную визуализацию и измерить распределения температур на поверхности. Сравнение данных, полученных методом ЖК термографии, с данными измерений, полученных помощью традиционных точечных датчиков, подтверждает их высокую информативность и достаточную точность в различных аэродинамических экспериментах. Разработанные методики применимы для широкого круга задач теплообмена и исследования тонкой структуры течений.

### *Визуализация излучений*

ХЖК могут применяться как дистанционно располагаемые регистрирующие среды, используемые для визуализации ИК, СВЧ и лазерных излучений. Необходимость визуализации ИК в основном связана с установлением мест локализации излучения лазера, анализом модовой структуры, измерения распределения мощности излучения, а также дефектности структуры материалов. На основе свободных слоев ХЖК, а также термоиндикаторных пленок были созданы простейшие индикаторы ИК излучений [24–27]. Прибор с термостатированием для визуализации объекта в ИК диапазоне схематично показан на рис. 16.5.

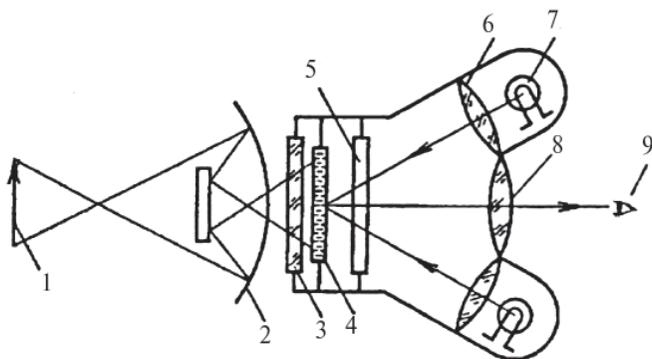


Рис. 16.5. Прибор для визуализации объекта в ИК диапазоне: 1 — объект; 2 — зеркально-линзовая система; 3 — окно, прозрачное для ИК излучения; 4 — пленка ХЖК; 7 — осветитель; 9 — регистратор [27]

Изображение объекта 1 с помощью инфракрасного зеркального объектива 2 фокусируется на поглощающий слой ЖК экрана 4. Экран термостатируется. Регистрируемое излучение попадает в камеру через входное ИК-окно 3. С противоположной стороны ЖК экран подсвечивается и разогревается через выходное окно 5 лампами 7. Конденсоры 6 выравнивают поля подсветки. Неселективность визуализации обеспечивается чернением подложки. Чернь обеспечивает 98%-е поглощение ИК излучения в диапазоне от 1 до 15 мкм. При определенной температуре ЖК экран, освещенный белым светом, отражает излучение с длиной волны, соответствующей данной температуре, и выглядит одноцветным. При поглощении ИК излучения разные участки экрана нагреваются в разной степени, и окрашиваются соответственно в разные цвета. Чувствительность прибора в непрерывном режиме составляет  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>, а в импульсном — до  $10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>; точность измерения температуры  $\Delta t = 0,3^\circ\text{C}$ . По сравнению с другими материалами ХЖК превосходят их по чувствительности, но уступают по пространственному разрешению. Регистрируемое излучение может нести информацию о внутренних дефектах материалов. На рис. 16.6 и 16.7 приведены примеры визуализации пространственной структуры лазерного излучения.

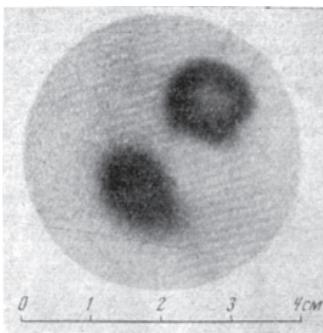


Рис. 16.6. Пространственная структура пучка импульса  $\text{CO}_2$ -лазера: энергия 20 мДж, длительность  $10^{-6}$ с, мощность 20 квт; измеренная чувствительность пленки ХЖК-10 мДж/см<sup>2</sup>

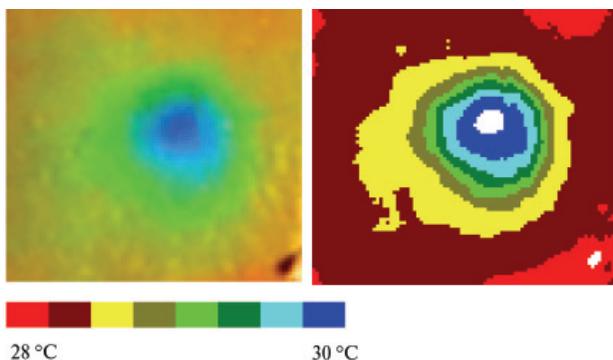


Рис. 16.7. Визуализация структуры пучка в сечении одномодового лазера (а) и распределение температуры по сечению (изотермы). Внизу показана цветотемпературная шкала. Фото Г.М. Жарковой

На рис. 16.8 приведен график зависимости температуры по сечению лазерного пучка.

Методика, разработанная для визуализации ИК полей, была использована для регистрации СВЧ излучений [28].

Высокая температурная чувствительность  $\Delta T/\Delta \lambda = 0,01^\circ\text{C}/\text{нм}$ , получение информации о тепловом поле по всей поверхности объекта, обратимость цвета и многократность использования пленки, а

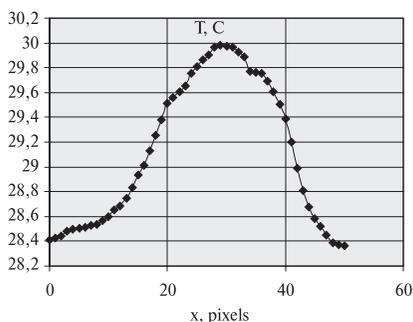


Рис. 16.8. Распределение температуры по центральному сечению лазерного пучка

также сокращение затрат времени и ресурсов на проведение измерений делают термографию на ХЖК эффективным методом термодиагностики.

### 16.5. Визуализация акустических полей

Широкий круг явлений, связанных с распространением упругих волн в жидких кристаллах рассмотрен в монографиях [29, 30]. Распространение акустических волн в среде сопровождается механическими деформациями сжатия и сдвига. Проявления воздействия этих упругих возмущений на макроструктуру ЖК, а, следовательно, и на их оптические свойства весьма разнообразны и зависят от амплитуды и типа деформации, соотношения между длиной волны звука и линейными размерами образца, ориентации волнового вектора по отношению к директору и геометрии эксперимента. В зависимости от амплитуды деформации можно выделить три стадии превращений макроструктуры, на каждой из которых достигается определенная степень разупорядоченности поля директора: а) однородная деформация структуры, когда возникающее в слое осциллирующее искажение ориентации повторяет распределение на его плоскости величины, характеризующей данное упругое возмущение (сила звука, смещение и т.д.); б) пространственно-периодическая деформация, в результате которой в слое возникают одномерные или двумерные пространственно-модулированные структуры с периодичностью, определяемой толщиной слоя; в) неоднородная деформация структуры, сопровождаемая ее полной разориентацией и образованием поликристаллической структуры со случайным распределением директора [29]. Деформация слоя ЖК под действием акустических колебаний может регистрироваться по изменению двулучепреломления света, повороту его плоскости поляризации, изменению отражательной или пропускательной способности, изменению оптического поглощения и т. п. Наиболее разработаны вопросы, связанные с поляризационной модуляцией света. Для визуализации акустических полей с помощью ЖК используются два механизма, приводящие к изменению их оптических свойств: прямое воздействие звука на среду, и изменение ее температуры при прохождении акустической волны.

Прямое воздействие акустического поля происходит либо через основные параметры поля (звуковое давление, колебательное смещение частиц, переменную плотность среды), либо благодаря квадратичным эффектам (акустические течения, радиационное давле-

ние). Это позволяет получить видимую картину распределения величин, характеризующих звуковое поле. По способу восприятия акустической информации различают приемники дистанционные и контактные. На рис. 16.9 приведена простейшая схема приемника дистанционного типа.

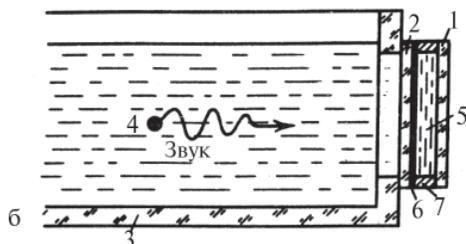


Рис. 16.9. Устройство дистанционного типа для визуализации акустического поля с помощью ЖК [29]: 1 — оптически прозрачная опорная пластина; 2 — тонкая пластина, прозрачная для звука; 3 — кювета; 4 — источник звука; 5 — слой ЖК; 6 — отражающее покрытие; 7 — прокладки

Одна из составляющих его опорных пластин 1, с которой снимается информация, оптически прозрачна, например, выполнена из стекла. Другой пластиной (2), через которую эта информация вводится, является тонкая пластина, прозрачная для звука. Она отделяет слой ЖК от жидкости, содержащейся в кювете 3, где располагается источник звука 4. В качестве рабочего вещества 5 используют НЖК, СЖК и смеси НЖК и ХЖК.

Конструкцию устройства определяет режим его работы. Если устройство работает на просвет, то обе опорные пластины изготавливают из прозрачного для света материала, тогда как при работе на отражение на одну из опорных пластин наносят отражающее свет покрытие 6. Толщину слоя ЖК задают прокладками 7. Ориентация молекул ЖК осуществляется обработкой поверхностей опорных пластин. Большинство таких устройств работает на эффектах двулучепреломления и динамического рассеяния света. Чувствительность, контраст, временная и пространственная разрешающая способность таких уст-

роиств зависят от свойств ЖК материала, его ориентации, от геометрии эксперимента, что подробно рассмотрено в работе [29]. Контактная визуализация звуковых полей предполагает создание ориентированного слоя ЖК непосредственно на поверхности излучателя или связанного с ним звукопровода. На рис. 16.10–16.13 приведены фотографии акустических изображений, визуализированных с помощью ЖК приемников [31].

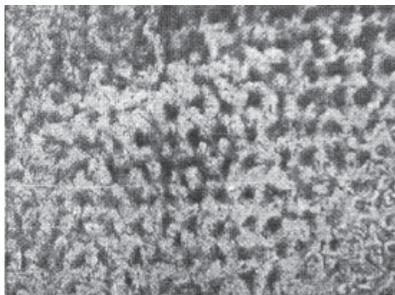


Рис. 16.10. Изображение латунной сетки, полученное с помощью акустооптического преобразователя на НЖК толщиной 40 мкм (эффект ДРС)

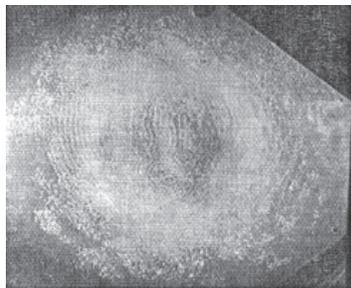


Рис. 16.11. Поле акустического излучателя ультразвука диаметром 38 мм на частоте 3 мГц, полученное с помощью НЖК

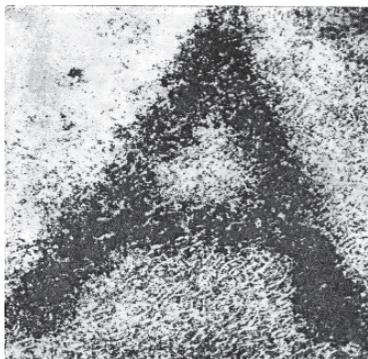


Рис. 16.12. Изображение латунного объекта в виде буквы А, полученное с помощью акустооптического преобразователя на смеси НЖК и ХЖК с планарной ориентацией



Рис. 16.13. Изображение лапы лягушки, полученное с помощью акустооптического преобразователя на НЖК толщиной 40 мкм с гомеотропной ориентацией (эффект ДРС)

Термооптический метод является не прямым методом визуализации УЗ полей, поскольку в этом случае визуализируется не распределение звуковых давлений или интенсивности звука, а распределение температур в материале пластины, помещенной в акустическом поле. Изменение температуры среды вызвано преобразованием энергии звуковых волн в тепловую энергию в результате ее поглощения. Для визуализации температурного поля акустической волны в качестве детектора используются ХЖК. Имеющиеся экспериментальные данные о применении термооптических приемников на ХЖК для отображения звуковых полей в газах, жидкостях и твердых телах охватывают диапазон частот от сотен герц до гигагерц. Термооптические приемники на ХЖК также разделяют на дистанционные и контактные. В дистанционной термографии ввод акустической энергии в слой ХЖК осуществляется через промежуточную жидкость, для чего приемник акустического излучения полностью или частично погружают в резервуар, где находится излучатель звука и исследуемый объект. Приемник представляет собой опорную пластину из поглощающего звук материала, на которую нанесен слой ХЖК (рис. 16.14). Для повышения чувствительности пластину покрывают слоем дополнительного поглотителя, например парафина. В термооптическом приемнике, содержащем слой поглотителя толщиной 1,0 мм с удельной теплоемкостью 0,02 Дж/см<sup>3</sup> и коэффициентом поглощения 3 непер/м, нанесенный на стальную мембрану толщиной 0,075 мм, при интенсивности звука около 300 мВт/см<sup>2</sup> обеспечивал полный цветовой переход в ХЖК (изменение температуры на 2°) в течение 1,0 с.

ХЖК наносили на стальную мембрану со слоем поглотителя толщиной 0,001 см, а температура цветового перехода составляла 27,9°С [29]. Оценка тепловой диффузии в материале поглотителя показала, что при энергии

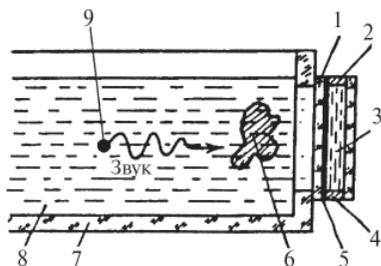


Рис. 16.14. Термооптический приемник звука дистанционного типа на основе ХЖК [32]: 1 — пластина, прозрачная для прохождения акустического сигнала; 2 — оптически прозрачная пластина; 3 — слой ХЖК; 4 — корпус термооптического приемника; 5 — поглотитель звуковой энергии; 6 — объект; 7 — резервуар; 8 — жидкость; 9 — источник акустического сигнала

порядка  $100 \text{ Вт/см}^2$  на частоте порядка  $1 \text{ МГц}$  изображение сохраняется в течение  $10 \text{ с}$ , при этом из-за тепловой инерции поглотителя длительность экспозиции не превышала  $1 \dots 10 \text{ с}$ . Дистанционный метод на основе ХЖК успешно применен для визуализации полей излучателей звука (ближнего и дальнего поля излучателя в воде, звуковых полей в газах), для получения изображения находящихся в них объектов, а также для получения данных о распределении энергии по сечению звукового пучка и для визуализации голограмм [32–34].

В термооптических приемниках контактного типа слой ХЖК наносят либо непосредственно на поверхность исследуемого объекта, либо на слой связующего материала, обеспечивающего акустический контакт. Для контактной термографии широко используются ХЖК, капсулированные в полимерную матрицу. Эти приемники применяют для контроля структурных неоднородностей в пьезоэлектрических материалах и изделиях: раковин, посторонних включений, трещин, пор и др. Установка для визуализации акустических полей пьезокерамических источников ультразвука показана на рис. 16.15 [35].

При подаче на исследуемый пьезокерамический элемент (ПКЭ) переменного напряжения происходит его возбуждение и в плоском слое воздуха, ограниченном верхней поверхностью ПКЭ и нижней поверхностью жидкокристаллической пленки 4, возникает акустическое поле. За счет взаимодействия акустического поля с поверхностью ЖК вблизи поверхности пленки формируется акустический пограничный слой (АПС). Диссипация акустической энергии в АПС в свою очередь приводит к появлению тепловых потоков, направленных к поверхности ЖК приемника (ЖКП). В результате того, что плотность этих тепловых потоков зависит от параметров акустического поля, в ЖК возникает температурный рельеф, позволяющий визуализировать акустическое поле.

Сопоставление результатов эксперимента с расчетными значениями плотности тепловых потоков, полученными на основе теории ламинарного пограничного слоя [36–38], показало, что реальные тепловые потоки, возникающие в АПС, более чем на порядок превышают результаты расчетов. Анализ экспериментальных условий, реализуемых при визуализации ультразвуковых полей, позволил установить основную причину такого несоответствия. В теории ламинарного АПС [36–38] рассматривается процесс формирования акустического пограничного слоя бегущими звуковыми волнами, а изображение, появляющееся на ЖКП, является следствием взаимодействия с ее поверхностью стационарной час-

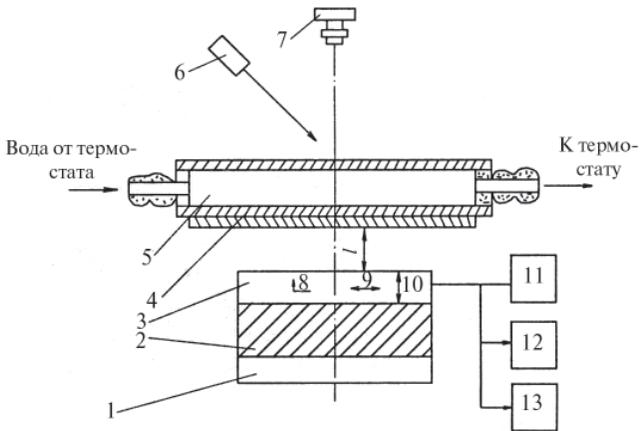


Рис. 16.15. Установка для визуализации акустических полей пьезокерамических источников ультразвука: 1 — кронштейн механизма вертикального перемещения; 2 — термостатированный стол; 3 — исследуемый пьезоэлектрический образец; 4 — пленка ХЖК; 5 — термостатированная прозрачная кювета; 6 — коллимированный источник; 7 — устройство регистрации оптической информации; 8 — направление вектора поляризации объекта; 9 — направление колебаний образца при поперечном эффекте; 10 — направление колебаний при продольном эффекте; 11 — генератор электрических сигналов; 12 — вольтметр; 13 — частотомер;  $l$  — расстояние от поверхности образца до пленки ХЖК

ти акустического поля исследуемых источников звука. Это позволило предположить, что в рассматриваемом случае имеет место изменение механизма формирования пограничного слоя. Как показали исследования увеличенное поглощение звука в рассматриваемом случае связано с возникновением вблизи твердой поверхности, с которой взаимодействуют стоячие звуковые волны, турбулентного АПС [39, 40].

Параметры температурного рельефа, визуализированного с помощью ЖКП, зависят от распределения амплитуд колебаний возбужденного ПКЭ, его рабочей частоты и расстояния  $l$  между излучающей поверхностью и нижней поверхностью ЖКП (рис. 16.15). При этом на установке, схема которой показана на рис. 16.15, могут

быть реализованы следующие режимы визуализации акустических полей пьезокерамических источников звука:

$$l < \lambda/2, \quad (16.3)$$

где  $\lambda$  — длина волны в газе, заполняющем объём визуализатора, на резонансной частоте ПКЭ;

$$l = n \cdot \lambda/2, \quad (16.4)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — номер соответствующего полуволнового резонанса в плоском слое газа, заполняющего объём визуализатора;

$$l < \lambda/2 \text{ и } l \neq n \cdot \lambda/2, \quad (16.5)$$

$$l = 0. \quad (16.6)$$

При этом наблюдаются следующие особенности излучения звука в плоский слой газа, ограниченный твердыми стенками. Если выполняется условие (16.3), то форма колебаний поверхности источника звука не зависит от расстояния  $l$  и имеет вид такой, какой она имеет при излучении звука в свободное пространство. В этих условиях источник звука не взаимодействует с поверхностью твердого тела, ориентированного параллельно его излучающей поверхности. Этот экспериментальный факт имеет большое практическое значение при разработке акустических экранов. Если распределение колебаний поверхности источника звука известно, то результаты расчетов параметров акустического поля на нижней поверхности ЖКП совпадают с результатами измерений [41].

При выполнении условия (16.4) в слое газа, ограниченном объёмом над излучающей поверхностью, возникают локальные акустические резонаторы с мягкими боковыми стенками. Такие резонаторы, заполненные, например, воздухом, имеют достаточно большое значение добротности и легко переходят в нелинейный режим колебаний. Такой переход регистрируется по появлению изображения на ЖК преобразователе, соответствующего удвоенной рабочей частоте источника звука или за счет регистрации звукового излучения, частота которого лежит много ниже его рабочей частоты. Появление низкочастотного излучения в данном случае связано с тем, что для появления ударных волн в локальном резонаторе бегущие навстречу друг другу волны должны некоторое время накапливать нелинейность. Например, в резонаторе, заполненном воздухом и возбужденном на частоте 49,5 кГц, время накопления нелинейности составляет примерно 10 периодов основной волны. Рассмотренный здесь механизм перекачки звуковой энергии из высокочастотной области на низкие

частоты приводит к неприятностям при решении задач борьбы с воздушным шумом на транспорте. Выполнение условия (16.4) приводит к ещё одному эффекту. В этом случае резко изменяется форма колебаний поверхности источника звука. Причем она всегда изменяется таким образом, что излучающая способность источника звука увеличивается. Это связано в первую очередь с тем, что источник звука начинает эффективно взаимодействовать с поверхностью твердого тела, ориентированной параллельно его излучающей поверхности.

Если выполняются условия (16.5) при малых значениях параметра  $n$ , то источник звука также взаимодействует с поверхностью твердого тела, ориентированной параллельно его излучающей поверхности. Форма распределения колебаний поверхности источника звука изменяется, но не так сильно как это имеет место при полуволновом резонансе (16.4). С ростом параметра  $n$ , что соответствует увеличению толщины слоя  $l$ , эффективность взаимодействия источника звука и твердой стенки уменьшается за счет увеличения диссипации акустической энергии в объёме газа заполняющего слой. Например, в слое, заполненном воздухом на частоте 49,5 кГц взаимодействия источников звука с твердой стенкой не наблюдается при  $n \geq 14$ . При этих значениях параметра  $n$  источник излучает звук так, как будто он излучает в свободное пространство и твердой стенки перед ним нет.

Если выполняется условие (16.6), то ЖК преобразователь непосредственно контактирует с поверхностью источника ультразвука, и мы переходим в режим прямого термографирования полей акустической диссипации, возникающих в возбужденных пьезоэлементах за счет механических и электрических потерь.

На рис. 16.16 представлены результаты визуализации ультразвукового поля пьезоэлемента с рабочей частотой 50кГц пленкой ХЖК толщиной 150 мкм и диапазоном существования холестерической фазы от 25° (красный цвет) до 30°С (фиолетовый цвет) [42, 43]. На рисунке четко видна кольцевая структура, на красном фоне появляются кольцевые максимумы, имеющие другой цвет. Центральный максимум имеет голубой цвет, а дальше от центра на периферию максимумы меняют свой цвет от зеленого до оранжевого. Они соответствуют максимумам интерференционной картины в воздушном зазоре между верхней поверхностью пьезоэлемента и нижней поверхностью пленки.

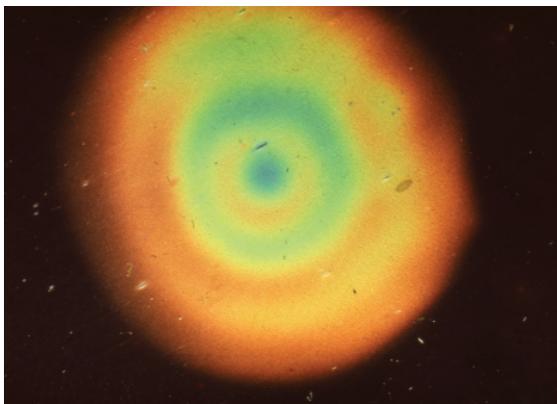


Рис. 16.16. Изображение поля излучателя, работающего на частоте 50 кГц.  $l = \lambda/4 = 1,7$  мм

Если воспользоваться спектральной характеристикой ХЖК, то по цвету отдельных участков изображения можно определить значения интенсивностей ультразвука. Чувствительность приемника на частоте 50 кГц порядка  $10^{-4}$  К м<sup>2</sup>/Вт, время формирования изображения 1–2 с. С ростом частоты ультразвука, вследствие роста поглощения на границе газ-ЖК пленка, чувствительность увеличивается и время срабатывания уменьшается [43].

На рис. 16.17 приведены результаты сравнения теоретически рассчитанного распределения акустического поля (модуля безразмерного потенциала скорости  $|\Phi_0(\bar{R}_1)|$ ) вдоль верхней пластины с изображениями на ЖК преобразователе, полученными при разных расстояниях  $l$  между преобразователем и верхней поверхностью ПКЭ [41]. Расстояния  $l$  были соответственно равны 2, 3, 4 мм. Светлые области на фотографиях соответствуют большей температуре и, следовательно, большей интенсивности УЗ. К особенностям этого изображения можно отнести то, что расстояние между ближайшими максимумами равно  $\lambda/2 = 3,47$  мм, а наиболее удаленный максимум находится примерно на расстоянии  $\lambda/4$  от края излучающей пьезопластины. Видно, что при  $l < \lambda/2$  имеет место хорошее качественное совпадение результатов расчета и эксперимента. В этом случае источник ведет себя так, как будто стенки перед ним нет и он излучает в свободное пространство.

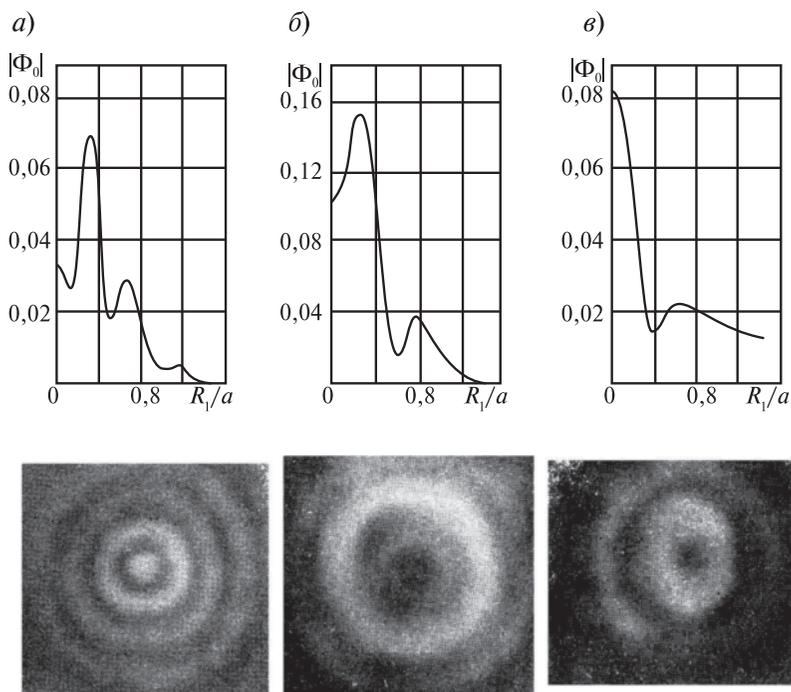


Рис. 16.17. Сопоставление расчетов  $|\Phi_0(\bar{R}_1)|$  с результатами визуализации УЗ поля при различных расстояниях  $l$  между поверхностью ПКЭ и ЖК преобразователя: а — 2 мм; б — 3 мм; в — 4 мм [41]

Форма колебаний поверхности ПКЭ не меняется, поэтому можно сделать вывод о том, что источник со стенкой не взаимодействует. При значении  $l = 4$  мм (рис. 16.17в) в эксперименте в центре изображения УЗ поля наблюдается минимум, не предсказываемый теорией, так как согласно распределению  $|\Phi_0|$  в центре должен быть довольно значительный максимум. Методом двулучевой интерферометрии было установлено, что, когда расстояние между поверхностью ПКЭ и преобразователя больше  $\lambda/2$ , распределение колебаний поверхности ПКЭ начинает отличаться от распределения, полученного при излучении ПКЭ в свободное полупространство [41]. Таким образом, показано, что изображение, которое возника-

ет на жидкокристаллической пленке, находящейся в воздухе и вблизи источника УЗ (при  $l < \lambda/2$ ), качественно соответствует распределению модуля потенциала скорости вдоль жесткой стенки, расположенной в том месте, где находится жидкокристаллическая пленка.

На поверхности любого твердого тела, излучающего звук, всегда возникает вибрационное поле, характеризующееся распределением амплитуд колебаний поверхностей  $\xi(x, y, t)$ . Вибрационное поле создает в примыкающем к поверхности твердого тела пространстве акустическое поле с распределением потенциала скорости  $\Phi(x, y, z, t)$ . Очевидно, характер распределения  $\xi(x, y, t)$  и связанного с ним акустического поля  $\Phi(x, y, z, t)$  зависят от особенностей внутренней структуры вещества. В этом случае, при достаточно надежном методе визуализации акустических полей, может быть разработан бесконтактный способ исследования внутренней структуры твердых тел. Информацию о внутренней структуре вещества излучателя содержит только ближнее акустическое поле высокочастотных источников звука, что определяет условия эксперимента. Если условия возбуждения однотипных образцов одинаковы, то образцы с однородной структурой создадут одинаковые распределения температур, близкие к некоторому стандарту. Дефектные образцы искажат картину распределения температур. В работе [45] проведена визуализация механических колебаний, дефектов и неоднородностей в поляризованных по толщине пьезокерамических элементах. В стержневых элементах из пьезокерамики ЦТС размерами  $130 \times 10 \times 3$  мм генерация ультразвука осуществлялась путем использования поперечного пьезоэффекта, возбуждаемого переменным электрическим полем с амплитудой  $E = 2 \cdot 10^4$  В/м на частотах 11, 33, 55 кГц, соответствующей первой, третьей и пятой моде продольных колебаний стержня, определяемых его длиной (рис. 16.18). ХЖК отчетливо выявляют области повышенной температуры, которые определяют в соответствии с расчетной картиной распределения активной составляющей электропроводности по длине образца. Здесь же видна и малая область пониженной температуры в виде темного пятна, обусловленная дефектом — углублением на поверхности диаметром 4 мм и глубиной 2 мм. Время установления наиболее контрастного изображения областей повышенных механических напряжений (акустических потерь) составляло 40–150 с. В партии было 50 образцов, прошедших входной контроль. Возбуждающее электрическое поле было  $E = 7,5$  кВ/м, температура воздуха  $21^\circ\text{C}$ .

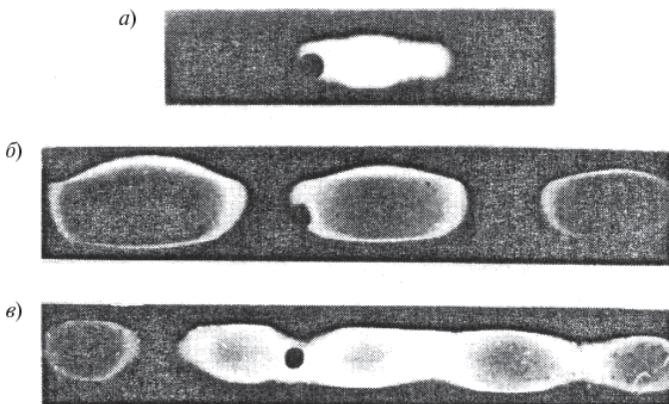


Рис. 16.18. Визуализация дефекта в стержневом элементе пьезокерамики ЦТС термографированием акустического поля (дефект — круглое темное пятно) [45]

Расплывание изображений, обусловленное выравниванием температуры за счет теплопроводности в окружающую среду и теплопроводности в слоях ХЖК приемника, происходило через 2–5 мин с момента включения электрического поля [43].

В качестве другого примера рассмотрим результаты термографии дисковых пьезокерамических элементов (рис.16.19), изготовленных из состава ЦТБС-3 и поляризованных по толщине [45].

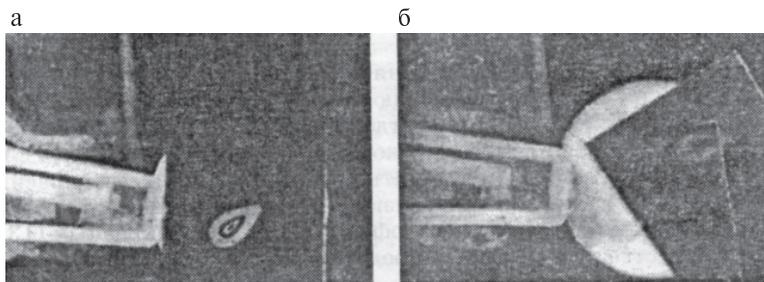


Рис. 16.19. Термограммы дисковых ПКЭ ( $31 \times 1$  мм), совершающих колебания на частоте первого радиального резонанса (94,5 кГц), напряжение возбуждения 7,5 В: а — дефект в центральной области излучателя; б — дефект с меньшим тепловыделением (расположен ближе к краю) [45]

Термоиндикатор имел рабочий диапазон в один градус и толщину 100 мкм. Он наносился непосредственно на образцы. Время формирования изображения для образцов находилось в пределах от 12 до 57 с. 15 образцов оказались дефектными, причем в 6 случаях дефекты оказались на краю образцов. Анализ показал, что они представляли собой небольшие трещины в локализованных областях. Дефекты в центральной области были объяснены недопрессовкой материала или наличием раковин в объеме размером 0,1...0,2 мм.

Ряд других примеров визуализации механических напряжений в пьезокерамических элементах рассмотрен в работах [46, 47]. Отметим также, что метод НЖК может успешно применяться для изучения структурных неоднородностей в твердых диэлектриках, не относящихся к классу пьезоэлектриков. В этом случае собственные колебания контролируемых образцов могут быть возбуждены при помощи пьезокерамических элементов.

Термооптические ХЖК пленки были применены для визуализации ультразвуковых волн, используемых в терапии [48]. Разработанная методика обработки изображений тепловых полей позволила получить их трехмерное изображение, а также обеспечила уменьшение шумов и высокое пространственное разрешение.

### Литература к главе 16

1. *Ferguson J.L.* Liquid Crystals // Scientific American. 1964. Vol. 211. P. 77.
2. *Wall M.* LC for nondestructive testing. Harwell, Berkshire: Atomic energy research. 1972. 19 p.
3. *Kelker H., Hatz R.* Handbook of Liquid Crystals. Weinheim: Verl. Chemie. 1980. 917 p.
4. *Беляков В.А., Сонин А.С.* Оптика холестерических ЖК. М.: Наука. 1982. 360 с.
5. *Жаркова Г.М., Сонин А.С.* Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: ВО «Наука». 1994. 214 с.
6. *Жаркова Г.М., Хачатурян В.М.* и др Термоиндикаторная композиция. Патент РФ. 1220329, 10.02.1993.
7. *Greated S., Kornilov V.I., Kovrizhina V.N., Khachaturyan V.M., Pavlov A.A., Zharkova G. M.* LC thermography and PIV method in investigation of unstationary processes in fluids // Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research. 1998. Novosibirsk. Part 3. P. 142–147.
8. *Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Корнилов В.И., Павлов А.А.* Регистрация полей температур с помощью ЖК покрытий // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3. № 4. С. 317–324.

9. Андреев В.И., Несрулаев А.Н., Сонин А.С., Степанов Б.М., Шелемин Б.Б. Определение параметров пространственного изображения при термооптической записи на смектиках А // ЖТФ. 1981. Т. 4. № 4. С. 879–881.
10. Клюкин Л.М., Несрулаев А.Н. Регистрация на смектике А оптической информации лазерными импульсами // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 7. С. 1529–1534.
11. Несрулаев А.Н., Рабинович А.З., Сонин А.С., Шелемин Б.Б. Термооптическая запись на хиральной сегнетоэлектрической смектической С\*-фазе жидких кристаллов // Квантовая электроника. 1980. Т.7. № 12. С.2578–2581.
12. Томилин М.Г. Взаимодействие жидких кристаллов с поверхностью. СПб: Политехника. 2001. 325с.
13. Голосов В.А., Дударчик А.И., Бурасов А.Е. Применение ЖК для термографии тепловых полей транзисторов // Электрон. техника. Сер. Управление качеством и стандартизация. 1971 г. Вып. 6. С. 77–83.
14. Sinnadurai F.N. A technique for the measurement of hot spots and iso-therm profiles at the surface of the elements and hybrid microcircuits electrocomp. // Sci. Techn. 1980. Vol. 6. P. 177–183.
15. Невская Г.Е., Рубцов А.Е., Рубцова О.Ю., Березиков Д.Д. Применение ХЖК для визуализации токов утечки ИС // Микроэлектроника. Серия 3. 1986. Вып.2 (229). С. 44.
16. Klein E.J. Application of LC to boundary layer flow visualization // III Aerodynamic Testing Conf. San Francisco, Cal. 1968. April 8–10. AIAA Paper № 68–376.
17. Zharkova G. M., Kovrizhina V.N., Khachatryan V.M. LC thermography. State of art and application in aerodynamics // Proceed. of II Europ. Conf. for Aerospace Science. 2007.
18. Simonich J.C., Moffat R.J. New technique for mapping heat transfer coefficient contours // Rev. sci. instr. 1982. Vol. 53. № 5. P. 558–565.
19. Akino N., Kunugi T., Ichimiya K. et al. Improved LC thermometry excluding human color sensation // Trans. ASME. Journal of Heat Transfer. 1989. Vol. 111. P. 558–565.
20. Zharkova G. M., Zanin B.Yu., Kovrizhina V.N., Brylyakov A.P. Free stream turbulence effect on the flow structure over the finite span straight wing // Journal of visualization. Japan. 2002. Vol. 5. № 2. P. 169–176.
21. Brylyakov A.P., Zanin B.Yu., Kovrizhina V.N., Zharkova G. M. Acoustic excitation of stationary streamwise structures in separation region on a straight wing // Physics of Fluid. 2005. Vol. 17. № 7. P. 078107–078111.
22. Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P. The quantitative temperature visualization for heat transfer study under hypersonic velocities // In XII-th Int. Symp. on Flow Visualization. 2006. Sept. 10–14. DRL, Gettingen, Germany. P. 280.
23. Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P., Smorodsky B.N., Knauss H., Roediger T., Wagner S., Kraemar E. Comparative heat transfer studies at hypersonic conditions by means of three measurement techniques. Pt.1 Measurement Techniques, Experimental setup and preceding investigations // Int. Conf.

on the Methods of Aerophysical Research. Part 1. ICMAR 2007. Novosibirsk, Russia. P. 221–228.

24. *Ennalat R.D., Ferguson J.D.* Thermal radiography utilizing with LC // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1971. Vol. 13. P. 149–164.

25. *Жаркова Г.М., Оришич А.М., Пономаренко А.Г., Солоухин Р.И.* ИК оптический преобразователь // Приб. и техн. эксп. 1973. № 5. С. 208–209.

26. *Zharkova G.M.* Temperature field visualization using LC method // Experimental heat transfer. 1991. Vol. 4. P. 85–94.

27. *Клюкин Л.М., Сонин А.С., Степанов Б.М., Шубаев И.Н.* Применение термографии на пленках ХЖК для исследования параметров излучения лазеров ИК диапазона, работающих в непрерывном режиме // Квант. электр. 1975 г. Т. 2. № 1. С. 61–67.

28. *Клюкин Л.М., Ляхов Ю.А., Сонин А.С.* Измерение параметров СВЧ-пучков в открытом пространстве с помощью больших ЖК экранов // Радиотехн. и электр. 1985. Т. 30. № 6. С. 1205–1211.

29. *Капустин А.П., Капустина О.А.* Акустика жидких кристаллов. М.: Наука. 1986. 287с.

30. *Капустина О.А.* Акустооптические свойства ЖК и их применение. М.: ЦНИИ «Румб». 1979. 196 с.

31. *Denis R.* Characterisation of ultrasonic transducers using ChLC // Ultrasonics. 1978. Vol. 16. № 1. P. 37–43.

32. *Sproad W.H., Cohen S.E.* AGIS — an acoustographic imaging system (LC imaging of ultrasonic waves) // Mat. Eval. 1970. Vol. 28. № 4. P. 73–76.

33. *Cook B.D., Werchan R.E.* Mapping ultrasonic fields with ChLC// Ultrasonics. 1971. Vol. 9. № 3. P. 101.

34. *Iizuka K.A.* LC film used for mapping an acoustic field // Proceed. IEEE. 1970. Vol. 58. № 2. P. 288.

35. *Легуша Ф.Ф.* Пьезокерамические преобразователи: Справ. Л.: Судостроение. 1984. С. 211–254.

36. *Kirchoff G.* Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung. Poggendorf's Annalen, 1868, Bd. 134, №6, S. 177.

37. *Константинов Б.П.* О поглощении звуковых волн при отражении от твердой границы // ЖТФ. 1939. Т. 9. № 3. С. 226–238.

38. *Константинов Б.П.* Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченных средах. Л.: Наука, 1974. 144 с.

39. *Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А.* Поглощение звука в турбулентном акустическом пограничном слое. // Труды XX сессии РАО. Физическая акустика. М.: ГЕОС 2008. С. 97–100.

40. *Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А.* Расчет затухания звука при возбуждении стоячей волны в прямой трубе, имеющей произвольную форму поперечного сечения // Труды XX сессии РАО. Физическая акустика. М.: ГЕОС 2008. С. 179–183.

41. *Легуша Ф.Ф., Мурга В.А., Славин А.Н.* Анализ изображений ультразвуковых полей, полученных в воздухе с помощью жидкокристаллической пленки // Акуст. журн. 1983. Т. 29. В. 11, С. 84–87.

42. *Легуша Ф.Ф., Славин А.Н.* Прибор для визуализации ультразвука в воздухе на основе жидкокристаллической пленки // ПТЭ. 1981. № 6. С. 195.
43. *Легуша Ф.Ф.* Локализация изображения излучающей области при визуализации ультразвука в газах // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 4. С. 723–728.
44. *Легуша Ф.Ф.* Эффект Константинова и поглощение звука в неоднородных средах. // УФН. 1984. Т. 144. Вып. 3. С. 509–522.
45. *Легуша Ф.Ф., Пасынков Р.Е.* Термографирование ультразвуковых полей с помощью ЖК. В кн. «Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики». Тверь: Из-во ТГУ. 1990. С. 19–52.
46. *Кожевников Е.Н., Чабан И.А.* К вопросу об использовании ЖК в акустооптических устройствах // Акуст. журн. 1975. Т.21. Вып. 6. С.90–907.
47. *Dowden W.A.* Cholesteric LC (Review of development and applications to thermal imaging and chemical detection) // Non- destructive testing/ 1967. Vol. 1. P. 99–102.
48. *Munoz G.A.L., Orozco G.A.V.* Three dimensional temperature distribution analysis of ultrasonic therapy equipments using thermotropic LC films // In New developments in LCs / Ed.: Georgey V. Tkachenko. Olajnica 19/2, 32000 Vankovar. Croatia. 2009. P. 93–110.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Есть в моей книге хорошее.  
Кое-что слабо.  
Немало есть и плохого.  
Других книг не бывает, мой друг.  
*Марциал Марк*

Жидкокристаллические материалы, обладающие уникальными оптическими свойствами, явились основой нового направления в фотонике, связанного с развитием информационных технологий.

В монографии впервые в отечественной литературе рассмотрены различные области применения жидкокристаллических материалов. Выделены и обсуждены три главных направления в их использовании: информационные дисплеи, оптические элементы и устройства, а также регистрирующие среды. Авторы стремились осветить вклад отечественных и зарубежных ученых в развитие этих направлений, что нашло отражение в приведенной обширной библиографии.

Разделам по применению предшествует описание структуры и свойств жидких кристаллов, а также основных оптических эффектов в них, что поможет читателям в понимании изложенного материала. Авторы надеются, что монография будет способствовать дальнейшему развитию фотоники жидких кристаллов.

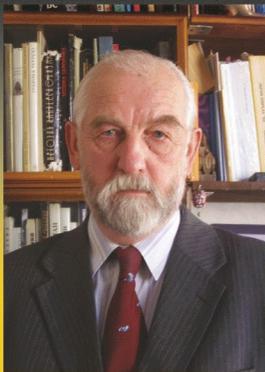
*Томилин Максим Георгиевич*  
*Невская Галина Егоровна*

**ФОТОНИКА  
ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**

Обнаруженные опечатки:

на страницах 189 – 191 правильно –

**кантилевер**



**ТОМИЛИН**  
**Максим Георгиевич**

Доктор технических наук, профессор кафедры физики и кафедры материаловедения Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, чл.-кор. РАИИ.

Область научных интересов: дисплеи, фотоника жидких кристаллов (ЖК), явления на границе ЖК–твердое тело, неразрушающие методы контроля поверхности материалов с использованием ЖК, биофотоника, история оптики.

Автор четырех монографий, более 300 научных работ, 40 изобретений и 70 научно-популярных очерков. Организатор нескольких национальных и международных конференций по ЖК, выпускающий редактор ряда тематических номеров «Оптического журнала» и трудов ГОИ имени С. И. Вавилова, член программного комитета ряда международных оптических конференций. Награжден медалью Оптического общества имени Д. С. Рождественского, является лауреатом премии Правительства Российской Федерации в области образования.



**НЕВСКАЯ**  
**Галина Егоровна**

Доктор технических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Заслуженный работник высшей школы.

Область научных интересов: электрооптика (ЖК) в неоднородных электрических полях, электрофизические свойства структуры ЖК–диэлектрик–полупроводник, неразрушающие методы контроля поверхности материалов и изделий с использованием ЖК, адаптивные линзы на жидких кристаллах.



Санкт-Петербург  
Издательство  
Политехнического  
университета