

# Моделирование характеристик жидкокристаллических дисплеев и модуляторов

---

**Г.В. Симоненко**



**Саратов**

**2017**

**Моделирование характеристик жидкокристаллических дисплеев и модуляторов.**  
Г. В. Симоненко – Саратов, 2017. – 117 с. : ил.

В учебном пособии представлены основные положения физики жидких кристаллов и систем обработки информации на их основе. Даны определения основных характеристик жидкокристаллических дисплеев и представлены описание основных матричных методов моделирования их характеристик. Подробно описана система компьютерного моделирования характеристик жидкокристаллических дисплеев. В пособие вошли результаты компьютерного моделирования различных жидкокристаллических устройств и приведен анализ их конструкций.

Учебное пособие ориентировано на магистров и аспирантов физических факультетов университетов, специализирующихся в области оптики, лазерной физики, оптических технологий и оптоэлектроники.

Учебное пособие

**«МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ И  
МОДУЛЯТОРОВ»**

Г. В. Симоненко

## Содержание

лист

<b>Введение</b>	6
<b>Глава 1. Основные сведения из физики жидких кристаллов</b>	11
<b>1.1 Классификация жидких кристаллов и их основные физические свойства</b>	12
<b>1.2 Управляемое полем двойное лучепреломление в жидких кристаллах</b>	15
<b>1.3 Явление вращения плоскости поляризации света и твист – эффект в жидких кристаллах</b>	18
<b>1.4 Эффект «гость – хозяин» в жидких кристаллах</b>	20
<b>Глава 2. Моделирование электрооптических эффектов в жидких кристаллах</b>	23
<b>2.1 Метод вычисления одномерного распределения углов ориентации директора жидкого кристалла, находящегося во внешнем электрическом поле</b>	24
<b>2.2 Расчет углов ориентации директора ЖК при двумерной упругой деформации, вызванной электрическим полем</b>	28
<b>2.2.1 Методика и алгоритм расчета</b>	28
<b>2.2.2 Некоторые результаты моделирования и их обсуждение</b>	30
<b>2.3 Расчет оптического пропускания ЖК - ячейки для различных электрооптических эффектов</b>	32
<b>2.3.1 Модель ЖК - ячейки</b>	33
<b>2.3.2 Метод расчета оптических характеристик электрооптических эффектов, наблюдаемых в ЖК - ячейках</b>	33
<b>2.4 Использование метода комплексных матриц 4×4 для расчета оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейках</b>	36
<b>2.4.1 Методика расчета матрицы распространения неоднородного анизотропного слоя ЖК</b>	37
<b>2.4.2 Модификация матричного метода Берремана и результаты расчета оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК - ячейках, полученных с помощью различных вычислительных методов</b>	39
<b>2.5 Особенности метода решения задачи о вычислении динамического отклика жидкокристаллических устройств обработки информации</b>	44
<b>2.6 Сравнение экспериментальных и рассчитанных оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК-ячейках</b>	45
<b>2.7 Оптические характеристики жидкокристаллических устройств обработки информации</b>	48

<b>2.8 Система компьютерного моделирования электрооптических и оптических характеристик ЖК - устройств отображения информации, работающих на основе различных электрооптических эффектов</b>	49
<b>2.8.1 Компьютерное моделирование характеристик электрооптических эффектов и устройств отображения информации на их основе</b>	50
<b>Глава 3 Моделирование характеристик дисплеев и модуляторов оптического излучения на жидких кристаллах</b>	55
<b>3.1 Экспериментальное и теоретическое исследование оптических характеристик ЖК - модулятора на <math>\pi</math>- ячейках</b>	55
<b>3.1.1 Экспериментальное и теоретическое исследование оптических характеристик ЖК – затвора</b>	56
<b>3.1.2 Влияние конструктивных параметров ЖК затвора на его оптические характеристики</b>	62
<b>3.1.3 Оптические характеристики различных конструкций ЖК затвора</b>	64
<b>3.2 Сравнительный анализ характеристик отражательных STN-дисплеев с одним и двумя поляризаторами</b>	67
<b>3.2.1 Конструкция отражательного дисплея и принцип ее работы</b>	67
<b>3.2.2 Метод поиска оптимальных параметров конструкции дисплея</b>	68
<b>3.2.3 Результаты моделирования характеристик ЖК – дисплея, работающего в режиме OMI</b>	68
<b>3.3 Жидкокристаллический дисплей одновременно использующий эффект интерференции поляризованных лучей в сверхзакрученных структурах жидкого кристалла и эффект “гость-хозяин</b>	71
<b>3.3.1 Характеристики ЖК-дисплея</b>	72
<b>3.3.2 Конструкция ЖК-дисплея</b>	73
<b>3.3.3 Результаты моделирования комбинированного дисплея</b>	75
<b>3.4 Характеристики жидкокристаллических устройств отображения информации на основе эффекта “гость-хозяин”</b>	75
<b>3.4.1 Характеристики ЖК-устройств отображения информации типа “гость-хозяин”.</b>	76
<b>3.4.2 Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение.</b>	
<b>3.4.3 Оптические характеристики «классического» модулятора на основе эффекта «гость – хозяин»</b>	80

3.4.3.1 ЖКМ на планарной структуре с одним поляризатором	81
3.4.3.2 ЖКМ на планарной структуре без поляризатора	82
3.4.3.3 ЖКМ на гомеотропной структуре без поляризатора	83
3.5 Оптические характеристики отражательного жидкокристаллического дисплея типа гость-хозяин без поляроида с фазовым компенсатором	83
3.5.1 Конструкция ЖК – дисплея и принцип его действия	85
3.5.2 Оптические характеристики отражательного ЖК-дисплея типа гость-хозяин без поляроида	86
3.6 Фазовая компенсация и ограничение значения максимального контраста устройства	91
3.7. Модулятор на основе волноводного режима в твист - структуре с большим углом закрутки	92
3.8 Оптические характеристики модуляторов, работающих на основе управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ячейках малой толщины	95
Глава 4 Исследование динамических характеристик эффекта двойного лучепреломления в различных структурах ЖК	99
4.1 Динамика оптического отклика жидкокристаллического индикатора при средних управляющих напряжениях	99
4.2 Динамика оптического отклика жидкокристаллического индикатора при высоких управляющих напряжениях	102
4.2.1 Результаты компьютерного моделирования	102
4.2.2 Динамика оптического отклика ЖК–дисплея, работающего на основе структур с различными углами закрутки	104
4.2.3 Влияние параметров ЖК- вещества на время памяти экрана, работающего на основе эффекта двулучепреломления в ЖК -структуре с углом закрутки $180^0$	106
4.3 Быстродействие пассивных ЖК – устройств отображения информации с высоким уровнем мультиплексирования	110
4.4 Быстродействие модуляторов, работающих на основе управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ячейках малой толщины	112
Рекомендуемая литература	115

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент времени в физике уделяется очень большое внимание жидким кристаллам (ЖК). ЖК являются анизотропными жидкостями и имеют большое светорассеяние и одновременно обладают оптической анизотропией. Кроме этого оптическими свойствами ЖК легко изменяют свои оптические свойства под действием внешних электрических полей. Изучение оптических свойств ЖК в первую очередь связано с техническими приложениями, а именно с использованием ЖК в системах отображения информации.

Изменение оптических свойств ЖК под действием внешнего электрического поля носят название электрооптического эффекта. Оптические характеристики различных электрооптических эффектов в ЖК являются следствием физической анизотропии молекул и упорядоченной структуры ЖК. Большинство электрооптических эффектов, которые нашли широкое применение в технике отображения информации, основано на изменении оптической анизотропии ЖК под действием электрического поля. Это определяет ту уникальную роль, которую играют ЖК в электрооптике. Существуют три принципиальных способа использования переориентации директора ЖК для управления светопередачей. Первый заключается в изменении вектора поляризации света, прошедшего через материал с двойным лучепреломлением. В системах на основе данного явления, ЖК помещается между двумя поляризаторами таким образом, чтобы одна ориентация директора допускала прохождение исходного поляризованного света через второй поляризатор, тогда как другая ориентация директора дает свет, не проходящий анализатор. Любое из этих двух состояний создается приложением внешнего электрического поля, а противоположное состояние имеет место в отсутствие поля. Данный принцип используется в эффектах двойного лучепреломления в незакрученных, закрученных и сверхзакрученных структурах ЖК и в твист - эффекте. Вторым явлением, используемым для контроля светопередачи, является рассеяние, создаваемое гидродинамическими структурами, или турбулентность, которая приводит к сильному и произвольному преломлению света, проходящего через ЖК. Третий принцип основан на использовании ЖК для создания однородной ориентации молекулам дихроичного красителя, растворенного в ЖК. Поглощение такого красителя зависит от соотношения направлений молекулярных осей красителя и локального электрического поля. В этом случае изменить общее поглощение можно за счет изменения ориентации ЖК относительно входящего света. Этот принцип реализован в эффекте "гость - хозяин" и его можно наблюдать с помощью одного поляризатора или вообще без него. При этом современный уровень исследования в области электрооптики ЖК требует не только физического осмысления и качественного описания наблюдаемых эффектов, но и

построения наиболее адекватных эксперименту количественных моделей, анализируя которые с помощью персонального компьютера, можно было бы указать геометрию опыта и параметры ЖК, обеспечивающие требуемые на практике электрооптические характеристики. Такой анализ является залогом успешной целенаправленной работы большого числа как специалистов в области ЖК - материалов, так и специалистов в области электронного обеспечения и технологии электрооптических устройств с использованием ЖК.

В связи со сказанным выше нам представляется, что актуальной является задача теоретического исследования характеристик электрооптических эффектов в ЖК, включая разработку соответствующих моделей и математических методов для их количественного описания и выявления особенностей их протекания. Кроме этого важным является связь этих характеристик с физическими параметрами ЖК и геометрией опыта, а также выявление возможностей получения требуемых на практике "рабочих" характеристик, соответствующих электрооптическим устройствам отображения информации. Отметим, что при проектировании и изготовлении ЖК - устройств отображения информации кроме технологических трудностей, возникают существенные проблемы, связанные со сложной картиной распространения света в ЖК и большим количеством физических и конструктивных параметров, оказывающих большое влияние на электрооптические и оптические характеристики ЖК – устройства. Это в свою очередь требует разработки специальных прикладных программных средств для моделирования и оптимизации электрооптических и оптических характеристик этих сложных систем. Заметим, что в связи с предполагаемым использованием программного обеспечения при проектировании реальных систем отображения информации в промышленном производстве необходимо, чтобы это программное обеспечение обладало следующими преимуществами: высоким быстродействием, простотой в использовании и количественным соответствием между расчетными и экспериментальными данными.

Моделирование характеристик электрооптических эффектов в ЖК и ЖК - устройств отображения информации производится в несколько последовательно выполняемых этапов, которые абсолютно различны как по физике протекающих процессов, так и по математическим методам их описания. На первом этапе моделирования вычисляются конфигурации поля (распределения углов ориентации) молекул ЖК в электрическом поле, а на втором с использованием результатов вычислений первого этапа рассчитываются оптические характеристики всего устройства в целом. На третьем этапе вычисляются динамические характеристики ориентации директора ЖК, и в качестве последнего, четвертого этапа моделирование – вычисление динамики оптического отклика устройства на данное управляющее электрическое напряжение. Следует отметить, что четвертый этап

моделирования по сути решения задачи ничем не отличается от второго этапа, так как в первом случае распределение углов ориентации директора зависит от времени при заданном управляющем напряжении, а во втором случае распределение углов ориентации директора изменяются в зависимости от управляющего напряжения. В силу этого необходимо решать только задачи, которые связаны с первым, вторым и третьим этапами моделирования электрооптических эффектов в жидких кристаллах.

Для решения задачи первого этапа моделирования применяются либо подходы в предположении симметричности граничных условий, либо неустойчивые алгоритмы, для любого вида граничных условий, которые требуют больших вычислительных затрат и для использования в компьютерной системе мало пригодны. Поэтому нами разработан устойчивый и быстрый метод расчета конфигурации поля молекул ЖК в электрическом поле при произвольных граничных условиях.

При решении задач второго этапа моделирования, расчета оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК и ЖК - устройств отображения информации, широко используются различные методы матричной оптики. Наиболее востребованным в настоящее время является метод комплексных матриц  $4 \times 4$ , более известный под названием метода Берремана. Как известно этот метод позволяет точно учитывать специфику распространения света в слоистых анизотропных средах. Однако применение метода Берремана в целях компьютерного моделирования оптических характеристик ЖК - устройств ограничено тем, что этот формализм описывает распространение монохроматических волн и, следовательно, только когерентные взаимодействия между распространяющимися волнами в слоистой структуре ЖК. Поэтому последовательное применение метода Берремана встречается с некоторыми трудностями, связанными в первую очередь с огромными вычислительными затратами. Дальнейшее развитие метода Берремана на случай квазимонохроматического излучения для анизотропных слоистых сред было выполнено Яковлевым Д.А. Однако и этот метод, как и метод Берремана, требует большого числа вычислений. Другим матричным методом, который часто используется для моделирования оптических характеристик ЖК – устройств отображения информации, является метод матриц Джонса. Отметим, что, как правило, при использовании матричного метода Джонса рассматривается только нормальное падение света на устройство. Поэтому нами разработан иной подход к расчету оптических характеристик, учитывающего специфику распространения света в сложной слоистой анизотропной среде при любых углах падения света на ЖК - ячейку. Кроме этого следует отметить, что большинство авторов при решении задачи о распространении световой волны через слоистые неоднородные анизотропные структуры используют только какой – либо один матричный формализм, что не всегда является наилучшим выбором как с точки зрения

точности вычислений, так и с точки зрения вычислительных затрат. Кроме этого нами предложена адекватная модель ЖК - ячейки, которая позволяет при соответствующих методах расчета количественно верно описывать оптические характеристики ЖК - устройств отображения информации, так как прежняя модель ЖК - ячейки, которая обычно использовалась в расчетах, не учитывала ее реальную конструкцию и как следствие не давала количественно верного описания.

Далее заметим, что в настоящее время хотя и существуют несколько компьютерных систем моделирования характеристик электрооптических эффектов в ЖК и ЖК- устройствах отображения информации, например, DIMOS или Mouse - LCD, но эти системы ориентированы на использование операционных систем семейства Windows, что существенным образом сказывается на применении этих систем в России или научных группах, которые используют другие операционные системы. Поэтому нами разработан комплекс программ по моделированию характеристик электрооптических эффектов в ЖК и ЖК - устройствах отображения информации различного типа, который работает на основе различных операционных систем.

Следует заметить, что современные системы отображения информации на ЖК в своей конструкции используют различные электрооптические эффекты в ЖК, поэтому возникает вопрос о принципе, на основе которого существенным образом улучшить оптические характеристики индикаторов. В связи с этим в пособии представлены результаты компьютерного моделирования характеристик всевозможных конструкций индикаторов и способы улучшения их характеристик.

Еще одна проблема, которую приходится решать при разработке ЖК - систем отображения информации, связана с быстродействием этих эффектов. Известно большое количество работ, в которых проводится исследование влияния параметров ЖК и ЖК - ячейки на быстродействие эффектов. Однако во всех предыдущих исследованиях временные характеристики рассматривались в отрыве от крутизны вольт - контрастной кривой эффекта. В то же время, как известно, для устройств отображения информации одновременно важными являются как крутизна вольт - контрастной кривой, так и времена переключения между двумя "рабочими" состояниями. В этой связи нами выполнено исследование влияния рабочих напряжений на времена оптического отклика различных устройств и установлена аналитическая связь между значениями рабочих напряжений и временем срабатывания устройства, а также получена простая аналитическая связь между временем реакции и степенью мультиплексирования пассивного матричного ЖК-дисплея.

Поэтому задачи настоящей книги состоят в следующем:

- 1) описание матричных методик расчета характеристик пропускания и отражения неоднородных анизотропных сред, включая биологические среды;
- 2) описание программного комплекса для моделирования электрооптических характеристик устройств отображения информации на жидких кристаллах и выработка принципов построения подобных программных комплексов;
- 3) исследование различных устройств отображения информации на жидких кристаллах и выработка принципов, позволяющих улучшить характеристики этих устройств;
- 4) исследование динамических характеристик жидкокристаллических устройств отображения информации при различных управляющих напряжениях;

Пособие состоит из введения, четырех глав и списка рекомендуемой литературы.

## Глава 1. Основные сведения из физики жидких кристаллов

Первым, кто обнаружил в 1888 году жидкие кристаллы (ЖК), был австрийский ученый-ботаник Рейнитцер. Исследуя новое синтезированное им вещество холестерилбензоат, он обнаружил, что при температуре  $145^{\circ}\text{C}$  кристаллы этого вещества плавятся, образуя мутную, сильно рассеивающую свет жидкость. При продолжении нагрева по достижении температуры  $179^{\circ}\text{C}$  жидкость просветляется, т. е. начинает вести себя в оптическом отношении как обычная жидкость. Неожиданные свойства холестерилбензоат обнаруживал в мутной фазе. Рассматривая эту фазу под поляризационным микроскопом, Рейнитцер обнаружил, что она обладает двулучепреломлением.

Явление двулучепреломления - это типично кристаллический эффект, состоящий в том, что скорость света в кристалле зависит от ориентации плоскости поляризации света. Существенно, что она достигает экстремального (максимального и минимального) значений для двух взаимно ортогональных ориентаций плоскости поляризации. Ориентации поляризации, соответствующие экстремальным значениям скорости света в кристалле, определяются анизотропией свойств кристалла и однозначно задаются ориентацией кристаллических осей относительно направления распространения света..

Поэтому сказанное поясняет, что существование двулучепреломления в жидкости, которая должна быть изотропной, т.е. что ее свойства должны быть независимыми от направления, представлялась парадоксальным. Наиболее правдоподобным в то время объяснением могло казаться наличие в мутной фазе нерасплавившихся малых частичек кристалла, кристаллитов, которые и являлись источником двулучепреломления. Однако более детальные исследования, к которым Рейнитцер привлек известного немецкого физика Лемана, показали, что мутная фаза не является двухфазной системой, т.е. не содержит в обычной жидкости кристаллических включений, а является новым фазовым состоянием вещества. Этому фазовому состоянию Леман дал название “жидкий кристалл” в связи с одновременно проявляемыми им свойствами жидкости и кристалла. Это - “мезофаза”, что буквально означает “промежуточная фаза”.

Уже в первые годы после открытия ЖК были выяснены многие другие удивительные свойства ЖК. Так, некоторые виды ЖК обладали необычно высокой оптической активностью. Оптической активностью называется способность некоторых веществ вращать плоскость поляризации проходящего через них света. Это означает, что линейно поляризованный свет, распространяясь в таких средах, изменяет ориентацию плоскости поляризации. Причем угол поворота плоскости поляризации прямо пропорционален пути.

Удивительными были также и другие свойства, такие, как сильная температурная зависимость названных характеристик, их очень высокая чувствительность к внешним магнитным и электрическим полям и т.д. Но прежде чем пытаться объяснить перечисленные свойства, необходимо понять, как устроены ЖК, и, в частности, ознакомиться с их структурными свойствами, т.к. в конечном итоге для объяснения описанных свойств наиболее существенным оказываются именно структурные характеристики ЖК.

В начале двадцатого века немецкий химик Д. Форлендер в университетском городке Галле совместно со своими учениками изучал химию ЖК. Он пытался ответить на вопрос, какими свойствами должны обладать молекулы вещества, чтобы они имели жидкокристаллическую фазу. Форлендер нашел большое количество новых соединений, обладающих жидкокристаллической фазой, и внимательно исследовал свойства молекул соответствующих соединений, в частности структурные. В результате его работ стало ясно, что ЖК образуют вещества, молекулы которых имеют удлиненную форму.

В двадцатые годы нашего века Фридель предложил разделить все ЖК на две большие группы. Одну группу ЖК Фридель назвал нематическими, другую смектическими. Он же

предложил общий термин для ЖК - “мезоморфная фаза”. Этот термин происходит от греческого слова “мезос” (промежуточный), а, вводя его, Фридель хотел подчеркнуть, что ЖК занимают промежуточное положение между истинными кристаллами и жидкостями, как по температуре, так и по своим физическим свойствам.

Когда классификация ЖК была создана, более остро встал вопрос: почему в природе реализуется жидкокристаллическое состояние? Полным ответом на подобный вопрос принято считать создание микроскопической теории. Но в то время на такую теорию не приходилось надеяться (кстати, последовательной микроскопической теории ЖК не существует и по сей день), поэтому большим шагом вперед было создание чешским ученым Х. Цохером и голландцем С. Озееном феноменологической теории ЖК, или, как ее принято называть, теории упругости ЖК.

Современный этап изучения ЖК, который начался в 60-е годы и придал науке о ЖК сегодняшние формы, методы исследований, широкий размах работ, сформировался под непосредственным влиянием успехов в технических приложениях ЖК, особенно системах отображения информации. Устройства отображения информации на основе ЖК естественным образом вписываются в энергетику и габариты микроэлектронных схем. Они потребляют ничтожные мощности и могут быть выполнены в виде миниатюрных индикаторов или плоских экранов. Все это предопределило массовое внедрение ЖК-устройств в системы отображения информации. Чтобы это осознать, достаточно вспомнить о наручных электронных часах, микрокалькуляторах, переносных автономных персональных компьютерах типа лэп-топ, миниатюрные телевизионные приемники и другие устройства.

### **1.1 Классификация жидких кристаллов и их основные физические свойства**

Жидкий кристалл - это специфическое агрегатное состояние вещества, в котором оно проявляет одновременно свойства кристалла и жидкости. Сразу надо оговориться, что далеко не все вещества могут находиться в жидкокристаллическом состоянии. Большинство веществ может находиться только в трех, всем хорошо известных агрегатных состояниях: твердом или аморфном, жидком и газообразном. Оказывается, что некоторые органические вещества, состоящие из сложных молекул, могут образовывать четвертое агрегатное состояние - жидкокристаллическое. Это состояние осуществляется при плавлении кристаллов некоторых веществ. При их плавлении образуется жидкокристаллическая фаза, отличающаяся от обычных жидкостей. Эта фаза существует в интервале от температуры плавления кристалла до некоторой более высокой температуры, при нагреве до которой ЖК переходит в обычную жидкость. Такие ЖК называются термотропными.

Чем же ЖК отличается от жидкости и обычного кристалла и чем подобен им? Подобно обычной жидкости, ЖК обладает текучестью и принимает форму сосуда, в который он помещен. Этим он отличается от известных кристаллов. Однако несмотря на это свойство, объединяющее его с жидкостью, он обладает свойством, характерным для кристаллов. Это - упорядочение в пространстве молекул, образующих кристалл. Правда, это упорядочение не такое полное, как в обычных кристаллах, но, тем не менее, оно существенным образом влияет на свойства ЖК, чем отличает их от обычных жидкостей и придает им специфические оптические свойства, присущие твердым кристаллам. Неполное пространственное упорядочение молекул, образующих ЖК, проявляется в том, что в ЖК нет полного порядка в пространственном расположении центров тяжести молекул, хотя частичный порядок может быть. Это означает, что у них нет жесткой кристаллической решетки. Поэтому ЖК, подобно обычным жидкостям, обладают свойством текучести.

Обязательным свойством ЖК, сближающим их с обычными кристаллами, является наличие порядка в пространственной ориентации молекул. Такой порядок в ориентации

может проявляться, например, в том, что все длинные оси молекул в жидкокристаллическом образце ориентированы одинаково. Эти молекулы должны обладать вытянутой формой. Пример модели молекул холестерилнонаноата, образующих ЖК - фазу, показан на рис. 1. Кроме простейшего названного упорядочения осей молекул, в ЖК может осуществляться более сложный ориентационный порядок молекул.

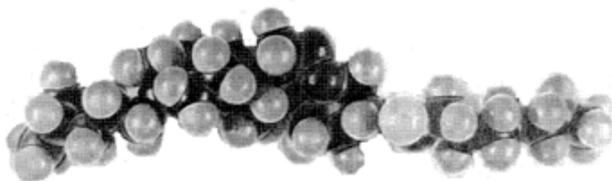


Рис. 1. Модель молекулы холестерилнонаноата, образующей жидкий кристалл

В зависимости от вида упорядочения осей молекул ЖК разделяются на три разновидности: нематические, смектические и холестерические. На рис. 2 дано схематическое изображение упаковки молекул, представленных в виде жестких стержней, в ЖК различных типов.



Рис. 2 Схематичное изображение различных типов ЖК: нематический ЖК (а); холестерический ЖК (б); смектический ЖК (в).

Нематические ЖК (НЖК) характеризуются дальним ориентационным порядком и полной свободой перемещения центров тяжести отдельных молекул в пространстве. НЖК представляют собой оптически одноосную среду, кристаллографическая структура которой неполярна, т.е. направления концевых групп молекул имеют равновероятностное распределение вдоль длинных осей молекул и в противоположном направлении. К тому же молекулы вращаются вокруг длинной оси. Неориентированные образцы в какой-то мере аналогичны поликристаллическим твердым порошкам: они состоят из отдельных (жидких) кристаллитов, каждый из которых имеет определенным образом направленную оптическую ось, совпадающую с осью преимущественной ориентации молекул в данном кристаллите. Границы между кристаллитами расплывчаты и выглядят в поляризационный микроскоп как темные нити на светлом фоне. Кристаллиты обладают положительным двулучепреломлением.

Внешним воздействием (например, за счет соответствующей обработки стенок, ограничивающих образец) можно создать однородную ориентацию молекулярных осей по

всему образцу в целом, получив, таким образом, жидкокристаллический монокристалл, оптические свойства которого важны для практических приложений. Мы будем изучать оптические свойства ориентированных образцов ЖК.

Холестерические ЖК (ХЖК) образованы оптически активными молекулами и отличаются тем, что направление длинных осей молекул в каждом последующем слое, состоящем из параллельно направленных молекул, составляет с направлением осей молекул предыдущего слоя некоторый угол. При этом образуется спираль, шаг которой зависит от природы молекул и внешних воздействий. Шагу спирали соответствует поворот оси ориентации молекул на  $360^\circ$ .

Для всех смектических ЖК (СЖК) характерна слоистая структура. СЖК типа А представляет собой свободно перемещающиеся относительно друг друга слои, поверхности которых образованы концевыми группами молекул, расположенных перпендикулярно к плоскости слоя, но взаимно параллельно. Внутри слоя молекулы не имеют трансляционного порядка и могут перемещаться в двух направлениях и вращаться вокруг длинной оси.

Для характеристики дальнего упорядочения в ЖК введем понятие директора. Директором в НЖК называется единичный вектор  $\vec{n}$ , задающий преимущественную ориентацию длинных осей молекул ЖК. Однородно ориентированный образец НЖК является одноосным кристаллом с оптической осью, направленной по вектору  $\vec{n}$ . Мерой упорядочения ориентации молекул в НЖК является параметр, называемый параметром ориентационного порядка  $S$ . Для твердого кристалла  $S = 1$ , для изотропной жидкости  $S = 0$ , для ЖК он принимает промежуточное значение.

Физические свойства ЖК различны в различных направлениях. Их удобно приводить к направлениям, параллельному ( $e$ ) и перпендикулярному ( $o$ ) директору ЖК. Для нас наиболее важными являются следующие физические характеристики ЖК:

- составляющие диэлектрической проницаемости ЖК  $\epsilon_e$  и  $\epsilon_o$  (или соответственно  $\epsilon_{//}$  и  $\epsilon_{\perp}$ );
- составляющие показателей преломления  $n_e$  и  $n_o$  ( $n_{//}$  и  $n_{\perp}$ ) и коэффициентов поглощения  $k_e$  и  $k_o$  ( $k_{//}$  и  $k_{\perp}$ ).

Положение директора ЖК задается внешними воздействиями: стенками, контактирующими с ЖК; направлением электрических и магнитных полей. Основой большинства специфических электрооптических эффектов в ЖК является переориентация директора ЖК (всего макрообъема вещества) под действием электрического поля. Первопричиной переориентации является анизотропия электрических свойств ЖК, но ход процесса зависит также в сильной степени от анизотропии вязкоупругих свойств и исходной ориентации молекул ЖК относительно поля. Результатом переориентации является изменение оптических свойств. Среды теперь уже вследствие ее оптической анизотропии. Этот главный процесс переориентации директора ЖК обуславливает всю необычность поведения ЖК во внешних электрических полях. При значении анизотропии диэлектрической проницаемости  $\Delta\epsilon = \epsilon_e - \epsilon_o > 0$  директор НЖК стремится встать вдоль направления вектора электрического поля, а при  $\Delta\epsilon < 0$  - перпендикулярно ему. Если при  $\Delta\epsilon > 0$  и в начальном состоянии директор не был параллелен вектору электрического поля, то при определенном значении величины электрического поля произойдет переориентация директора ЖК. Эффект переориентации директора ЖК во внешнем электрическом поле носит название перехода Фредерикса. Этот эффект применяется во всех промышленно выпускаемых системах отображения и обработки информации на основе ЖК.

Для наблюдения электрооптических эффектов в ЖК необходимо изготовить специальную ячейку. Эта ячейка представляет собой плоский капилляр, выполненный в виде двух плоскопараллельных стеклянных пластин, на внутренние стороны которых последовательно наносятся проводящие и ориентирующие слои, а на внешние поверхности

могут быть наклеены поляроидные пленки. ЖК-ячейка заполняется НЖК с положительной диэлектрической анизотропией. Как отмечалось выше, все электрооптические эффекты в ЖК основаны на способности ориентированного слоя ЖК менять свои физические свойства, в том числе и оптические, под действием внешнего электрического поля, приложенного к управляющим электродам. На рис. 3 показан пример поведения ЖК во внешнем электрическом поле. На левой половине рисунка показан невозмущенный слой ЖК, когда электрическое поле (напряжение  $U = 0$  В) равно нулю, а на правой половине этого рисунка показан деформированный электрическим полем (управляющее напряжение  $U = 3$  В) слой ЖК. Так как оптические свойства ЖК зависят от ориентации его молекул, то очевидно, что два состояния ЖК при  $U = 0$  В и при  $U = 3$  В, показанные на разных половинах рисунка, оптически различимы. Этот принцип используется всеми устройствами отображения информации на ЖК.

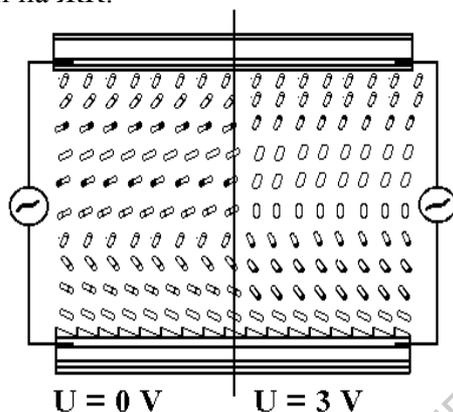


Рис. 3. Поведение однородного слоя НЖК во внешнем электрическом поле.

## 1.2 Управляемое полем двойное лучепреломление в жидких кристаллах

Как известно, однородно ориентированный слой НЖК эквивалентен по оптическим свойствам одноосному твердому кристаллу. Для исследования оптических свойств ЖК используются ориентированные образцы НЖК, которые заключены в специально изготовленные ячейки (ЖК-ячейки). Схематично такая ячейка показана на рис.4.

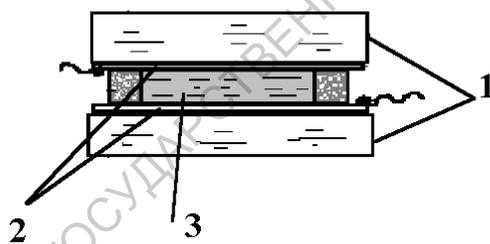


Рис. 4 Устройство ячейки с жидким кристаллом для исследования электрооптических эффектов  
1 - стеклянные пластины с наклеенными на них поляроидами; 2 - электродные и ориентирующие слои; 3 - жидкий кристалл

Электрооптические свойства НЖК позволяют использовать его для управления светопропусканием через пару скрещенных поляризаторов, т.е. ориентированных относительно таким образом, чтобы имело место соответственно минимальное или максимальное пропускание ими естественного света. В основе управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в НЖК лежит:

- особенность распространения естественного света через систему, состоящую из двух поляризаторов, между которыми помещен одноосный ЖК;
- способность директора ЖК к переориентации под действием электрического поля.

Рассмотрим случай распространения через одноосный ЖК плоской монохроматической линейно поляризованной световой волны, падающей по нормали к его поверхности перпендикулярно оптической оси ЖК так, что направление вектора напряженности электрического поля волны  $\vec{E}$  составляет с ней некоторый угол (рис.5). В

этом случае световой луч, входя в слой НЖК, директор которого параллелен поверхности пластин ЖК-ячейки, разделится на два - обыкновенный с показателем преломления  $n_o$  и необыкновенный с  $n_e$  - распространяющиеся с различной скоростью и когерентные между собой по всем признакам. После прохождения волнами слоя ЖК, вследствие различия в скоростях распространения волн, между ними возникает оптическая разность хода, равная  $(n_e - n_o) \cdot L$  (здесь  $L$  - толщина слоя ЖК), приводящая к разности фаз

$$\Delta = 2\pi \cdot (n_e - n_o) \cdot L / \lambda.$$

Так как за слоем НЖК расположен второй поляризатор, то он пропустит только компоненты этих колебаний, поляризованные в одном направлении, которые могут интерферировать между собой. Результат интерференции - световой поток на выходе системы - будет определяться разностью фаз  $\Delta$ .

Таким образом, передний поляризатор системы создает поляризованный свет; слой НЖК обеспечивает разложение поляризованного света на необыкновенную и обыкновенную волны и создает разность фаз между ними; задний поляризатор, пропуская колебания, совершающиеся только в одном направлении, обуславливает возможность их интерференции. Получим выражение для интенсивности результирующей волны на выходе заднего поляризатора.

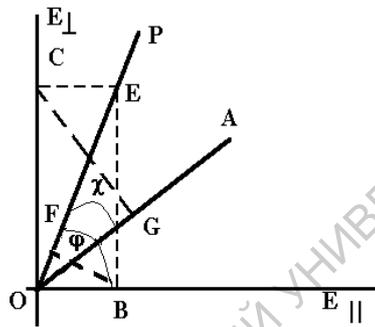


Рис. 5 Прохождение света через два поляризатора с пластиной одноосного ЖК между ними: поверхность поляризаторов и пластины одноосного ЖК лежат в плоскости рисунка

Пусть (рис. 11) ОР и ОА - направления колебаний вектора  $E$  световой волны, которые пропускаются соответственно передним и задним поляризаторами системы. Если вектор  $\vec{E}$  после прохождения светом переднего поляризатора равен  $OE$  и составляет угол  $\varphi$  с направлением оптической оси, совпадающей с направлением  $E //$ , то его составляющие в направлениях  $E //$  и  $E \perp$  соответственно равны  $OB = E \cdot \cos \varphi$  и  $OC = E \cdot \sin \varphi$ . Задний поляризатор пропустит составляющие этих колебаний только в направлении, параллельном ОА. Их амплитуды будут соответственно равны:

$$OF = E \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\varphi - \chi) \text{ и } OG = E \cdot \sin \varphi \cdot \sin(\varphi - \chi).$$

Результирующая интенсивность интерферирующих двух когерентных монохроматических волн с разностью фаз  $\Delta$  может быть записана в виде:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta,$$

где  $I_1$  и  $I_2$  - интенсивности, пропорциональные квадратам амплитуд этих волн.

Таким образом, можно записать

$$I = E^2 \cdot (\cos^2 \chi - \sin 2\varphi \sin 2(\varphi - \chi) \sin^2 \Delta / 2),$$

где вторым членом определяется влияние одноосного ЖК (при  $\Delta = 0$  это соотношение переходит в закон Малюса).

Проанализируем обычно используемые на практике схемы наблюдения двулучепреломления в ЖК: поляризаторы параллельны друг другу ( $\chi = 0$ ) и поляризаторы скрещены ( $\chi = 90^\circ$ ).

В параллельных поляризаторах интенсивность света, прошедшего через систему, будет задаваться следующим выражением:

$$I = E^2 (\cos^2 \chi - \sin^2 2\varphi \sin^2 \Delta/2).$$

Чтобы реализовать максимальный эффект от изменения  $\Delta$ , необходимо положить  $\varphi = \pi/4$  (т.е. входной и выходной поляризаторы должны быть сориентированы под углом  $45^\circ$  к оптической оси НЖК), тогда

$$I = E^2 \cdot \cos^2 \Delta/2.$$

В этом случае для такой системы можно реализовать режим работы от полного пропускания до полного гашения света при изменении фазовой задержки  $\Delta$  в НЖК.

При скрещенных поляризаторах ( $\chi = \pi/2$ ) интенсивность прошедшего света будет иметь вид:

$$I = E^2 \cdot \sin^2 2\varphi \sin^2 \Delta/2.$$

Сравнение двух этих случаев показывает, что возникающие при этом интерференционные картины будут дополнительными друг к другу. Максимальный эффект изменения разности фаз также достигается при  $\varphi = \pi/4$ , а максимумам пропускания для параллельных поляризаторов соответствуют минимумы пропускания для скрещенных поляризаторов, и наоборот.

Рассмотрим теперь эту оптическую систему с учетом возможной переориентации директора НЖК с помощью электрического поля. Пусть по нормали к ней падает пучок монохроматических лучей. В качестве исходной ориентации директора НЖК примем ориентацию, когда директор ЖК однородно во всем объеме ячейки ориентирован параллельно стеклянным пластинам (планарная ориентация) и ЖК имеет положительную диэлектрическую анизотропию. Внешнее электрическое поле, приложенное к электродам ЖК-ячейки, при превышении некоторого порогового значения, заставляет ориентироваться директор НЖК вдоль поля. При этом внутри ЖК-ячейки директор наклонен к поверхности стенок сильнее, ближе к стеклянным стенкам слабее, а вблизи стенок директор вообще не изменяет своей ориентации (см. рис.3). При достаточно высоких напряжениях электрического поля на электродах ЖК-ячейки (до десятков вольт) директор ЖК меняет свою ориентации по всей толщине ЖК-ячейки, за исключением очень тонкого пристеночного слоя.

В исходном состоянии через слой НЖК распространяются две волны с различными скоростями и фазовая задержка между обыкновенной и необыкновенной волнами максимальна ( $\Delta = \Delta_m$ ). По мере увеличения управляющего напряжения величина фазовой задержки в ЖК уменьшается и интенсивность прошедшего через систему света изменяется. В предельном случае, когда директор НЖК полностью переориентировался, через слой ЖК распространяются две волны с одинаковой скоростью, так как волны в этом случае распространяются вдоль оптической оси и фазовая задержка между волнами равна 0. При промежуточных значениях управляющего напряжения разность фаз между необыкновенной и обыкновенной волнами в ЖК также принимает промежуточное значение между  $\Delta_m$  и 0. При этом интенсивность прошедшего через систему света будет периодически меняться от полного пропускания до полного гашения. Такой электрооптический эффект, наблюдаемый в НЖК, называется S - эффектом.

Если систему освещать не монохроматическим светом, а белым (естественным), то режим пропускания или гашения будет реализовываться для какой-либо одной длины волны, и таким образом прошедший свет не будет белым. На таком принципе осуществляется

цветовая индикация и созданы цветные системы отображения информации на основе жидких кристаллов.

### 1.3 Явление вращения плоскости поляризации света и твист – эффект в жидких кристаллах

Уникальные оптические свойства холестерических жидких кристаллов важны не только для практического использования в системах отображения информации, но в первую очередь они интересны для изучения различных оптических явлений в анизотропных средах. Одним из таких оптических явлений в ХЖК является оптическая активность закрученного слоя ЖК и как результат этого - уникальные оптические свойства таких систем. Когда белый свет падает на образец с планарной структурой (ось холестерической спирали перпендикулярна поверхностям ориентирующих стекол), происходит селективное отражение света, причем максимум длины волны отражения изменяется в зависимости от угла падения по закону Брэгга:

$$2p_0 \sin \varpi = m\lambda,$$

где  $p_0$  - шаг холестерической спирали,  $\varpi$  - угол падения света на ХЖК,  $\lambda$  - длина волны падающего света,  $m$  - порядок отражения.

При нормальном падении отраженный свет в значительной степени поляризован по кругу. Одна поляризованная по кругу компонента почти полностью отражается в спектральном интервале около 10 нм, тогда как другая проходит практически без изменений. В отличие от случая обычного отражения от однородной среды, отраженная от ХЖК волна имеет тот же знак круговой поляризации, что и падающая.

В направлении оси холестерической спирали среда обладает очень большим оптическим вращением, обычно порядка нескольких тысяч градусов на миллиметр. Такое поведение света, прошедшего через закрученную структуру ЖК, наблюдается, когда шаг спирали ЖК сравним с длиной волны падающего света или меньше его. В противном случае наблюдается так называемый волноводный режим, характеризуемый наличием двух линейно поляризованных волн с ортогональными направлениями поляризации. По мере распространения таких волн эти направления поляризации поворачиваются вслед за поворотом директора ЖК вдоль оси спирали. Именно волноводный режим светопрохождения ХЖК лежит в основе самого большого класса систем отображения информации на твист-эффекте.

Из-за большого практического значения и простоты наблюдения и реализации этого эффекта, в данной лабораторной работе предлагается изучить вращение плоскости поляризации света в ХЖК с большим шагом спирали и основные характеристики твист-эффекта в ЖК.

Рассмотрим распространение света вдоль оптической оси, когда длины волн гораздо меньше шага спирали, и поэтому селективным отражением Брэгга и интерференцией можно пренебречь. Действие системы эквивалентно чистому оптическому вращению. Для характеристики оптической активности вещества используют понятие удельного оптического вращения, которое определяется как оптическое вращение, отнесенное на единицу толщины оптически активного образца, т. е. если среда толщиной  $L$  поворачивает свет на угол  $\Phi$ , то удельное оптическое вращение  $\rho$  определяется как

$$\rho = \Phi/L.$$

Если число слоев на каждый виток спирали  $m$ ,  $m\beta = 2\pi$  и  $m\rho_0 = P$  (шаг спирали ХЖК), то удельное вращение в радианах на единицу длины равно

$$\rho = -\pi(n_e - n_o)^2 P / 4\lambda^2;$$

знак минус показывает, что направление вращения противоположно закручиванию винтовой структуре ХЖК. Обычно для холестериков  $(n_e - n_o) = 0,05$ ; полагая  $P = 5$  мкм, а  $\lambda = 500$  нм, получаем  $\rho = 2000^\circ \text{ мм}^{-1}$ .

С точки зрения использования закрученных структур ЖК в технике отображения и обработки информации важен другой случай, когда шаг спирали ЖК  $P \gg \lambda$ . Рассмотрим подробнее оптическое поведение такого ХЖК.

В этом случае в любой точке среды имеются две волны, линейно поляризованные вдоль локальных главных осей ЖК. Направления поляризации двух волн испытывают поворот в соответствии с поворотом главных осей нематика при перемещении волн вдоль оси кручения, в то же время разность фаз этих двух волн остается той же, что и в незакрученной нематической среде. Этот режим работы ЖК-ячейки с закрученным нематиком называется волноводным, или режимом Могена. Если вектор поляризации входящей волны совпадает с направлением ориентации молекул ЖК (директором ЖК) на входной поверхности закрученной (твист) - структуры, волна распространяется с фазовой скоростью  $c/n_e$  и на выходе остается линейно поляризованной. Волна, поляризованная перпендикулярно директору на входе твист- структуры, на выходе остается также линейно поляризованной. Если направление колебаний линейно поляризованной входной волны не совпадает с направлением директора и не перпендикулярно ему, то выходящая из ЖК-ячейки волна оказывается в общем случае эллиптически поляризованной. Обычно для реализации режима Могена используются ЖК с шагом спирали  $P$  не менее 10 мкм, и поэтому этот режим для такой ЖК- структуры осуществляется во всем видимом диапазоне излучения ( $\lambda = 390 - 720$  нм).

Рассмотрим закрученную структуру ЖК такую, что направление ориентации молекул ЖК на первой поверхности ячейки перпендикулярно направлению ориентации молекул ЖК на второй поверхности ячейки, а толщина ЖК-ячейки  $L$  не превышает  $P/4$  шага спирали ЖК (рис. 6). Такую ЖК-ячейку называют обычно твист-ячейкой. Если твист-ячейку помещают между двумя параллельными поляризаторами, то через такую систему в нормальном направлении свет не проходит. При наклонном падении света пропускание появляется, причем в зависимости от направления наклона (по одну и другую сторону от нормали) кривая оптического пропускания асимметрична (в одном случае имеются осцилляции, а в другом их нет). Если твист-ячейку помещают между скрещенными поляризаторами, то при нормальном падении света такая система имеет максимальное пропускание, а при наклонном падении света ее пропускание убывает. При этом, как и в предыдущем случае параллельных поляризаторов, кривая оптического пропускания асимметрична.

Описанное выше оптическое поведение закрученного слоя ЖК верно для случая нулевого внешнего электрического поля. При подаче управляющего электрического поля на электроды твист-ячейки волноводный режим нарушается. Рассмотрим этот случай. Пусть ЖК имеет положительную диэлектрическую анизотропию, тогда при подаче управляющего напряжения на ЖК слоя, молекулы ЖК будут стремиться повернуться по полю. Переориентация ЖК начинается только в том случае, когда управляющее напряжение превышает некоторое значение, которое называется пороговым напряжением перехода Фредерикса. Переориентация ЖК завершается (исключая очень тонкий слой ЖК вблизи электродов), когда молекулы ЖК по всей толщине ячейки станут параллельными полю. При этом весь слой ЖК теряет закрутку и перестает вращать плоскость поляризации света. Поэтому при достаточно больших управляющих напряжениях на электродах твист-ячейки ЖК-ячейка в параллельных поляризаторах становится прозрачной, а в скрещенных поляризаторах становится темной (свет не проходит). Такое изменение оптических свойств

твист-структуры ЖК путем управления электрическим напряжением на электродах ячейки называется твист-эффектом в ЖК.

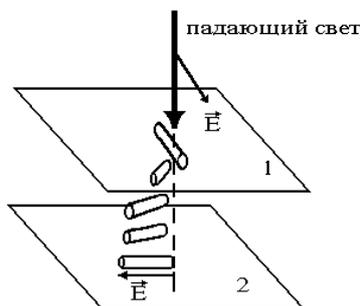


Рис. 6 Ориентация молекул ЖК в твист-ячейке и схема прохождения света через нее

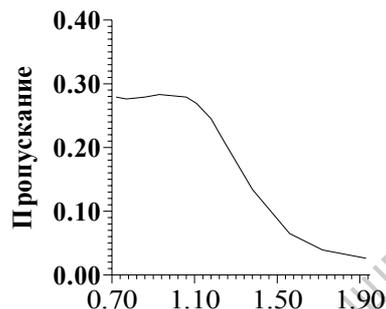


Рис. 7 Типичная зависимость пропускания от управляющего напряжения для твист-эффекта в ЖК (скрещенные поляризаторы)

Следует отметить, что изменения оптических свойств твист-структуры ЖК происходят при напряжении, превышаемом пороговое напряжение перехода Фредерикса. Это связано с тем, что для нарушения режима Могена необходима такая ориентация молекул ЖК, при которой молекулы ориентированы вдоль поля. Напряжение, при котором начинают наблюдаться оптические изменения, называется напряжением оптического порога. Как следует из выше сказанного, напряжение оптического порога для твист-эффекта в ЖК всегда выше, чем пороговое напряжение перехода Фредерикса. На рис. 7 приведен пример типичной зависимости пропускания твист-ячейки в скрещенных поляризаторах от управляющего напряжения. Следует отметить, что пороговое значение напряжения перехода Фредерикса зависит только от физических постоянных ЖК, в то время как напряжение оптического порога для твист-эффекта зависит от длины волны света, падающего на ЖК-ячейку. Поэтому нарушение режима Могена для более коротких длин волн наступает позже, при более тонких приэлектродных слоях, где происходит изменение закрутки ЖК структуры.

#### 1.4 Эффект «гость – хозяин» в жидких кристаллах

Существует большое число классов веществ, для которых поглощение света зависит от направления его распространения и его состояния поляризации. Явление изменения оптического пропускания (окраски) вещества в зависимости от направления распространения и состояния поляризации излучения, падающего на это вещество, получило название плеохроизма. Плеохроизм - одно из проявлений оптической анизотропии. Плеохроизм обусловлен в частности анизотропией поглощения излучения, падающего на вещество, которое в свою очередь зависит от длины волны падающего света. Плеохроизм наблюдают в твердых и жидких кристаллах. Наиболее известным веществом, ярко демонстрирующим явление плеохроизма, является кристалл турмалина. В жидких кристаллах чаще наблюдают явление дихроизма, т. е. ЖК характеризуется двумя коэффициентами экстинкции для света с различным состоянием поляризации. Так, у одноосных кристаллов, к которым относятся и ЖК, различают два главных коэффициента экстинкции, которым соответствуют два различных по пропусканию оптических состояния: когда свет распространяется с направлением поляризации вдоль оптической оси и перпендикулярно к ней соответственно. На рис. 8 изображены спектры пропускания дихроичного вещества, например ЖК, для света с направлением поляризации вдоль оптической оси (спектр  $T_e$ ) и с направлением поляризации перпендикулярно оптической оси (спектр  $T_o$ ). В ЖК явление дихроизма особенно интересно тем, что можно осуществлять переключение между двумя состояниями с различными

спектрами пропускания, подавая на ЖК внешнее управляющее напряжение, т. е. наблюдая переход Фредерикса. На этом принципе работают многие цветные устройства отображения информации на ЖК.

Рассмотрим более подробно явление дихроизма в ЖК. Пусть мы имеем ЖК-ячейку с нематическим ЖК, обладающим положительной диэлектрической анизотропией. Современные ЖК в видимой части спектра не имеют собственных полос поглощения, и поэтому к ЖК добавляют небольшое количество дихроичного красителя (1 - 2% по весу), который имеет собственную полосу поглощения в видимой области спектра электромагнитных волн (см. рис. 8). В этом случае ЖК-вещество называется “хозяином”, а дихроичный краситель называется “гостем”. Молекулы “гостя” имеют форму сильно вытянутого эллипсоида вращения и очень похожую на форму молекул “хозяина”, поэтому если ЖК ориентирован каким-либо образом, то и молекулы дихроичного красителя ориентированы точно так же. Обычно осцилятор поглощения молекул дихроичного красителя параллелен длинной оси молекулы. В силу того, что молекулы красителя имеют направление преимущественной ориентации точно такое же, как и молекулы ЖК (напомним что, направление преимущественной ориентации молекул ЖК носит название директора), то и вся ЖК-ячейка с дихроичным красителем будет поглощать свет, поляризованный вдоль директора, и не будет поглощать свет поляризованный перпендикулярно директору. Так как упорядочение длинных осей молекул ЖК и красителя не идеально, то в целом такая ЖК-ячейка будет поглощать свет, поляризованный вдоль директора и перпендикулярно к нему с различными коэффициентами экстинкции. Пропускание света растворами дихроичных красителей в ЖК для двух случаев, когда направление поляризации падающего света совпадает с направлением ориентации длинных осей молекул ЖК и красителя ( $e$ ) и перпендикулярно ему ( $o$ ), можно определить в виде

$$T_e = \exp(-k_e L);$$

$$T_o = \exp(-k_o L),$$

где  $k_o$  и  $k_e$  - коэффициенты экстинкции для света с направлениями поляризации перпендикулярно и параллельно длинной оси молекул ЖК соответственно;  $L$  - толщина ЖК-ячейки.

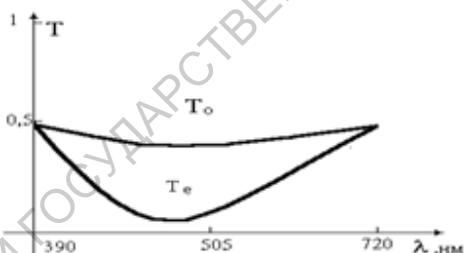


Рис. 8 Явление дихроизма. Спектры пропускания ЖК для света поляризованного вдоль оптической оси ( $T_e$ ) и перпендикулярно ей ( $T_o$ )

На рис. 9 изображена обычная электрооптическая ЖК-ячейка с планарной ориентацией НЖК, обладающего положительной диэлектрической анизотропией. В “хозяине” растворен “гость”. В отсутствие управляющего поля пропускание ЖК-ячейки различно для поляризаций света вдоль директора ЖК и перпендикулярно ему. Для неполяризованного света, падающего на такую систему, пропускание  $T$  будет равно

$$T = (T_e + T_o) / 2.$$

При наложении на ячейку электрического напряжения, превышающего порог эффекта Фредерикса, жидкий монокристалл переориентируется директором вдоль поля, увлекая за собой молекулы красителя. При достаточно большом поле пропускание света  $T$  любой поляризации становится одинаковым и равно

$$T = T_0.$$

Таким образом, имеет место изменение оптического пропускания ЖК - ячейки для света, поляризованного вдоль исходного положения директора ЖК. Этот электрооптический эффект носит названия эффекта “гость - хозяин”.

Физическими параметрами, описывающими эффект “гость - хозяин”, являются оптические плотности  $D_e = \log(1/T_e)$ ,  $D_o = \log(1/T_o)$ , а также дихроичное отношение красителя  $\mu = D_e/D_o$  и параметр ориентационного порядка дихроичного красителя  $S_{\text{крас}}$ , растворенного в ЖК. Этот параметр порядка  $S_{\text{крас}}$  не совпадает с ориентационным параметром порядка самого ЖК и является физической характеристикой дихроичного красителя, который экспериментально определяется через его оптические плотности  $D_e$  и  $D_o$  следующим образом

$$S_{\text{крас}} = (D_e - D_o)/(D_e + 2D_o).$$

Эффект “гость-хозяин” в ЖК может наблюдаться как при освещении ЖК-ячейки естественным светом, так и при освещении его поляризованным светом. В последнем случае контраст будет выше. При этом входной поляризатор должен быть ориентирован так, чтобы ось максимального пропускания была параллельна ориентации молекул ЖК. Если эффект “гость-хозяин” наблюдать в лазерном свете, то входной поляризатор не требуется.

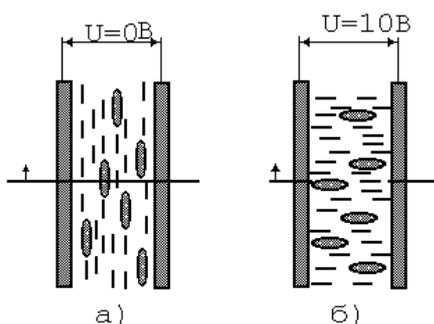


Рис. 9 Эффект “гость - хозяин” в ЖК. Ориентация молекул красителя в отсутствие электрического поля (а) и при наличии поля, существенно превышающего пороговое (б). Маленькими стрелками обозначены направления поляризации падающего на ЖК-ячейку излучения.

## Глава 2. Моделирование электрооптических эффектов в жидких кристаллах

Основной областью практического применения жидких кристаллов являются различные системы отображения информации, которые используют различные электрооптические эффекты в них. С первых шагов создания систем отображения информации на ЖК стало очевидным, что прогресс в области применения электрооптических эффектов в ЖК невозможен без детального анализа физических свойств ЖК и разработки соответствующих теоретических и экспериментальных методов исследования ЖК.

При проектировании ЖК – устройств отображения информации возникают проблемы, связанные со сложной картиной неоднородного электрооптического отклика ЖК на управляющее поле и с непростым преобразованием поляризационных и спектральных характеристик световых волн в анизотропной и неоднородной среде. На электрооптические характеристики даже простейшего ЖК – индикатора влияют десятки физических и конструктивных параметров устройства, что, с одной стороны, допускает разнообразные решения при проектировании ЖК – дисплеев, а с другой – заставляет выделять наиболее важные связи, строить модели и разрабатывать компьютерные средства для моделирования и оптимизации характеристик ЖК – систем отображения информации. В подавляющем большинстве случаев компьютерное моделирование оказывается одним из ключевых этапов новых устройств, как было в истории разработки супертвистовых высокоинформативных дисплеев.

При создании промышленных индикаторов и дисплеев с использованием нематохолестерических ЖК были предусмотрены необходимые физические исследования и работы по созданию системы компьютерного проектирования ЖК – дисплеев. В рамках континуальной теории ЖК – состояния разработаны методики вычисления для определения статических и динамических электрооптических характеристики ЖК – слоев, позволяющие учесть все существенные факторы и нашедшие реальное применение в инженерной и исследовательской практике. Особое внимание было уделено развитию матричных методов описания распространения световых волн в ЖК – слоях и других элементах ЖК – индикаторов. Найдены новые возможности повышения эффективности приближенных методов комплексных матриц  $2 \times 2$  с точки зрения задач моделирования и оптимизации ЖК – индикаторов.

С использованием результатов вышеупомянутых исследований созданы хорошо зарекомендовавшие себя в практике системы компьютерного моделирования характеристик электрооптических эффектов в ЖК – устройствах отображения информации, отличающиеся широкими возможностями по числу решаемых задач и высоким быстродействием, обеспечивающим работу в реальном масштабе времени.

Оптические эффекты в ЖК обусловлены изменениями ориентационного поля директора, которое в настоящее время можно определять, за редким исключением с помощью измерений, а в основном теоретически. Из – за сильной нелинейности уравнений и их зависимости от большого числа параметров методы расчета поля директора в ЖК – слое первоначально были разработаны только для частных случаев и в основном для статических равновесных конфигураций. Кроме того, эти схемы расчета как правило, не обеспечивали достаточного быстродействия, необходимого для инженерного моделирования ЖК – дисплеев. Поэтому решалась задача разработать по возможности быстродействующий универсальный метод расчета поля директора в ЖК – ячейках, пригодный для различных типов ориентаций ЖК и различных граничных условий. После усовершенствований расчетов методом численного интегрирования дифференциальных уравнений и обобщения метода нелинейных уравнений, порождаемых первыми интегралами исходных дифференциальных уравнений, на случай несимметричных нежестких граничных условий была получена возможность найти общий устойчивый и быстрый метод вычисления одномерных распределений углов ориентации директора ЖК в электрическом поле при произвольных граничных условиях на подложках. Кроме того, был разработан достаточно устойчивый

метод численного решения динамических уравнений для изменения ориентации ЖК в электрическом поле для произвольных граничных условий. Найдена простая формула для оценки времени реакции ЖК от управляющего напряжения и объяснена трудность реализации одновременно больших значений крутизны вольт – контрастной кривой и малых времен реакции и релаксации сверхзакрученных структур.

С помощью модифицированных применительно к наклонному падению матриц Мюллера и Джонса рассчитывались индикатрисы пропускания и контраста, а затем сравнивались с экспериментально определенными данными. Было установлено, что для моделирования оптических характеристик индикаторов необходимо учитывать френелевские отражения от поверхности ЖК – индикатора и не идеальность поляроидов, а также существенную роль играет многолучевая интерференция в электродных и проводящих слоях. В то же время было установлено, что интерференция в слое ЖК несмотря на его малую толщину не наблюдается в индикаторах при освещении его естественным светом. Поэтому была разработана эффективная методика расчета светопропускания на основе матриц Джонса и Абелеса, отвечающая требованиям инженерной практики проектирования ЖК – индикаторов. Остановимся подробнее на каждом этапе моделирования отдельно.

### 2.1 Метод вычисления одномерного распределения углов ориентации директора жидкого кристалла, находящегося во внешнем электрическом поле

В большинстве жидкокристаллических (ЖК) устройств используются эффекты, основанные на переориентации директора монокристалла ЖК электрическим полем, например, управляемое полем двойное лучепреломление в закрученных, сверхзакрученных и незакрученных структурах нематического и немато-холестерического ЖК (НХЖК), твист-эффект и эффект "гость-хозяин". Для исследования этих эффектов важно уметь теоретически изучать переориентацию молекул монослоя ЖК в электрическом поле, для чего необходимо разработать физические модели и соответствующие математические методы и численные методики расчета переориентации директора ЖК в электрическом поле. Подобные задачи решались многими авторами при различных ограничениях, главным из которых является предположение о симметричности граничных условий в ЖК-ячейке. Решение задачи при произвольных граничных условиях сопряжено с трудностями, в первую очередь связанными с неустойчивостью алгоритма решения к заданию начального приближения, следствием чего является большое количество вычислений и малое быстродействие вычислительных программ. Нами предлагается быстродействующая численная методика расчета переориентации директора монослоя ЖК немато-холестерика в электрическом поле для граничных условий общего вида.

Рассмотрим плоскопараллельный слой ЖК (ЖК - ячейку), заполненный НХЖК смесью с положительной диэлектрической анизотропией и помещенный в электрическое поле  $\vec{E}$ , приложенное перпендикулярно поверхности капилляра. Для описания ориентации ЖК в электрическом поле выберем декартову систему координат так, что ось  $Z$  направлена перпендикулярно ориентирующим поверхностям, а ось  $X$  совпадает с проекцией директора ЖК на плоскость  $XY$  на первой подложке. Тогда ориентацию директора ЖК  $\vec{n}$  можно охарактеризовать двумя углами: углом наклона молекул ЖК к плоскости  $XY$   $\Theta$  и углом поворота молекул ЖК  $\Phi$  (рис. 10).

Для большинства электрооптических эффектов в ЖК-ячейках, которые используются в ЖК-устройствах отображения информации, можно считать, что изменения ориентации директора ЖК  $\vec{n}$  ( $\vec{n} = (\cos\Theta\cos\Phi, \cos\Theta\sin\Phi, \sin\Theta)$ ) происходят только вдоль направления  $Z$ , а в плоскости  $XY$  ЖК однороден. Управляющее поле  $\vec{E}$  при этом направлено параллельно оси  $Z$ . Тогда равновесное распределение углов ориентации директора  $\vec{n}$  по толщине слоя ЖК, согласно континуальной теории, достигается при минимальном значении свободной энергии, плотность которой  $F$  в данном случае можно записать в следующем виде:

$$2F = k_{11}(\text{div}\vec{n})^2 + k_{22}(\vec{n} \cdot \text{rot}\vec{n} + 2\pi / p_0)^2 + k_{33}(\vec{n} \times \text{rot}\vec{n})^2 - \vec{E}\vec{D} / 4\pi, \quad (1)$$

где  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{33}$  - постоянные упругости ЖК для S (поперечный изгиб) -, T (кручение) - и В (продольный изгиб) - деформаций;  $p_0$  - естественный шаг спирали ЖК;  $\vec{D}$  - индукция внешнего электрического поля.

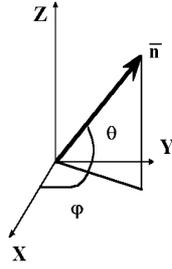


Рис. 10. Ориентация директора жидкого кристалла в лабораторной системе координат XYZ

Минимизируя интеграл свободной энергии стандартным образом, получим систему дифференциальных уравнений для нахождения распределения углов ориентации директора ЖК  $\Theta(z)$  и  $\Phi(z)$  ( $z = z/L$ ,  $L$  - толщина слоя ЖК) в электрическом поле, заданном величиной индукции  $D$  по  $Z$  направлению:

$$\begin{cases} \frac{d^2\theta}{dz^2} = (-f_1 \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 + g_1 \left(\frac{b}{g} + g_2\right)^2 + g_3 \left(\frac{b}{g} + g_2\right) - h_1 V_0^2 D_1^2) / P, \\ \frac{d\varphi}{dz} = \frac{b}{g} + g_2 \end{cases} \quad (2)$$

где

$$P = \cos^2 \theta + k \sin^2 \theta, f_1 = (k-1) \sin \theta \cos \theta, g = \cos^2 \theta (k/\omega \cos^2 \theta + k \sin^2 \theta),$$

$$g_1 = 2 \sin \theta \cos^3 \theta (k - k/\omega) - k \sin \theta \cos \theta, g_2 = v_e \frac{k}{\omega} \frac{1}{k/\omega \cos^2 \theta + k \sin^2 \theta},$$

$$g_3 = 2v_e \frac{k}{\omega} \sin \theta \cos \theta, h_1 = \frac{\varepsilon \sin \theta \cos \theta}{1 + \varepsilon} \frac{1}{(\sin^2 \theta + \cos^2 \theta / (1 + \varepsilon))^2},$$

$$V_0 = 2\pi \sqrt{\left(1 + \left(\frac{\Phi_T}{\pi}\right)^2 \left(k - \frac{2k}{\omega} (1 - v_e / \Phi_T)\right) \frac{1 + \varepsilon}{\varepsilon}\right)},$$

$$D_1 = \frac{DL}{\varepsilon_{\parallel} V_c} = const, V_c = V_0 \sqrt{\frac{\pi k_{11}}{\varepsilon_{\parallel}}}, v_e = 2\pi L / p_0, b = const, k = k_{33} / k_{11}, \omega = k_{33} / k_{22}, \varepsilon = (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}) / \varepsilon_{\perp},$$

$\varepsilon_{\parallel}$ ,  $\varepsilon_{\perp}$  - диэлектрические постоянные ЖК параллельно и перпендикулярно директору,  $\Phi_T$  - угол закрутки немато - холестерической структуры ЖК.

Для полного решения задачи о нахождении распределения углов ориентации директора  $\Theta(z)$  и  $\Phi(z)$  при заданном управляющем электрическом напряжении систему уравнений (2) необходимо дополнить еще одним уравнением для управляющего напряжения  $U$ :

$$\frac{dU}{dz} = \frac{D_1 V_c}{\sin^2 \theta + \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}} \cos^2 \theta}. \quad (3)$$

Интегрируя систему дифференциальных уравнений (2) - (3) с учетом соответствующих граничных условий, то есть условий ориентации ЖК на опорных поверхностях, можно найти распределение углов ориентации ЖК  $\theta(z)$  и  $\varphi(z)$ . Граничные условия в общем виде для закрученной структуры имеют вид [1, 44, 45]:

$$\pm \frac{d\Theta}{dz} (\cos^2 \Theta + k \sin^2 \Theta) \Big|_{z=0,1} = \frac{L}{k_{11}} \frac{dW_{\Theta}}{d\Theta} \Big|_{\Theta=\Theta_0, \Theta_L}, \quad (4a)$$

$$\pm \frac{d\Phi}{dz} (\cos^2 \Theta + \omega \sin^2 \Theta) \Big|_{z=0,1} = \frac{L}{k_{22}} \frac{dW_{\Phi}}{d\Phi} \Big|_{\Phi=\Phi_0, \Phi_L}, \quad (4b)$$

где  $W_{\Theta}$  и  $W_{\Phi}$  - соответственно полярная и азимутальная поверхностные плотности энергии взаимодействия ЖК с ориентирующими его поверхностями; индексы 0, 1 относятся к первой и второй ориентирующей поверхности соответственно.

В настоящее время предполагается, что могут быть различные потенциалы взаимодействия ЖК с ориентирующими его подложками. Чаще всего считается, что для теоретического описания эффектов ориентации ЖК и соответствующих измеряемых характеристик достаточно хорошим приближением является потенциал Рапини  $W = (W_0 \sin^2(\Theta - \Theta_{0,L}))/2$ .

Как правило, для ориентации ЖК в ячейках используются такие методы, при которых реализуется либо сильное сцепление молекул ЖК с ориентирующей подложкой ( $W_\Theta = W_\Phi = \infty$ ), либо слабое сцепление молекул ЖК с опорными поверхностями только в полярном направлении ( $W_\Theta \ll W_\Phi = \infty$ ).

Таким образом, интегрируя систему дифференциальных уравнений (2) - (3) с учетом соответствующих граничных условий (4а), можно найти распределение углов ориентации директора ЖК  $\Theta(z)$  и  $\Phi(z)$  при постоянном управляющем электрическом напряжении. Однако прямое решение этой задачи сталкивается с двумя существенными трудностями, первая из которых связана с устойчивостью решения к заданию начальных условий, а вторая связана с большим количеством требуемых при этом вычислений вследствие необходимости многократно интегрировать уравнения (2). С этой точки зрения лучшим является подход, при котором численные процедуры применяются не непосредственно к дифференциальным уравнениям (2), а к их интегралам:

$$\begin{cases} z = \int_{\Theta_0}^{\Theta_L} \sqrt{p/(A - g(d\Phi/dz) + V_0^2 D_1^2/(1 + \varepsilon \sin^2 \Theta))} d\Theta \\ z = \int_0^\varphi g(b - (kv_e/\omega) \sin^2 \Theta)^{-1} d\Phi \end{cases} \quad (5)$$

Однако методы решения уравнений (5) были разработаны ранее другими авторами только для симметричных граничных условий ( $\Theta_0 = \Theta_L$ ). В настоящей работе предлагается способ учета произвольных граничных условий для углов наклона директора  $\Theta_0, \Theta_L$  к подложкам при решении уравнений (5). Практически удобно применять уравнения (5) не для полного расчета ориентационного поля  $\Theta(z), \Phi(z)$ , а только для определения начальных условий для дифференциальных уравнений (2). При этом поле директора определяется путем однократного численного интегрирования уравнений (2).

Учитывая, что зависимость  $\Theta(z)$  имеет экстремум (минимум или максимум) в какой-то точке  $z_m$ , то есть  $\Theta_m = \Theta(z_m)$ , и в этой точке  $(d\Theta/dz) = 0$ , получим:

$$A = g_m (d\Phi/dz)_m^2 + V_0^2 D_1^2 / (1 + \varepsilon \sin^2 \Theta_m),$$

где  $g_m = \cos^2 \Theta_m k(\cos^2 \Theta_m / \omega + \sin^2 \Theta_m)$ ,  $(d\Phi/dz)_m = (b - kv_e \sin \Theta_m / \omega) / g_m$ .

Если ввести замену переменных  $\sin x = (\sin \Theta / \sin \Theta_m)^{\pm 1}$  в системе уравнений (5), одновременно дополняя эту систему третьим уравнением для управляющего электрического напряжения, то получим систему нелинейных уравнений для нахождения начальных условий для дифференциальных уравнений (2)

$$\begin{aligned} \Phi_T &= \mu \sqrt{\frac{\omega}{k}} \int_{x_1}^{\pi/2} \frac{F_{-\chi}(x) F_{k-1}^{1/2}(x)}{F_{-1}^{3/2}(x) F_{\omega-1}(x) R_{\mu,\chi}^{1/2}(x)} dx + \mu \sqrt{\frac{\omega}{k}} \int_{x_2}^{\pi/2} \frac{F_{-\chi}(x) F_{k-1}^{1/2}(x)}{F_{-1}^{3/2}(x) F_{\omega-1}(x) R_{\mu,\chi}^{1/2}(x)} dx, \\ \Phi_T &= \mu \frac{\chi}{\chi_0} \sqrt{\frac{\omega}{k}} \int_{x_1}^{\pi/2} \frac{F_{k-1}^{1/2}(x)}{F_{-1}^{1/2}(x) R_{\mu,\chi}^{1/2}(x)} dx + \mu \frac{\chi}{\chi_0} \sqrt{\frac{\omega}{k}} \int_{x_2}^{\pi/2} \frac{F_{k-1}^{1/2}(x)}{F_{-1}^{1/2}(x) R_{\mu,\chi}^{1/2}(x)} dx, \\ U &= 2\sqrt{\pi k_{11}/(\varepsilon_\perp \varepsilon)} \int_{x_1}^{\pi/2} \frac{F_{k-1}^{1/2}(x)}{F_{-1}^{1/2}(x) F_\varepsilon(x) R_{\mu,\chi}^{1/2}(x)} dx + 2\sqrt{\pi k_{11}/(\varepsilon_\parallel \varepsilon)} \int_{x_2}^{\pi/2} \frac{F_{k-1}^{1/2}(x)}{F_{-1}^{1/2}(x) F_\varepsilon(x) R_{\mu,\chi}^{1/2}(x)} dx \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\chi = 2\pi Lk / (\omega p_0 b), \mu^2 = 4\pi\epsilon b^2 \omega^2 / (k^2 D_1^2), q = \sin^2 \theta_m, F_\nu(x) = 1 + \nu q^2 \sin^{\pm 2} x, x_1 = \arcsin(\sin \theta_0 / q), x_2 = \arcsin(\sin \theta_L / q),$$

$$R_{\mu, \chi}(x) = \left( \frac{1}{F_\epsilon(x)F_\epsilon(\pi/2)} + \mu^2 R \right) \bullet (\pm \sin x)^{|\mp 1|}, R = \left( \frac{F_{(\chi^2 + \omega - 1)}(x) + F_{(\chi^2 + \omega - 1)}(\pi/2) - \omega - 2\chi + (F_\chi(\pi/2) - 1) \times}{\times (F_{-1 - 2\chi + 2\omega + \omega\chi}(x) - 1)} \right) / r,$$

$$r = F_{-1}(x)F_{-1}(\pi/2)F_{\omega-1}(\pi/2), \chi_0 = v_e / \Phi_T, v = -1, k, \omega, k - 1, \dots$$

Здесь верхний знак относится к случаю, когда  $\theta_m > \theta_{0,L}$ , а нижний - когда  $\theta_m < \theta_{0,L}$ .

Таким образом, задавая физические постоянные ЖК, параметры, характеризующие ориентацию ЖК на подложках, управляющее напряжение  $U$ , и решая нелинейные уравнения (6) с соответствующими граничными условиями, находим постоянные  $A$ ,  $b$  и  $D$ . После этого искомое распределение углов ориентации директора ЖК  $\Theta(z)$  и  $\Phi(z)$  при заданном управляющем напряжении  $U$  находится из уравнений (2). Однако такая схема расчета одномерного распределения углов ориентации директора  $\Theta$  и  $\Phi$  требует больших затрат машинного времени, и поэтому нами реализован другой подход к решению поставленной задачи, который основан на замене одного входного параметра на другой; в качестве входного параметра используется не управляющее напряжение, а значение максимального (минимального) угла наклона молекул ЖК в ячейке  $\theta_m$ , значение напряжения вычисляется. Такое решение вопроса, кроме простоты и существенного выигрыша в быстродействии, оправдывается еще тем, что для большинства задач моделирования электрооптических эффектов необходимо рассчитывать всю вольт-контрастную кривую в целом, и поэтому неважно, что является входным параметром. Решение задачи о нахождении распределения углов ориентации ЖК в электрическом поле заметно упрощается, если используются некоторые ограничения, накладываемые на вид граничных условий и не противоречащие практике получения однородно ориентированных образцов ЖК: 1) полярные углы ориентации молекул ЖК на обеих подложках равны  $\theta_0 = \theta_L$  (симметричные граничные условия); 2) молекулы ЖК на подложках при подаче управляющего электрического напряжения не меняют своей ориентации (жесткие граничные условия). Тогда необходимо решать систему всего первых двух нелинейных уравнений системы (6) для нахождения постоянных  $A$ ,  $b$  и  $D$  и последующего интегрирования уравнений (3).

Описанный выше метод вычисления одномерного распределения углов ориентации директора ЖК в электрическом поле позволяет не только использовать единообразный алгоритм поиска решения для разнотипных граничных условий, но и обеспечивает устойчивость. Кроме этого, описанный метод решения позволяет значительно сократить объем необходимых вычислений, так как в дифференциальные уравнения приходится интегрировать всего один раз.

Если рассматривать статические одномерные деформации твист- или незакрученной структуры нематического ЖК без хиральной добавки ( $\Phi_T \leq 90^\circ$ ,  $2\pi L/p_0 = 0$ ), то соответствующие дифференциальные и нелинейные уравнения сильно упрощаются, но методика отыскания распределения углов ориентации директора ЖК в электрическом поле  $\Theta(z)$  и  $\Phi(z)$  остается прежней.

На основе описанного выше метода разработаны алгоритм и компьютерная программа для вычисления распределений углов ориентации директора ЖК в электрическом поле при различных условиях ориентации ЖК на подложках. Для апробации метода, алгоритма и вычислительной программы было проведено сопоставление рассчитанных и экспериментально определенных пороговых напряжений, крутизна вольт-контрастных кривых и зависимостей пропускания от напряжения для твист-эффекта и эффекта гость-хозяин, которое показало, что расхождение между ними не превышает 5%. Хорошее количественное согласие между расчетными и экспериментальными данными, а также полное согласие расчетных данных, полученных с использованием предложенного метода, с другими известными методами позволяет сказать, что предложенный метод пригоден для компьютерного моделирования характеристик устройств отображения информации на ЖК. Разработанная на его основе программа используется в системе компьютерного моделирования характеристик устройств отображения информации на основе ЖК

“ЭЛЕКТРООПТИКА-М”, которая нашла применение при исследовании и разработке различных типов ЖК-индикаторов и ЖК-экранов и позволила избавиться от проведения натурального моделирования ЖК-устройств отображения информации. Эта программа используется также в универсальной компьютерной системе “MOUSE-LCD”, разработанной совместно кафедрой оптики СГУ и группой проф. В.Г. Чигринова (Гонконгский университет технологии).

## **2.2 Расчет углов ориентации директора ЖК при двумерной упругой деформации, вызванной электрическим полем**

Широкое использование жидких кристаллов (ЖК) в современных системах отображения информации ставит задачу об адекватном теоретическом описании поведения ЖК во внешнем электрическом поле в зависимости от физических и конструктивных параметров устройства. В настоящий момент времени большинство работ в этой области посвящено моделированию характеристик новых ЖК -устройств отображения информации, которые используют при своей работе трех или двух мерные деформации ЖК. Другая большая группа работ посвящена в основном разработке программ и методов расчета оптических характеристик ЖК – устройств при многомерной деформации ЖК во внешнем электрическом поле. В то же время остается открытым вопрос о том, как влияют физические и конструктивные параметры ЖК на видимый размер элемента отображения в устройстве (даже если рассматривать ЖК – индикаторы, использующие самый известный электрооптический эффект – твист – эффект). В случае одномерной деформации ЖК, когда размеры элементов изображения велики (порядка нескольких сотен микрон), такие исследования выполнены в полном объеме и представляют интерес только с точки зрения технологии изготовления. Аналогичные исследования для случая многомерной деформации ЖК, когда размеры элементов изображения имеют линейные размеры менее 70 микрон, не выполнены и остается открытым вопрос о влиянии физических параметров ЖК на видимый размер элемента изображения устройства с целью определения минимально возможного размера пикселя. Данный раздел работы посвящен следующим двум вопросам:

- разработке программного средства для расчета двух мерной деформации ЖК во внешнем электрическом поле;
- исследованию влияния физических постоянных ЖК и конструктивных параметров устройства на упругую деформацию ЖК и видимые размеры элемента отображения.

### **2.2.1 Методика и алгоритм расчета**

Пусть мы имеем плоскопараллельный слой ЖК (ЖК - ячейку), заполненный немато - холестерической смесью ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. На верхней и нижней поверхностях ЖК - ячейки параллельно друг другу расположены несколько длинных электродов. Все электроды предполагались идентичными. Ширина каждого электрода  $L_1$ , расстояние между соседними электродами  $L_2$ , толщина ячейки  $L$ . Для описания ориентации ЖК в электрическом поле выберем декартову систему координат так, чтобы ось  $y$  была направлена перпендикулярно ориентирующим поверхностям, а периодическая структура электродов находится в плоскости  $x - y$ . Ориентацию директора ЖК  $\vec{n}$  можно охарактеризовать двумя углами: углом наклона  $\Theta$  молекул ЖК к плоскости  $x - z$  и углом поворота  $\Phi$  молекул ЖК в этой плоскости. Так как длина электродов значительно больше чем  $L_1$ ,  $L_2$ , и  $L$ , то можно считать, что в направлении  $z$  электрод бесконечный. Вся конструкция совмещена с прямоугольной системой координат, начало которой совпадает с центром одного из промежутков между электродами. Ко всем нижним электродам прикладывается потенциал  $v = -0.5 \cdot U$ , а ко всем верхним –  $v = 0.5 \cdot U$ , где  $U$  – управляющее напряжение. Каждые верхний и противоположный ему нижний электроды образуют отдельные пары. Поскольку все пары электродов идентичны, то достаточно найти распределение директора только для одной такой пары. В нашей модели мы считаем, что изменения ориентации директора ЖК  $\vec{n}$  происходят только в плоскости  $x - y$ , а вдоль направления  $z$  ЖК – слой однороден.

Управляющее поле  $\bar{E}$  при этом направлено параллельно оси  $y$ . Тогда равновесное распределение углов ориентации директора  $\vec{n}$  по толщине слоя ЖК, согласно континуальной теории достигается при минимальном значении свободной энергии, плотность которой  $F$  в данном случае можно записать в следующем виде (1).

Минимизируя интеграл свободной энергии стандартным образом, получим систему нелинейных дифференциальных уравнений для нахождения распределения углов ориентации директора ЖК  $\Theta(x, y)$  и  $\Phi(x, y)$  в электрическом поле.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \Theta} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial F}{\partial \left( \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right)} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F}{\partial \left( \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right)} \right) &= 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \Phi} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial F}{\partial \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F}{\partial \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)} \right) &= 0 \\ \frac{\partial F}{\partial v} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial F}{\partial \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial F}{\partial \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)} \right) &= 0 \end{aligned}$$

Эту систему уравнений необходимо решать совместно с граничными условиями, которые в нашем случае жестких граничных условий будут иметь вид: (записаны для случая одной пары электродов окружённых промежутками)

нижний электрод:

$$\Theta = \Theta_0, \Phi = \Phi_T, v = -U/2, \text{ при } y=0, \text{ и } (L_2/2) \leq x \leq (L_2/2 + L_1)$$

нижние промежутки:

$$\Theta = \Theta_0, \Phi = \Phi_T, v = 0, \text{ при } y=0, \text{ и } 0 < x \leq (L_2/2) \text{ и } (L_2/2 + L_1) < x \leq (L_1 + L_2)$$

верхний электрод:

$$\Theta = \Theta_0, \Phi = 0^\circ, v = U/2, \text{ при } y=L, \text{ и } (L_2/2) \leq x \leq (L_2/2 + L_1)$$

верхние промежутки:

$$\Theta = \Theta_0, \Phi = 0^\circ, v = 0, \text{ при } y=L, \text{ и } 0 < x \leq (L_2/2) \text{ и } (L_2/2 + L_1) < x \leq (L_1 + L_2),$$

$\Theta_0$  – угол наклона молекул на ориентирующей поверхности,  $\Phi_T$  – угол закрутки ЖК – структуры.

Граничные условия по бокам области определяются исходя из периодичности элементарной ячейки с электродами.

Для удобства численного решения уравнения системы были приведены к безразмерному виду ( $x = x/L_{\max}$ ,  $y = y/L$ ,  $L_{\max}$  – длина всего электрода ячейки). Для решения системы уравнений воспользовались наиболее универсальным численным методом - методом конечных разностей. Тогда исходные дифференциальные уравнения заменяются разностными уравнениями относительно сеточной функции. При этом для входящих в уравнение производных используются соответствующие конечно-разностные соотношения. В результате получается система алгебраических уравнений, решая которую, можно найти в узлах сетки значения сеточной функции. Составим конечно-разностную схему для уравнений, для чего введём сетку. Стороны квадрата  $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$  делятся на элементарные отрезки точками  $x_i = i \cdot H_x$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) и  $y_j = j \cdot H_y$  ( $j = 0, 1, \dots, m$ ). Здесь  $H_x$  - шаг разбиения по  $x$ ,  $H_y$  - шаг разбиения по  $y$ :  $H_x = 1/n$ ,  $H_y = 1/m$ , где  $n$  и  $m$  - количество точек по  $x$  и  $y$  соответственно. Через точки  $x_i$  и  $y_j$  проведем два

семейства координатных прямых  $x = const$  и  $y = const$ , образующих сетку с прямоугольной ячейкой. Любой узел этой сетки, номер которого  $(i, j)$ , определяется координатами  $(x_i, y_j)$ . Начало системы координат совмещено с точкой  $(0, 0)$ . Кроме того, в сетку входят также точки с координатами  $-1$  и  $n+1$  по  $x$ , и  $-1$  и  $m+1$  по  $y$ . Они необходимы для аппроксимации производных в граничных точках. Далее заменяем производные по формулам конечных разностей. Получившаяся система нелинейных уравнений решалась модифицированным методом простой итерации – методом Гаусса - Зейделя. Начальные приближения задаются из следующих соображений. Полагаем, что в центре электрода решение системы мало отличается от решения аналогичной задачи в одномерном случае. Такая задача в конечно-разностном виде легко получится, если записать уравнения для  $i=0$  и отбросить все слагаемые, где  $i$  отличается от нуля. Полученная система алгебраических уравнений легко решается методом Гаусса - Зейделя.

По краям элемента, где электрод отсутствует (при  $i = n, i = 0$ ), в качестве нулевых приближений задаем невозмущенное распределение  $\theta, \varphi$  и  $\nu$  ( $\theta_n^j = 2^\circ, \nu_n^j = 0, j = 0 \dots m$ ). Промежуточные значения для нулевых приближений задаются линейной интерполяцией. В точках  $(-1, j), (n+1, j)$  значения функций  $\theta, \varphi$  и  $\nu$  совпадают (в следствии симметрии задачи) с соответствующими значениями в точках  $(1, j), (n-1, j)$  для  $j = 0 \dots m$  значения функций  $\theta, \varphi$  и  $\nu$  в точках  $(i, 1), (i, m+1)$  для  $i = 0 \dots n$  задаются методом квадратичной экстраполяции.

На основе описанной выше процедуры были разработан алгоритм и вычислительная программа на языке *Fortran 95*. Входными параметрами являются: длина электрода ( $L_1$ ), длина расстояния между электродами ( $L_2$ ), толщина ЖК-слоя ( $L$ ), рабочее напряжение ( $U$ ), упругие постоянные ЖК ( $K_{11}, K_{22}, K_{33}$ ), шаг спирали ЖК – структуры ( $p_0$ ) и компоненты диэлектрического тензора ( $\varepsilon_{\parallel}, \varepsilon_{\perp}$ ).

Вычисление двумерного распределения углов ориентации директора состоит из нескольких шагов. На первом шаге находится одномерное распределение директора по толщине ЖК - ячейки. Для этого в системе уравнений все производные по  $x$  приравниваем нулю и заменяем все производные конечно-разностными выражениями. Полученная система решается методом Гаусса - Зейделя.

На втором шаге создаются нулевые приближения для двухмерной задачи. Для центра электрода в качестве нулевого приближения используется полученное решение одномерной задачи, для края элемента без электрода задается невозмущенное распределение  $\Theta, \Phi$  и  $\nu$ . Далее задается начальное распределение  $\Theta, \Phi$  и  $\nu$  по всей длине элемента для каждого  $j$ . После расчёта получаем функции  $\Theta(x, y), \Phi(x, y)$  и  $\nu(x, y)$ . Достоверность полученных результатов подтверждалась путем сравнения рассчитанных данных с другими программами. На рис. 11 представлен пример расчета двумерного распределения директора ЖК в электрическом поле для следующих параметров  $L = 4.0$  мкм,  $L_1 = 35.0$  мкм,  $L_2 = 35.0$  мкм,  $\varepsilon_{\parallel} = 5.5, \varepsilon_{\perp} = 4.5, \Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} = 1.0, p_0 = 80.0, k_{11} = 1.010 \cdot 10^{-6}$  дин,  $k_{22} = 6.0 \cdot 10^{-7}$  дин,  $k_{33} = 1.5 \cdot 10^{-6}$  дин,  $\Theta_0 = 2^\circ, \Phi_T = 90^\circ$ .

### 2.2.2. Некоторые результаты моделирования и их обсуждение

Основными физическими параметрами, которые определяют упругую деформацию ЖК в электрическом поле (и одномерную и двумерную), как известно, являются упругие постоянные материала и его диэлектрическая анизотропия. В качестве конструктивного параметра, определяющего двумерную деформацию ЖК, было выбрано отношение размера электрода к величине межэлектродного зазора. Исследования проводились для ЖК – индикаторов, работающих на основе твист – эффекта, так как такие устройства наиболее широко используются в технике. Из анализа результатов расчета видно, что можно выделить три области деформации ЖК. В первой области деформация ЖК совпадает с одномерной

деформацией и соответствует центру электрода. Размер этой области для всех зависимостей определяется управляющим напряжением и с его ростом увеличивается. При малых управляющих напряжениях, которые не сильно превышают значения порогового напряжения размер этой области меньше, чем размер электрода, то есть в этом случае деформация ЖК, соответствующая одномерной деформации занимает область меньшую, чем сам электрод. С ростом управляющего напряжения размер первой области увеличивается и при высоких управляющих напряжениях, значительно превышающих пороговое значение, ее размер становится равным размеру электрода. Вторая область – это область где уже электрод отсутствует, но благодаря упругим свойствам ЖК ориентация молекул отлична от однородной. Это переходная область, в которой углы ориентации ЖК имеют промежуточное значение между значениями соответствующими углам ориентации недеформированного ЖК и углами ориентации, соответствующими деформации в центре электрода. Размер этой области также зависит от управляющего напряжения, но в меньшей степени. И третья область соответствует области недеформированного ЖК. Размер этой области уменьшается с ростом управляющего напряжения. С точки зрения поведения угла закрутки структуры ЖК особый интерес вызывает вторая область, так как в ней эти изменения происходят наиболее резко, что может существенным образом влиять на оптические характеристики ЖК – устройств отображения информации, использующих различные электрооптические эффекты. Так, например, если устройство использует эффект управляемого двойного лучепреломления в различных структурах ЖК, то наличие второй области может существенным образом увеличить размер элемента изображения исказив его оптический отклик.

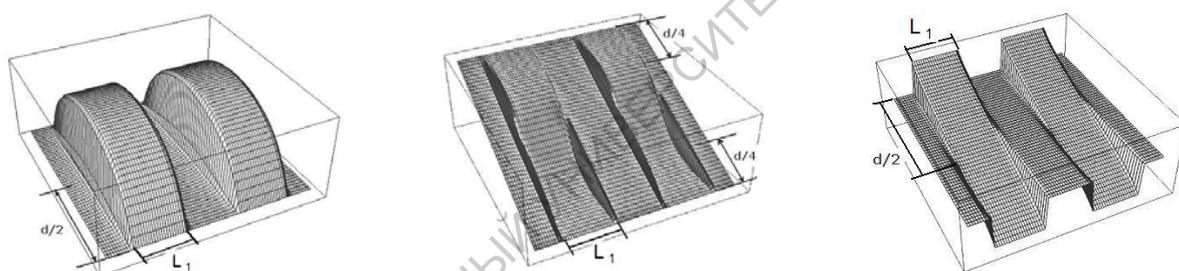


Рис. 11 Рассчитанные двумерные распределения в плоскости  $x-y$  для угла наклона директора (а), угла поворота директора (б) и потенциала (в). Расчёт проводился на области, содержащей две пары электродов. Вычисления проводились для управляющего напряжения  $2.0 V_c$

Если зафиксировать значение управляющего напряжения, при увеличении диэлектрической анизотропии размер первой области изменяется от 70 мкм до 80 мкм (размер электрода 90 мкм), а размер второй области остается постоянным и равным 30 мкм. Таким образом, если используется электрооптический эффект чувствительный в первую очередь к изменению только угла подъема молекул ЖК (например, эффект управляемого полем двойного лучепреломления в различных структурах ЖК), то элемент изображения может быть меньше, чем сам управляющий электрод, или по крайней мере иметь другие оптические характеристики. Аналогичные заключения можно сделать относительно влияния на размер элемента изображения отношений постоянных упругости ЖК, отличие только в размерах первой (80 мкм) и второй (40 мкм) областях, и которые слабо зависят от значения управляющего напряжения.

Максимальное влияние на двумерную деформацию ЖК в электрическом поле оказывает отношение размера электрода к толщине слоя ЖК, что согласуется с результатами других авторов. В таблице 1 приведены значения размеров первой и второй областей в зависимости от отношения  $L_1/L$ . Из этой таблицы видно, что при сравнимых значениях размера электрода и толщины ЖК – слоя отдельные элементы отображения перестают различаться, то есть выполнять свои функции. Однако, существует некоторое значение этого отношения, начиная с которого размер первой и второй области остаются постоянными.

Таблица 1.

Зависимость двумерной деформации ЖК в электрическом поле от отношения размера электрода к толщине слоя ЖК

$L_1/d$	0.25	0.75	1.25	3.75	5	6.25	7.5	8.75
Размер первой области, мкм	20	50	60	80	90	90	90	90
Размер второй области, мкм	190	190	190	170	150	140	140	140

Таким образом в данном разделе методом компьютерного моделирования выполнено исследование двумерной упругой деформации ЖК в электрическом поле и оптического отклика ЖК - устройства в зависимости от физических и конструктивных параметров ЖК-ячейки. Разработан алгоритм и компьютерная программа для расчета двумерной упругой деформации ЖК в электрическом поле. Показано наличие различных областей деформации ЖК в случае двумерной деформации и выяснено влияние на размер этих областей физических и конструктивных параметров ЖК – ячейки. Отмечено, что наибольшее влияние на размер областей двумерной деформации ЖК оказывает отношение величины электрода к величине толщины ЖК – слоя. Наибольшее влияние из физических параметров ЖК на его двумерную деформацию оказывает диэлектрическая анизотропия ЖК – материала.

### 2.3 Расчет оптического пропускания ЖК - ячейки для различных электрооптических эффектов

Оптические характеристики различных электрооптических эффектов в ЖК являются следствием физической анизотропии молекул и упорядоченной структуры ЖК. Большинство электрооптических эффектов, которые нашли широкое применение в технике отображения информации, основано на изменении оптической анизотропии ЖК под действием электрического поля. Это определяет ту уникальную роль, которую играют ЖК в электрооптике. Существуют три принципиальных способа использования переориентации директора ЖК для управления светопередачей. Первый заключается в изменении вектора поляризации света, прошедшего через материал с двойным лучепреломлением. В системах на основе данного явления ЖК помещается между двумя поляризаторами таким образом, чтобы одна ориентация директора допускала прохождение исходного поляризованного света через второй поляризатор, тогда как другая ориентация директора дает свет, не проходящий анализатор. Любое из этих двух состояний создается приложением внешнего электрического поля, а противоположное состояние имеет место в отсутствие поля. Данный принцип используется в эффектах двойного лучепреломления в незакрученных, закрученных и сверхзакрученных структурах ЖК и в твист- эффекте. Вторым явлением, используемым для контроля светопередачи, является рассеяние, создаваемое гидродинамическими структурами, или турбулентность, которая приводит к сильному и произвольному преломлению света, проходящего через ЖК. Третий принцип основан на использовании ЖК для создания однородной ориентации молекулам дихроичного красителя, растворенного в ЖК. Поглощение такого красителя зависит от соотношения направлений молекулярных осей красителя и локального электрического поля. В этом случае изменить общее поглощение можно за счет изменения ориентации ЖК относительно входящего света. Этот принцип реализован в эффекте "гость- хозяин" и его можно наблюдать с помощью одного поляризатора или вообще без него.

В настоящее время наиболее широкое применение в технике отображения информации на ЖК нашли такие электрооптические эффекты, как эффект управляемого двойного лучепреломления в незакрученных, закрученных и сверхзакрученных структурах ЖК, твист- эффект и эффект "гость- хозяин". Для теоретического изучения этих эффектов с целью их практического использования в системах отображения информации необходимо уметь рассчитывать оптическое пропускание света в таких ЖК- системах. Такой расчет базируется на модели ЖК- ячейки и на соответствующих ей математических методах расчета распространения света через ЖК- систему отображения информации.

### 2.3.1 Модель ЖК- ячейки

Для однозначного количественного теоретического описания оптических характеристик различных электрооптических эффектов в ЖК- структурах важно иметь надежную модель ЖК- ячейки, в которой наблюдаются эти электрооптические эффекты. Обычно для теоретического исследования этих электрооптических эффектов рассматривают модель ЖК- ячейки, которая представляет собой слой ЖК, помещенный между двумя поляризаторами. Однако, как показали более детальные исследования, для количественного описания оптических характеристик электрооптических эффектов модель ЖК- ячейки должна включать в себя все оптические элементы реальной конструкции даже в том случае, когда исследуются электрооптические эффекты при нормальном падении света на систему. Теоретические значения пропускания, рассчитанного без учета влияния интерференционного отражения проводящими и ориентирующими слоями, а также не идеальности поляризаторов, расходятся с экспериментальными по абсолютному значению до 30%. Поэтому для такой важной характеристики твист- эффекта, как, например, крутизна характеристики пропускания в зависимости от управляющего напряжения, могут получиться ошибочные результаты. Внесение поправок в теоретические расчеты и соответственно в используемую физическую модель ЖК - ячейки, связанных с влиянием электродных и ориентирующих слоев и не идеальности поляризаторов, приводит к значительному улучшению расчетных и экспериментальных данных. Последнее утверждение приобретает еще большее значение при исследовании характеристик электрооптических эффектов при наклонном падении света на ЖК- ячейку.

Таким образом, для количественного изучения оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК следует использовать следующую модель ЖК- ячейки: стеклянная подложка- электродный слой- ориентирующий слой- слой ЖК - ориентирующий слой- электродный слой- стеклянная подложка. ЖК- ячейка помещена между двумя неидеальными поляризаторами, ориентированными относительно директора ЖК на подложках произвольным образом. При исследовании эффекта "гость- хозяин" поляризаторы либо не используются вообще, либо используется только один передний неидеальный поляризатор. Кроме того в этом случае к ЖК в малом процентном содержании добавляется дихроичный краситель.

### 2.3.2 Метод расчета оптических характеристик электрооптических эффектов, наблюдаемых в ЖК- ячейках

Для теоретического исследования оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейках обычно используются различные методы матричной оптики. Наиболее широко используемыми для этой цели являются матричные методы Берремана и Джонса.  $4 \times 4$  матричный метод Берремана наиболее точно описывает распространение когерентного света в анизотропных средах, а большинство электрооптических эффектов в ЖК наблюдаются при естественном (то есть некогерентном) освещении. Поэтому последовательное применение метода Берремана встречается с некоторыми трудностями, связанными в первую очередь с большими вычислительными затратами для устранения эффекта "интерферометра Фабри- Перо". В то же время этот метод даже при исследовании оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК - устройствах, работающих на их основе, при когерентном освещении требует сравнительно больших вычислительных затрат. С другой стороны, для нормального падения света на ЖК - ячейку многими авторами используется метод  $2 \times 2$  матриц Джонса, который позволяет производить расчеты для некогерентного излучения и применим для исследования оптических характеристик однородных анизотропных сред. Одновременно этот матричный метод требует значительно меньших вычислительных затрат, чем метод Берремана, так как при расчете используются матрицы меньшей размерности. Расчет оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК и ЖК - устройств при наклонном падении света производился в предположении, что свет в ЖК- структуре распространяется в некотором среднем направлении и не меняет его по всей толщине слоя ЖК. В этом случае не совсем верно

учитывается основная специфика распространения света через ЖК - зависимость оптической анизотропии показателей преломления ЖК от управляющего внешнего электрического поля, так как при подаче управляющего напряжения на ЖК- ячейку слой ЖК становится неоднородным по всей толщине ячейки. Поэтому нами в середине 80-ых годов предпринята попытка использовать для теоретического исследования оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейках метод комплексных матриц Джонса и матрицы когерентности, путем обобщения этого метода в некоторых предположениях на наклонное падение света на ЖК- структуру, и сравнить результаты расчета с использованием матричных методов Берремана и Джонса с экспериментальными данными.

В матричном формализме Джонса ЖК- ячейка характеризуется некоторой комплексной матрицей  $2 \times 2$   $M_{ин}$ , которая имеет вид:

$$M_{ин} = \prod_{i=1}^n M_i, \quad (7)$$

где  $M_i$  - матрица Джонса  $i$ - го оптического элемента ЖК- ячейки;  $n$ - количество оптических элементов.

Основная трудность при вычислении  $M_{ин}$  связана с нахождением матрицы Джонса слоя ЖК  $M_{жск}$ . Для определения этой матрицы предположим, что в слое ЖК отсутствует многолучевая интерференция, а поглощение в рабочем веществе ЖК- ячейки слабое. Для вычисления матрицы  $M_{жск}$  разобьем неоднородный слой закрученного ЖК на гомогенные субслои, в каждом из которых ориентация директора ЖК одинакова. Считая, что ЖК является положительным одноосным кристаллом и оси эллипсоида поглощения совпадают с осями эллипсоида показателей преломления, предположим, что:

1) в однородном слое ЖК распространяются обыкновенная и необыкновенная волны в одном направлении, но для них различны показатели преломления и коэффициенты поглощения; угол распространения  $\alpha$  световых волн в слое ЖК определяется соотношением

$$((n + n_o) / 2) \sin \alpha = \sin \alpha_1, \quad (8)$$

где  $\alpha_1$  - угол распространения света в воздухе;  $n$ ,  $n_o$  - показатели преломления для необыкновенной и обыкновенной волн соответственно;

2) поляризации необыкновенной и обыкновенной волн ортогональны друг другу;

3) в прямоугольной системе координат  $XYZ$ , связанной с фронтом падающей волны, направление распространения в которой совпадает с осью  $Z$ , матрицу Джонса ЖК  $M_{жск}$  можно записать в виде

$$M_{жск} = G_{NXYZ} \rho_{N-1, N-2} \dots \rho_{K, K+1} G_{KXYZ} \dots \rho_{1,2} G_{1XYZ},$$

где  $G_{KXYZ}$  - матрица Джонса  $K$  - го однородного субслоя ЖК;  $\rho_{K, K+1}$  - матрица, учитывающая различие в направлениях распространения света в  $K$  и  $(K+1)$  - м однородных субслоях и различие их показателей преломления;  $N$  - число однородных субслоев ЖК.

При большом числе субслоев ЖК  $N \geq 100$ , как показывают нетрудные, но громоздкие вычисления, матрицы  $\rho_{K, K+1}$  можно считать равными единичным. Тогда матрицу  $M_{жск}$  можно записать следующим образом:

$$M_{жск} = \prod_{K=1}^N G_{KXYZ}. \quad (9)$$

Таким образом, нахождение матрицы  $M_{жск}$  сводится к отысканию вида матрицы  $G_{KXYZ}$ , которую с учетом сделанных предположений можно записать в виде, пригодном для наклонного распространения света:

$$G_{KXYZ} = R(\varphi_K) G_K R(-\varphi_K). \quad (10)$$

Здесь:

$$G_K \begin{vmatrix} e^{j(\frac{2\pi}{\lambda}n_K + j\frac{a_K}{2})\frac{\Delta z}{\cos\alpha_K}} & 0 \\ 0 & e^{j(\frac{2\pi}{\lambda}n_o + j\frac{a_o}{2})\frac{\Delta z}{\cos\alpha_K}} \end{vmatrix}; \quad (11)$$

$$a_K = a_e (n_K / n_e)^3 \cos^2 \theta_K + a_o (n_K / n_o)^3 \sin^2 \theta_K; \quad (12)$$

$$\frac{1}{n_K^2} = \frac{\cos^2 \theta_K}{n_e^2} + \frac{\sin^2 \theta_K}{n_o^2}, \quad (13)$$

где  $\Delta z$  - толщина однородного субслоя ЖК;  $n_K$ ,  $a_K$  - коэффициенты преломления и поглощения необыкновенной волны в  $K$ -ом субслое;  $n_o$ ,  $n_e$ ,  $a_o$ ,  $a_e$  - главные коэффициенты преломления и поглощения ЖК;  $\theta$ ,  $\varphi$  - полярный и азимутальный углы ориентации директора ЖК в  $K$ -ом субслое по отношению к фронту волны;  $\lambda$  - длина волны падающего света;  $j$  - мнимая единица.

Для нахождения матрицы однородного субслоя ЖК  $G_{KXYZ}$  необходимо найти величины  $n_K$ ,  $a_K$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ , которые выражаются через  $a_o$ ,  $a_e$ ,  $n_o$ ,  $n_e$ ,  $\Theta$  и  $\Phi$  (углы ориентации директора ЖК, которые вычисляются при расчете статической деформации ЖК в электрическом поле на первом этапе моделирования характеристик электрооптических эффектов в ЖК (предыдущий раздел),  $\alpha$ ,  $\beta$  (угол ориентации плоскости падения света). Используя формулы сферической тригонометрии, получаем следующие системы уравнений для определения неизвестных  $n_K$ ,  $\theta$  и  $\varphi$ :

$$\begin{cases} (n_K + n_o) \sin \alpha_K = \sin \alpha_1 \\ n_K^2 (n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \sin^2 \theta_K) - n_e^2 n_o^2 = 0 \\ \sin \theta_K = \cos \Theta_K \sin \Phi_K \sin \alpha_K \cos \beta + \cos \Theta_K \sin \Phi_K \sin \alpha_K \sin \beta + \sin \Theta_K \cos \alpha_K \\ \cos \theta_K \cos \varphi_K = \frac{\cos \Theta_K \cos \Phi_K (1 - \sin^2 \alpha_K \cos^2 \beta) - \cos \Theta_K \sin \Phi_K \sin \beta \cos \beta - \sin \Theta_K \cos \beta \cos \alpha_K \sin \alpha_K}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_K \cos^2 \beta}} \\ \cos \Theta_K \sin \Phi_K = \frac{\cos \Theta_K \sin \Phi_K \cos \alpha_K - \sin \Theta_K \sin \beta \sin \alpha_K}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_K \cos^2 \beta}} \end{cases} \quad (14)$$

где  $\Theta_K$ ,  $\Phi_K$  - углы ориентации директора ЖК в системе координат  $XYZ$  в  $K$ -ом однородном субслое ЖК;  $\alpha_K$  - угол распространения света в  $K$ -ом однородном субслое ЖК.

Решая систему уравнений (14), получаем величины  $\theta$ ,  $a_K$  и  $n_K$ , после чего определяем коэффициент поглощения для необыкновенного луча, а из уравнения (13) и азимутальный угол поворота  $\varphi$  из (14). Таким образом, выражения (9) - (14) полностью определяют матрицу  $M_{жк}$ .

Матрицы Джонса для неидеальных поляризаторов  $M_{пол}$  вычислялись аналогичным образом с учетом того, что поляроид эквивалентен однородному слою поглощающего ЖК.

Отражение света от внешних поверхностей индикатора и влияние ориентирующих и электродных слоев рассчитывались при помощи матрицы  $M_{XYZ}$ :

$$M_{XYZ} = R(\psi) M_{ps} R(-\psi); \quad (15)$$

$$M_{ps} = \begin{vmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{vmatrix}, \quad (16)$$

где  $R(\psi)$ ,  $R(-\psi)$  - прямая и обратная матрицы перехода из  $ps$ -системы координат в  $XYZ$ ;  $t_p$ ,  $t_s$  - амплитудные коэффициенты пропускания для света, поляризованного в плоскости падения света и перпендикулярно ей соответственно.

Для учета отражения от внешних поверхностей ЖК-ячейки коэффициенты  $t_p$  и  $t_s$  рассчитывались по формулам Френеля. Расчет амплитудных коэффициентов пропускания  $t_s$  и  $t_p$  для системы стеклянная подложка - электродный слой - ориентирующий слой - приграничный слой ЖК производится при помощи матриц Абелеса. При этом, учитывая тот

факт, что толщина стекла в ЖК - ячейке не менее 0.5 мм и толщина ЖК- слоя, как правило, не менее 4 мкм, а толщины электродного и ориентирующего слоев изменяются в пределах от 20 нм до 150 нм, то расчет коэффициентов  $t_p$  и  $t_s$  для этой системы можно проводить для случая двух тонких пленок (электродный и ориентирующий слой), находящихся между полу бесконечной средой и подложкой. Применение матричного формализма Абелеса для расчета коэффициентов пропускания  $t_p$  и  $t_s$  автоматически учитывает многолучевую интерференцию в проводящих и ориентирующих слоях. При сделанных выше замечаниях амплитудный коэффициент пропускания для  $p(s)$  – компоненты падающей волны  $t_p(t_s)$  для рассматриваемой системы имеет вид:

$$t_{p(s)} = t_{01p(s)} t_{12p(s)} t_{23p(s)} e^{-j(\alpha_1 + \alpha_2)} / R_e, R_e = 1 + r_{01p(s)} r_{12p(s)} e^{-j2\alpha_1} + (r_{12p(s)} + r_{01p(s)} e^{-2j\alpha_2}) r_{23p(s)} e^{-2j\alpha_2},$$

где  $\alpha_{1,2} = 2\pi n_{1,2} d_{1,2} \cos \alpha_{1,2} / \lambda$ ,  $d_1, d_2, n_1, n_2, \alpha_1, \alpha_2$  – толщины, показатели преломления тонких слоев 1 и 2 и углы распространения в них соответственно;  $r_{01p(s)}, r_{12p(s)}, r_{23p(s)}, t_{01p(s)}, t_{12p(s)}, t_{23p(s)}$  – френелевские амплитудные коэффициенты отражения и пропускания для  $p(s)$  – компоненты падающей волны на границах раздела между средами с индексами 0, 1, 2, 3 соответственно, которые рассчитываются по формулам Френеля.

Для света, падающего на ЖК – устройство, индексы 0, 1, 2 и 3 относятся соответственно к стеклянной пластине, электродному слою, ориентирующему слою и приграничному слою ЖК со средним показателем преломления. Для света, выходящего из ЖК – ячейки, эти индексы соответствуют обратной последовательности тех же оптических элементов.

Таким образом, матрица Джонса всей ЖК - ячейки  $M_{ин}$  полностью определяется выражениями (7), (9) - (16) и оптические характеристики электрооптического эффекта в ЖК - ячейке определяются в этом случае по выходной матрице когерентности  $J_{вых}$ :

$$J_{вых} = M_{ин} J_{вх} M_{ин}^+,$$

где  $J_{вх}$  - матрица когерентности для света, падающего на ЖК - ячейку;  $M_{ин}^+$  - матрица, эрмитово сопряженная к  $M_{ин}$ .

Следовательно, используя матрицу когерентности, преобразуемую с помощью соответствующих комплексных матриц Джонса, которые используют двухволновую модель распространения светового излучения через анизотропные неоднородные среды, можно достаточно простым и эффективным способом теоретически исследовать оптические характеристики электрооптических эффектов в ЖК- ячейках, как при нормальном падении света на систему, так и при наклонном падении.

Другим матричным формализмом матричным формализмом, который использует такое же приближения для описания распространения света через неоднородные анизотропные среды, является вектора Стокса, преобразуемые с помощью матриц Мюллера. Матрица Мюллера любой не деполяризующей системы однозначно выражаются через элементы матрицы Джонса этой системы, а вектор Стокса однозначно вычисляется через элементы матрицы когерентности. Таким образом, вычислительная процедура, основанная на матрицах Мюллера и векторах Стокса, имеет такую же точность вычислений, как и описанная выше методика матриц Джонса-когерентности. Однако, если в оптической системе существуют деполяризующие элементы, то необходимо использовать матричный формализм Мюллера. В противном случае матричный формализм Джонса предпочтительнее, так как требует меньшего числа вычислений, чем формализм матриц Мюллера.

#### 2.4 Использование метода комплексных матриц 4×4 для расчета оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейках

Как отмечалось выше, для теоретического анализа оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейках наиболее часто используется матричный метод Берремана. В этой связи представляет определенный интерес сравнение расчетных данных, полученных с помощью метода Берремана, с результатами расчетов, полученных с помощью численной методики, описанной выше, а также сравнение теоретических данных с экспериментально полученными результатами. Для расчета оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейки с помощью матричного метода Берремана нами использовалась численная методика, согласно которой пропускание света можно найти,

используя соотношение:

$$\zeta_i(d) = P(d, 0)(\zeta_i(0) + \zeta_r(0)), \quad (17)$$

где  $\zeta_i(d)$ ,  $\zeta_i(0)$ ,  $\zeta_r(0)$  - комплексные векторы-столбцы  $4 \times 1$  световых волн, прошедших через ЖК - ячейку, падающих на нее и отраженных от нее соответственно;  $P(d, 0)$  - комплексная матрица  $4 \times 4$  ЖК-ячейки.

В нашем случае для электрооптических эффектов в ЖК матрицу  $P(d, 0)$  можно записать в виде:

$$P(d, 0) = P_{пол2} P_{ст2} P_{эл2} P_{ор2} P_{жк} P_{ор1} P_{эл1} P_{ст1} P_{пол1}, \quad (18)$$

где  $P_{пол2}$ ,  $P_{пол1}$ ,  $P_{ст2}$ ,  $P_{ст1}$ ,  $P_{эл2}$ ,  $P_{эл1}$ ,  $P_{ор2}$ ,  $P_{ор1}$ ,  $P_{жк}$  - комплексные  $4 \times 4$  матрицы поляризаторов, стеклянных пластин, электродных и ориентирующих слоев и слоя ЖК соответственно.

Решая уравнение (17) относительно  $\zeta(d)$ , находим пропускание ЖК- ячейки. Если на ЖК - ячейку падает неполяризованный свет, характеризуемый  $p$ - и  $s$ - компонентами, то его пропускание определяется некогерентным сложением пропусканий для соответствующих поляризационных составляющих падающего на оптическую систему света.

Таким образом, для нахождения пропускания света через ЖК- ячейку необходимо согласно выражению (18) вычислить матрицу  $P(d, 0)$ . В следующем разделе описана методика вычисления матрицы распространения для ЖК.

#### 2.4.1 Методика расчета матрицы распространения неоднородного анизотропного слоя жидкого кристалла

С момента предложения Берреманом в 1973 г. матричного метода расчета коэффициентов пропускания слоистых анизотропных неоднородных сред принципиально новых методов вычисления матриц распространения не появилось, так как самим Берреманом было предложено два способа:

- 1) вычисление матрицы распространения на основе вычисления собственных векторов и собственных значений для световых волн, распространяющихся в анизотропной среде;
- 2) вычисление матрицы распространения путем разложения в ряд.

В 1988 г. Велером и Беккером было показано, что для вычисления матрицы распространения для анизотропной среды методом разложения в ряд Тейлора достаточно использовать ограниченное число членов этого ряда. Этот способ вычисления матрицы распространения остается одним из главных и до настоящего времени. Недавно Палто предложил способ вычисления матрицы распространения для двуосной анизотропной среды путем вычисления собственных значений и собственных векторов, приведя в своей работе выражения и алгоритм для их вычисления. Однако заметим, что подавляющее большинство ЖК являются локально одноосными и поэтому для нахождения собственных значений и собственных векторов достаточно иметь выражения для случая одноосных кристаллов. Такие простые выражения были получены В.И. Цоем в 1983 г. и в последствии программно реализованы в комплексах ЭЛЕКТРООПТИКА - М и MOUSE - LCD, поэтому, кратко изложим эту методику вычислений.

Весь неоднородный слой ЖК, следуя стандартной методике, разобьем на однородные подслои толщиной  $dz$ . Каждый из подслоев можно считать одноосным кристаллом с главными оптическими диэлектрическими постоянными  $\epsilon_e = n_e^2$ ,  $\epsilon_o = n_o^2$  ( $n_o$  и  $n_e$  - показатели преломления для обыкновенной и необыкновенной волн соответственно). В этом случае матрица распространения для  $i$  - го подслоя  $P_i$  можно вычислить следующим образом

$$P_i = X K X^{-1}, \quad (19)$$

где  $K$  - диагональная матрица фазовых множителей обыкновенных и необыкновенных волн в прямом и обратном направлениях;  $X$  - матрица, составленная из 4 - х векторов столбцов поля этих волн,  $X^{-1}$  - матрица обратная к матрице  $X$ .

Так как мы считаем, что подслои являются одноосными кристаллами, то элементы первых двух столбцов матрицы  $X$  имеют вид:

$$\begin{aligned}
X_{11} &= a_{1x} & X_{21} &= a_{2x} \\
X_{21} &= n_o d_{1y} & X_{22} &= n_o d_{2y} \\
X_{31} &= a_{1y} & X_{32} &= a_{2y} \\
X_{41} &= -n_o d_{1x} & X_{42} &= -n_o d_{2x}
\end{aligned}
, \quad \vec{a}_1 = [\vec{n} \times \vec{M}_1] / \sqrt{1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_1)^2} , \quad \vec{a}_2 = [\vec{n} \times \vec{M}_2] / \sqrt{1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_2)^2} , \quad (20)$$

где  $\vec{a}_{1,2}$  - единичный вектор обыкновенной волны, распространяющейся в направлении  $\vec{M}_{1,2}$  в подслое с директором  $\vec{n}$ ;  $\vec{d}_{1,2} = [\vec{M}_{1,2} \times \vec{a}_{1,2}]$ ; индекс 1 относится к прямой обыкновенной волне, а индекс 2 к обратной обыкновенной волне.

Два оставшихся столбца, которые связаны с распространением необыкновенной прямой и необыкновенной обратной волн, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
X_{13} &= d_{31x} + tg \zeta_3 \sin \alpha_3 \\
X_{23} &= -n_3 a_{3y} \\
X_{33} &= d_{3y} \\
X_{43} &= n_3 a_{3x} \\
X_{14} &= d_{4x} + tg \zeta_4 \sin \alpha_4 \\
X_{24} &= -n_4 a_{4y} \\
X_{34} &= d_{4y} \\
X_{44} &= n_4 a_{4x}
\end{aligned}
, \quad \vec{a}_3 = [\vec{n} \times \vec{M}_3] / \sqrt{1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_3)^2} , \quad \vec{a}_4 = [\vec{n} \times \vec{M}_4] / \sqrt{1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_4)^2} , \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
tg \zeta_3 &= (\varepsilon_e - \varepsilon_o)(\vec{n} \cdot \vec{M}_3) \sqrt{1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_3)^2} / (\varepsilon_e - (1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_3)^2) + \varepsilon_o(\vec{n} \cdot \vec{M}_3)^2) \\
tg \zeta_4 &= (\varepsilon_e - \varepsilon_o)(\vec{n} \cdot \vec{M}_4) \sqrt{1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_4)^2} / (\varepsilon_e - (1 - (\vec{n} \cdot \vec{M}_4)^2) + \varepsilon_o(\vec{n} \cdot \vec{M}_4)^2)
\end{aligned}
, \quad \vec{d}_{3,4} = [\vec{M}_{3,4} \times \vec{a}_{3,4}] , \quad (22)$$

где  $\vec{a}_{3,4}$  - единичный вектор необыкновенной волны, распространяющейся в направлении  $\vec{M}_{3,4}$  в подслое с директором  $\vec{n}$ ; индекс 3 относится к прямой необыкновенной волне, а индекс 4 к обратной необыкновенной волне.

Элементы матрицы  $K$  в этом случае имеет вид:

$$K = \begin{vmatrix} e^{i \frac{\omega}{c} \cos \alpha_1 dz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i \frac{\omega}{c} \cos \alpha_2 dz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i \frac{\omega}{c} \cos \alpha_3 dz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i \frac{\omega}{c} \cos \alpha_4 dz} \end{vmatrix} . \quad (23)$$

Тогда матрица всего неоднородного слоя ЖК можно вычислить следующим образом:

$$P_{LC} = \prod_{i=1}^N P_i , \quad (24)$$

где  $N$  – число однородных подслоев.

Приведенные выше выражения пригодны для не поглощающего слоя ЖК, но если ЖК обладает свойством дихроизма и главные оси эллипсоида поглощения совпадают с главными осями эллипсоида показателей преломления (что верно для большинства случаев в ЖК – системах отображения информации), то собственные вектора остаются такими же, как и для не поглощающего ЖК. Тогда матрица  $X$  остаются без изменений, а учет поглощения осуществляется путем введения коэффициентов поглощения в матрицу  $K$ :

$$K = \begin{vmatrix} e^{\frac{i\omega}{c} \cos \alpha_1 dz - a_1^1 dz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\omega}{c} \cos \alpha_2 dz - a_2^2 dz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\frac{i\omega}{c} \cos \alpha_3 dz - a_3^3 dz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{\frac{i\omega}{c} \cos \alpha_4 dz - a_4^4 dz} \end{vmatrix}, \quad (25)$$

где  $a_1^1$  – коэффициент поглощения для прямой обыкновенной волны;  $a_2^2$  – коэффициент поглощения для обратной обыкновенной волны;  $a_3^3$  – коэффициент поглощения для прямой необыкновенной волны;  $a_4^4$  – коэффициент поглощения для обратной необыкновенной волны. Коэффициенты поглощения для прямых и обратных волн одинаковы, а коэффициенты поглощения для прямой необыкновенной и прямой обыкновенной волн можно вычислить с помощью выражений (20 - 25).

Таким образом, используя эти выражения можно моделировать электрооптические характеристики ЖК – устройств отображения информации, которые используют явление управляемого электрическим полем двулучепреломления и эффект «гость – хозяин» в различных структурах. Заметим, что описанная выше методика в отличие от методики Палто имеет более высокое быстродействие, так как для нахождения неизвестных величин используются прямые аналитические выражения. Более того в 1992 Н.К. Сидоровым получены аналитические выражения для нахождения коэффициентов преломления для необыкновенных волн, распространяющихся в двуосном кристалле при произвольной взаимной ориентации падающего света и оптических осей кристалла, что так же позволяет написать прямые аналитические выражения для нахождения собственных значений и собственных векторов для двуосных кристаллов.

#### 2.4.2 Модификация матричного метода Берремана и результаты расчета оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейках, полученных с помощью различных вычислительных методов

На рис. 12 показаны результаты расчета зависимости пропускания от управляющего электрического напряжения для ЖК- ячейки, работающей на основе твист- эффекта, полученные с помощью различных матричных методов и аналогичная экспериментальная кривая. Как видно из этого рисунка, на начальном участке расчетная зависимость по методу Берремана имеет несколько осцилляций, что является следствием теоретического учета многолучевой интерференции в ЖК- ячейки (эффект «интерферометра Фабри – Перо»). Этот эффект проявляется только в условиях использования когерентного источника освещения, а в условиях использования реальных индикаторных устройств освещение является некогерентным. В следствии этого аналогичные экспериментальная и рассчитанная с помощью матриц Джонса и когерентности зависимости этих осцилляций не имеют. На других участках теоретические кривые, полученные с помощью обоих матричных методов, и экспериментальная зависимость практически совпадают. Из этого сравнения следует, что введенное нами в предыдущем разделе предположение об отсутствии многолучевой интерференции в ЖК - ячейке экспериментально оправдано, так как обычно в качестве источника излучения служит некогерентный естественный или искусственный осветитель. Однако, если в выражении (17) положить  $\zeta_i(0) = 0$ , что соответствует отсутствию когерентного взаимодействия между падающей на ЖК- ячейку волной и отраженными от различных границ раздела в ячейке волнами, то ситуация изменится. Поэтому, несколько видоизменив методику вычисления пропускания ЖК- ячейки и переписывая выражение (17) в следующем виде

$$\zeta_i(d) = P(d, 0) \zeta_i(0), \quad (26)$$

можно учесть в методе Берремана некогерентность падающего излучения. Таким образом, используя вместо выражения (17) выражение (26) и применяя методику, которая описана выше, находим пропускание ЖК - ячейки. Однако даже такое упрощение решения задачи

сталкивается с определенными трудностями, так как в конструкции всех типов индикаторных устройств входят электродные и ориентирующие слои, показатели преломления которых существенным образом отличаются друг от друга и от показателей преломления ЖК. Это различие также приводит к появлению нежелательного эффекта «интерферометра Фабри – Перо», который отсутствует в реальности из-за некогерентного освещения индикатора. В силу этого нами предлагается другой подход для вычисления коэффициентов пропускания и отражения для ЖК – устройств отображения информации, который состоит в следующем.

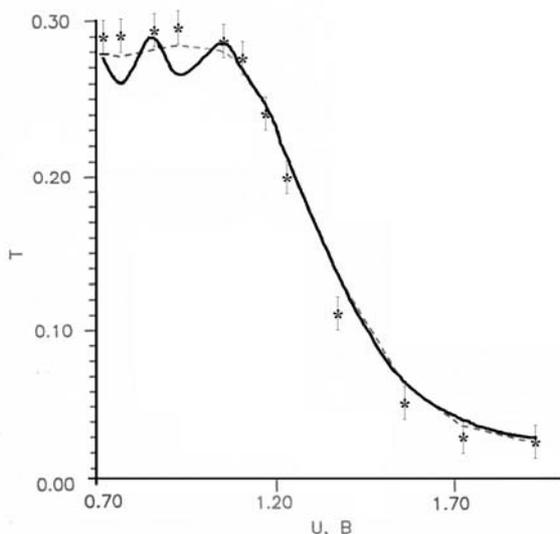


Рис. 12 Сравнение результатов расчета с помощью метода матриц Берремана (сплошная линия) и с помощью метода матриц Джонса (пунктирная линия) между собой и с экспериментальными данными (звездочки)

В ЖК - устройстве выделяются элементы, которые проявляют свойства анизотропии и которые являются изотропными. Тогда оптические характеристики изотропных элементов рассчитываются с помощью соответствующих матриц Джонса (см. предыдущий параграф), а для анизотропных элементов – с помощью матриц Берремана. При этом следует учесть, что в некоторых изотропных элементах необходимо учитывать многолучевую интерференцию. Такое явление наблюдается, например, в структуре электрод – ориентирующий слой из-за малых толщин этих слоев и больших скачков показателей преломления. Этот учет можно сделать, если для вычисления матриц Джонса использовать матрицы Абелеса. Далее заметим, что при распространении света сквозь неидеальные поляризаторы основную роль играет явление дихроизма, которое количественно верно и просто можно описать с помощью матриц Джонса. Таким образом, формализм матриц Берремана необходим только для вычисления коэффициентов пропускания и отражения ЖК или фазовых компенсаторов (если они используются в индикаторе). При этом переход от матриц Берремана к матрице Джонса осуществляется по схеме, которая кратко описывается ниже.

Пусть  $(E_{ip}, E_{is})$ ,  $(E_{rp}, E_{rs})$  и  $(E_{tp}, E_{ts})$  представляют собой соответственно компоненты векторов электрического поля падающей, отраженной и прошедшей волн, параллельные ( $p$ ) и перпендикулярные ( $s$ ) плоскости падения. Для того чтобы избежать нежелательного эффекта «интерферометра Фабри – Перо» в ЖК предположим, что слой ЖК находится между двумя полу бесконечными изотропными средами с показателями преломления  $N_0$  и  $N_2$ :

$$N_0 = N_2 = \left( \frac{n_e + n_0}{2} \right), \quad (27)$$

где  $n_0$  и  $n_e$  – соответственно обыкновенный и необыкновенный показатели преломления ЖК. Заметим, что применение граничного условия в виде (27) позволяет избежать эффекта «интерферометра Фабри – Перо», так как в этом случае не наблюдается большого скачка показателя преломления на границах раздела изотропная подложка – ЖК – изотропная подложка. Если необходимо учесть многолучевую интерференцию в слое ЖК, то это

граничное условие необходимо переписать для случая, когда в роли изотропной подложки выступает ориентирующий слой со своим показателем преломления. Это явление необходимо учитывать, если в качестве источника освещения используются когерентные излучатели.

Таким образом, для немагнитных сред можно рассчитать три обобщенных вектора поля  $\xi_i$ ,  $\xi_r$ , и  $\xi_t$  падающей, отраженной и прошедшей волн, исходя только из  $p$ - и  $s$ - компонент электрического поля:

$$\xi_i = \begin{bmatrix} E_{ip} \cos \varphi_0 \\ N_0 E_{ip} \\ E_{is} \\ N_0 E_{is} \cos \varphi_0 \end{bmatrix}, \xi_r = \begin{bmatrix} -E_{rp} \cos \varphi_0 \\ N_0 E_{rp} \\ E_{rs} \\ -N_0 E_{rs} \cos \varphi_0 \end{bmatrix}, \xi_t = \begin{bmatrix} E_{tp} \cos \varphi_2 \\ N_2 E_{tp} \\ E_{ts} \\ N_2 E_{ts} \cos \varphi_2 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где  $\varphi_0$  и  $\varphi_2$  – углы распространения света в изотропных средах с показателями преломления  $N_0$  и  $N_2$  соответственно и которые можно вычислить из угла падения света на устройство с помощью закона преломления.

Подставляя выражения (28) в граничные условия (17) и (27), получаем выражения для векторов поля  $\xi(0)$  и  $\xi(d)$  на границах анизотропного слоя  $z = 0$  и  $z = d$  через векторы полей  $\xi_i$ ,  $\xi_r$  и  $\xi_t$ . Затем с помощью матрицы слоя  $\mathbf{P}$  связываем поля на границах слоя  $z = 0$  и  $z = d$  и получаем следующее уравнение:

$$\begin{bmatrix} E_{ip} \cos \varphi_2 \\ N_2 E_{ip} \\ E_{is} \\ N_2 E_{is} \cos \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (E_{ip} - E_{rp}) \cos \varphi_{20} \\ N_0 (E_{ip} + E_{rp}) \\ (E_{is} + E_{rs}) \\ N_0 (E_{is} - E_{rs}) \cos \varphi_0 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Уравнение (29) можно затем разложить на четыре линейных алгебраических уравнения для шести компонент поля  $(E_{ip}, E_{is})$ ,  $(E_{rp}, E_{rs})$  и  $(E_{tp}, E_{ts})$ . Компоненту  $E_{ip}$  легко исключить из первого и второго уравнений, а  $E_{is}$  – из третьего и четвертого уравнений. Это приводит к двум линейным алгебраическим уравнениям:

$$\begin{aligned} a_{ip} E_{ip} + a_{is} E_{is} + a_{rp} E_{rp} + a_{rs} E_{rs} &= 0 \\ b_{ip} E_{ip} + b_{is} E_{is} + b_{rp} E_{rp} + b_{rs} E_{rs} &= 0, \end{aligned} \quad (30)$$

где

$$\begin{aligned} a_{ip} &= \cos \varphi_0 (P_{11} N_2 - P_{21} \cos \varphi_2) + N_0 (P_{12} N_2 - P_{22} \cos \varphi_2) \\ a_{rp} &= -\cos \varphi_0 (P_{11} N_2 - P_{21} \cos \varphi_2) + N_0 (P_{12} N_2 - P_{22} \cos \varphi_2) \\ a_{is} &= N_0 \cos \varphi_0 (P_{14} N_2 - P_{24} \cos \varphi_2) + (P_{13} N_2 - P_{23} \cos \varphi_2) \\ a_{rs} &= -N_0 \cos \varphi_0 (P_{14} N_2 - P_{24} \cos \varphi_2) + (P_{13} N_2 - P_{23} \cos \varphi_2) \\ b_{ip} &= \cos \varphi_0 (P_{31} N_2 \cos \varphi_2 - P_{41}) + N_0 (P_{32} N_2 \cos \varphi_2 - P_{42}) \\ b_{rp} &= -\cos \varphi_0 (P_{31} N_2 \cos \varphi_2 - P_{41}) + N_0 (P_{32} N_2 \cos \varphi_2 - P_{42}) \\ b_{is} &= N_0 \cos \varphi_0 (P_{34} N_2 \cos \varphi_2 - P_{44}) + (P_{33} N_2 \cos \varphi_2 - P_{43}) \\ b_{rs} &= -N_0 \cos \varphi_0 (P_{34} N_2 \cos \varphi_2 - P_{44}) + (P_{33} N_2 \cos \varphi_2 - P_{43}) \end{aligned} \quad (31)$$

Уравнения (30) можно записать в следующей матричной форме

$$\begin{bmatrix} E_{rp} \\ E_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{pp} & R_{ps} \\ R_{sp} & R_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ip} \\ E_{is} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{R} \mathbf{E}_i$$

Матрица  $\mathbf{R}$  представляет собой амплитудную комплексную  $2 \times 2$  матрицу отражения

$$\mathbf{R} = (a_{rs} b_{rp} - a_{rp} b_{rs})^{-1} \begin{bmatrix} (a_{ip} b_{rs} - a_{rs} b_{rp}) & (a_{is} b_{rs} - a_{rs} b_{is}) \\ (a_{rp} b_{ip} - a_{ip} b_{rp}) & (a_{rp} b_{is} - a_{is} b_{rp}) \end{bmatrix} \quad (33)$$

Путем подстановки величин  $E_{rp} = R_{pp} E_{ip} + R_{ps} E_{is}$  и  $E_{rs} = R_{sp} E_{ip} + R_{ss} E_{is}$  во второе и третье уравнения, получающиеся при разложении (29), компоненты отраженного поля исключаются. В результате мы получаем два линейных уравнения, которые связывают компоненты прошедшего поля ( $E_{ip}$ ,  $E_{is}$ ) только с компонентами падающего поля ( $E_{ip}$ ,  $E_{is}$ ). Полученные таким образом уравнения можно записать в виде

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{T}\mathbf{E}_i, \quad (34)$$

где

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_{pp} & T_{ps} \\ T_{sp} & T_{pp} \end{bmatrix}, \quad (35)$$

Матрица  $\mathbf{T}$  представляет собой амплитудную комплексную  $2 \times 2$  матрицу пропускания с элементами

$$\begin{aligned} T_{pp} &= [(P_{21} \cos \varphi_0 + P_{22} N_0) + R_{pp}(-P_{21} \cos \varphi_0 + P_{22} N_0) + R_{sp}(P_{23} - P_{24} N_0 \cos \varphi_0)]/N_2, \\ T_{ps} &= [(P_{23} + P_{24} N_0 \cos \varphi_0) + R_{ps}(-P_{21} \cos \varphi_0 + P_{22} N_0) + R_{ss}(P_{23} - P_{24} N_0 \cos \varphi_0)]/N_2, \\ T_{sp} &= (P_{31} \cos \varphi_0 + P_{32} N_0) + R_{pp}(-P_{31} \cos \varphi_0 + P_{32} N_0) + R_{sp}(P_{33} - P_{34} N_0 \cos \varphi_0), \\ T_{ss} &= (P_{33} + P_{34} N_0 \cos \varphi_0) + R_{ps}(-P_{31} \cos \varphi_0 + P_{32} N_0) + R_{ss}(P_{33} - P_{34} N_0 \cos \varphi_0). \end{aligned} \quad (36)$$

Определение матриц отражения  $\mathbf{R}$  и пропускания  $\mathbf{T}$  завершает решение проблемы. Последовательность операций, необходимых для расчета  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{T}$  при заданных значениях тензоров диэлектрической проницаемости  $\boldsymbol{\varepsilon}$  и оптического вращения  $\boldsymbol{\rho}$ , представлена схематически на рис. 13. Отметим, что полученные матрицы Джонса отражения и пропускания записаны в системе координат, связанной с  $p$ - и  $s$ -компонентами световой волны, поэтому если матрицы Джонса других элементов ЖК – устройства записаны для других систем координат, то необходимо матрицы всех элементов записать в одной и той же системе координат.

Рассмотрим пример использования модифицированного матричного метода Берремана. Для этого используем следующий алгоритм расчета оптических характеристик ЖК – устройств отображения информации на примере стандартного твист – индикатора. Как известно стандартный просветный твист – индикатор состоит из следующей последовательности оптических элементов: входной поляризатор – стекло – электрод – ориентирующий слой – ЖК – ориентирующий слой – электрод – стекло – выходной поляризатор. Для расчета оптических характеристик поляризаторов, стекла и учета френелевских потерь на отражение от внешних поверхностей индикатора используются соответствующие матрицы Джонса, расчет которых представлен в предыдущем разделе. Потери на системах электрод – ориентирующий слой рассчитываются с помощью матриц Абелеса. Для расчета оптических характеристик ЖК – слоя используем описанный выше модифицированный метод Берремана (выражения (20) – (25), блок – схема рис. 13). Блок – схема, которая соединяет в себе применение различных матричных формализмов, показана на рис. 14.

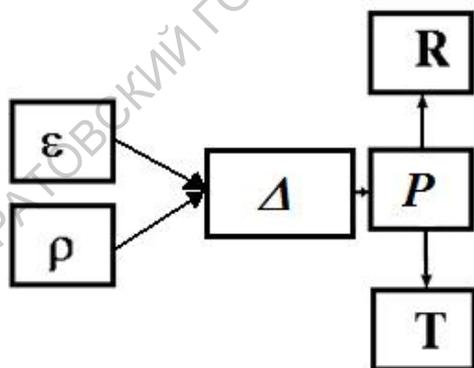


Рис.13. Схематичное изображение последовательности операций, необходимых для расчета матриц отражения  $\mathbf{R}$  и пропускания  $\mathbf{T}$  по тензорам диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости и оптической активности (вращения).

На рис. 15 представлены рассчитанные по методу Берремана с использованием выражений описанной выше методики и по методу матриц Джонса и когерентности зависимости пропускания от управляющего напряжения ЖК- ячейки, работающей на основе

твист- эффекта, и измеренная аналогичная зависимость. Как видно из этого рисунка, две теоретические зависимости практически совпадают друг с другом во всем интервале управляющих напряжений и одновременно количественно хорошо согласуются с экспериментально полученной кривой. Отметим, что для нормального падения света метод матриц Джонса и модифицированный метод Берремана дают одну и ту же точность совпадения расчетных и экспериментальных данных, которая не превышает 5%.

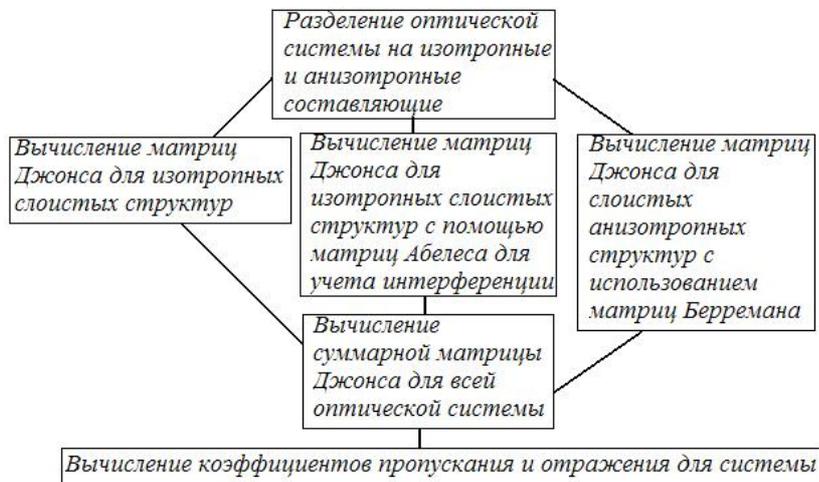


Рис. 14. Блок – схема для применения различных матричных формализмов при расчете коэффициентов пропускания и отражения слоистой среды

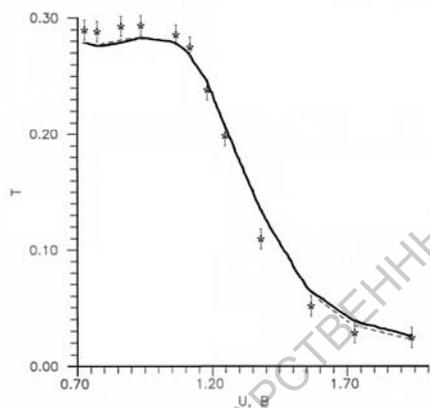


Рис. 15 Сравнение результатов расчета с помощью модифицированного метода матриц Берремана (сплошная линия) и с помощью метода матриц Джонса (пунктирная линия) между собой и с экспериментальными данными (звездочки)

Таким образом, для нормального падения света предлагаемая методика расчета оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК – ячейках имеет ту же точность расчетов, что и более строгий метод Берремана. С другой стороны, использование матриц  $2 \times 2$  в методе Джонса вместо матриц  $4 \times 4$  в методе Берремана дает выигрыш в быстродействии примерно в 5 раз. Это позволяет считать, что для моделирования оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК- ячейках метод матриц Джонса и когерентности более практичен, чем матричный метод Берремана, так как при той же точности расчетов имеет более высокое быстродействие. Особо следует отметить, что повышенное быстродействие разработанного нами метода и алгоритма расчета сказывается при расчете пространственной зависимости оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК и ЖК – устройствах, так как в этом случае количество параметров, оказывающих влияние на эти характеристики, еще более возрастает. Одновременно с этим следует заметить, что наиболее эффективным видится подход, сочетающий в себе использование двух матричных методов Берремана и Джонса, как это было сделано выше. При этом предлагается использовать следующий подход. Вся неоднородная анизотропная система, разделяется на плоскопараллельные изотропные и анизотропные слои. Для описания распространения света через изотропные слои используется классический метод

матриц Джонса, а для расчета распространения света через анизотропные слои используются матрицы Джонса, рассчитанные на основе матриц Беррремана. Если необходимо учесть многолучевую интерференцию в изотропных слоях, то для расчета матриц Джонса таких систем применяется метод матриц Абелеса. Если необходимо учесть многолучевую интерференцию в анизотропных слоях, то соответствующие матрицы Джонса рассчитываются с использованием канонического метода Беррремана, а если это явление не наблюдается, то используется подход, описанный выше.

## 2.5 Особенности метода решения задачи о вычислении динамического отклика жидкокристаллических устройств обработки информации

Для численного моделирования ориентационной динамики директора в слое немато – холестерического ЖК используются полученные в конце 70-х – середине 80-х годов уравнения движения в безинерционном приближении, но с учетом взаимного влияния ориентации директора и течения. Чтобы иметь возможность рассматривать любые наклона директора к поверхности слоя, а также для повышения устойчивости схемы вычислений используют динамические уравнения для всех проекций  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$  директора в декартовой системе координат.

Если между границами  $z = 0$  и  $z = d$  слоя ЖК приложено электрическое напряжение  $U$ , то при однородном по всей плоскости XY отклике плотность вращающей силы со стороны внешнего поля на директор задается равенством

$$G_z = \Delta \varepsilon \left[ \frac{U}{4\pi} \left[ (\Delta \varepsilon n_z^2 + \varepsilon_{\perp}) \cdot \left( \int_0^d \frac{dz}{(\Delta \varepsilon n_z^2 + \varepsilon_{\perp})} \right) \right] \right]^2. \quad (37)$$

Динамика поворотов директора определяется следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \gamma_1 \frac{\partial n_x}{\partial z} &= \Lambda n_x - \frac{\delta F}{\delta n_x} - \mu_2 n_z \frac{\partial v_x}{\partial z}, \\ \gamma_1 \frac{\partial n_y}{\partial z} &= \Lambda n_y - \frac{\delta F}{\delta n_y} - \mu_2 n_z \frac{\partial v_y}{\partial z}, \\ \gamma_1 \frac{\partial n_z}{\partial z} &= \Lambda n_z - \frac{\delta F}{\delta n_z} - \mu_3 n_x \frac{\partial v_x}{\partial z} - \mu_3 n_y \frac{\partial v_y}{\partial z} + G_z, \\ n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 &= 1 \end{aligned}, \quad (38)$$

где  $F$  – плотность упругой энергии ЖК;  $v_i$  – компоненты скорости течения;  $\Lambda$  – константа Лагранжа;  $\gamma_i = \mu_3 - \mu_2$ ;  $\mu_i$  – коэффициенты вязкости Лесли,  $i = 1, 2, \dots, 6$ .

Вращение директора и градиент скорости течения создают напряжения, тензор которых не зависит от координат и имеет вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{zx} &= \mu_2 n_z \frac{\partial n_x}{\partial t} + \mu_3 n_x \frac{\partial n_z}{\partial t} + \frac{1}{2} (2\mu_1 n_x^2 n_z^2 - \mu_2 n_z^2 + \mu_4 + \mu_3 n_x^2 + \mu_5 n_z^2 + \mu_6 n_x^2) \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{1}{2} (2\mu_1 n_z^2 + \mu_3 + \mu_6) n_x n_y \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \sigma_{zy} &= \mu_2 n_z \frac{\partial n_y}{\partial t} + \mu_3 n_y \frac{\partial n_z}{\partial t} + \frac{1}{2} (2\mu_1 n_y^2 n_z^2 - \mu_2 n_z^2 + \mu_4 + \mu_3 n_y^2 + \mu_5 n_z^2 + \mu_6 n_y^2) \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{1}{2} (2\mu_1 n_z^2 + \mu_3 + \mu_6) n_x n_y \frac{\partial v_x}{\partial z}, \end{aligned} \quad (39)$$

где  $\mu_6 - \mu_5 = \mu_3 + \mu_2$ .

Вместе с условием нулевой скорости течения на границах слоя ЖК с опорными поверхностями, записывается в следующем виде:

$$\int_0^d \frac{\partial v_x}{\partial z} dz = 0, \int_0^d \frac{\partial v_y}{\partial z} dz = 0, \quad (40)$$

восемь уравнений (38) – (40) содержат восемь неизвестных.

В итоге динамические уравнения ориентации директора принимают форму

$$\begin{aligned}
\gamma_1 \frac{\partial n_x}{\partial t} &= B_1 + A_{11} \frac{\partial v_x}{\partial z} + A_{12} \frac{\partial v_y}{\partial z}, \\
\gamma_1 \frac{\partial n_y}{\partial t} &= B_2 + A_{21} \frac{\partial v_x}{\partial z} + A_{22} \frac{\partial v_y}{\partial z}, \\
\gamma_1 \frac{\partial n_z}{\partial t} &= B_3 + A_{31} \frac{\partial v_x}{\partial z} + A_{32} \frac{\partial v_y}{\partial z}.
\end{aligned}
\tag{41}$$

Коэффициенты  $B_i$ ,  $A_{i1}$ ,  $A_{i2}$  определяются текущей конфигурацией поля директора  $n_{x,y,z}(z, t)$ ,  $\partial n_{x,y,z}/\partial z$  и полем плотности внешних вращающих сил  $G_z(z, t)$ . Градиенты  $\partial v_{x,y}/\partial z$  компонентов скорости течения определяются из уравнений (39), в которых величины  $\sigma_{zx,zy}$  предварительно вычисляются путем интегрирования тех же уравнений (39) с учетом условий (40).

Уравнения (41) удается проинтегрировать численно с помощью явной конечно-разностной схемы 2 – го порядка с предсказанием в  $m$  – м узле пространственной сетки  $z_m = md/N$  из  $N + 1$  точек:

$$\tilde{n}_i^m(t + \Delta t) = n_i^m(t) + \frac{\partial n_i^m}{\partial t} \Delta t
\tag{42}$$

и коррекцией

$$\begin{aligned}
n_i^m(t + \Delta t) &= n_i^m(t) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial n_i^m}{\partial t}(t) + \frac{\partial \tilde{n}_i^m}{\partial t}(t + \Delta t) \right] \Delta t; \\
n_i^0(t + \Delta t) &= n_i^0(0); \\
n_i^N(t + \Delta t) &= n_i^N(0).
\end{aligned}
\tag{43}$$

Шаг интегрирования подбирается из условия близости величин (42) и (43). Причем после каждого шага (43) устраняется погрешность, нарушающая нормировку директора на единицу.

Принятая методика решения задачи содержит:

1. Решение статической деформационной задачи (определение углов наклона директора по толщине слоя ЖК; см. глава 1) и оптической задачи (определение характеристики оптического пропускания в зависимости от управляющего напряжения: см. глава 1). Из зависимости среднего по спектру пропускания ЖК – устройства от управляющего напряжения находятся значения рабочих напряжений  $U_{вкл}$  и  $U_{выкл}$ , а также для определения углов максимального отклонения директора в центральном слое ЖК соответствующих этим значениям управляющих напряжений.
2. Расчет времени реакции  $\tau_p$  и времени релаксации  $\tau_{рл}$  в диапазонах напряжений  $U_{вкл} \rightarrow U_{выкл}$  и обратно. Программой расчета предусматривалось определение  $\tau_p$  и  $\tau_{рл}$  как времени  $t$  достижения максимального угла наклона директора в центральном слое ЖК, соответствующего указанным напряжениям.

## 2.6 Сравнение экспериментальных и рассчитанных оптических характеристик электрооптических эффектов в ЖК-ячейках

Для апробации вычислительных методов и системы компьютерного моделирования, разработанной на их основе, нами проведено сравнение вычисленных и экспериментальных оптических характеристик электрооптических эффектов «гость- хозяин» и твист- эффект в ЖК – ячейках.

Экспериментально и теоретически исследовались зависимости пропускания от напряжения и индикатрисы контрастного отношения ЖК- индикаторов на твист- эффекте и эффекте «гость- хозяин» для ячеек, заполненных модельным ЖК- веществом 4- n- пентил4'-цианобифенилом (5ЦБ) с добавлением дихроичного красителя КД-1. Экспериментальные данные получены для трех температур 24°, 28° и 32°C. Температуры выбирались с расчетом охватить большую часть интервала существования мезофазы нематика 5ЦБ.

Для получения экспериментальных характеристик электрооптических эффектов в ЖК

использовались стандартные установки с аналоговым типом регистрации данных.

Значения оптических плотностей для красителя КД- 1 и нейтральных пленочных поляризаторов, которые затем использовались в расчетах, определялись из поляризованных спектров пропускания.

Для учета в расчетах потерь света, связанных с многолучевой интерференцией в ориентирующих и проводящих слоях, нами использовались средние технологические параметры.

На рис. 15 показаны зависимости пропускания от напряжения для ЖК- ячеек, работающих на твист- эффекте и в нормальном направлении. Сравнимыми величинами для твист- ячеек выбирались пропускания на 90% ( $T_{90}$ ) и 10% -ных ( $T_{10}$ ) уровнях от начального и соответствующие им управляющие напряжения  $U_{90}$  и  $U_{10}$ , а также крутизна вольт – контрастной характеристики  $S$

$$S = \frac{T_{90} - T_{10}}{U_{90} - U_{10}}. \quad (44)$$

Вычисленные и экспериментальные значения этих величин представлены в таблице 2. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 10 %. Для ячеек, работающих на основе эффекта "гость- хозяин", сравнивались зависимости пропускания от управляющего напряжения по абсолютной величине. Различие вычисленных и измеренных значений величин пропускания не превышает 2 %. Такое расхождение экспериментальных и вычисленных данных для обоих электрооптических эффектов находится в пределах погрешности эксперимента и методики расчета. Расчетные и экспериментальные значения пороговых напряжений для обоих электрооптических эффектов совпадают в пределах 5%. Указанные расхождения измеренных и вычисленных сравниваемых значений характеристик сохраняются во всем температурном диапазоне существования мезофазы для 5ЦБ.

Таблица 2.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных для ЖК – ячеек, работающих на основе твист - эффекта

Параметр	Толщина ЖК – ячейки 7.5 мкм		Толщина ЖК – ячейки 9.2 мкм	
	$\lambda = 510$ нм	$\lambda = 615$ нм	$\lambda = 510$ нм	$\lambda = 615$ нм
	Экспериментальные данные			
$T_{90}, \%$	26.2	25.4	26.4	24.7
$T_{10}, \%$	2.9	2.8	3	2.7
$U_{90}, \%$	1.15	1.07	1.16	1.1
$U_{10}, \%$	1.75	1.43	1.8	1.56
$S, \%$	38.8	53.8	36.6	48.9
	Данные компьютерного моделирования			
$T_{90}, \%$	25.2	25.8	25.7	25.1
$T_{10}, \%$	2.8	2.9	2.9	2.8
$U_{90}, \%$	1.05	0.96	1.08	1.02
$U_{10}, \%$	1.65	1.43	1.72	1.5
$S, \%$	37.8	48.7	35.6	46.5

На рис. 16 представлены экспериментальные и вычисленные индикатрисы приведенного контрастного отношения для твист - эффекта при угле падения света  $45^\circ$ . Контрастное отношение определялось как отношение пропускания света, прошедшего через выключенную ( $U = 0В$ ) ячейку, к пропусканию света, прошедшего через включенную электрическим полем ячейку ( $U = 4В$ ). При этом контрастное отношение нормировалось на максимальное значение. Как показывает сравнение экспериментальных и расчетных данных среднее расхождение между ними не превышает 26%. При угле падения света, меньшем  $45^\circ$  расхождение между экспериментальными и вычисленными индикатрисами убывает, и для угла падения света  $30^\circ$  это расхождение не превышает 15%.

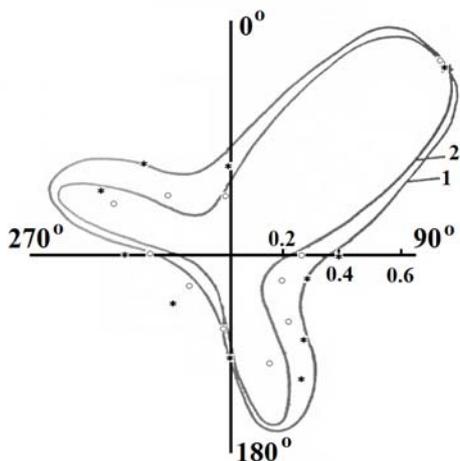


Рис. 16 Экспериментальные (звездочки и кружочки) и вычисленные (1 и 2) индикатрисы приведенного контрастного отношения для ЖК – ячеек на твист – эффекте.  
1, \* -  $\lambda = 534$  нм; 2, о -  $\lambda = 623$  нм. Толщина ЖК – слоя 7.5 мкм. Свет неполяризованный.

На рис. 17 показаны экспериментальные и вычисленные индикатрисы контрастного отношения для ЖК- ячеек, работающих на основе эффекта "гость- хозяин" при угле падения света  $45^\circ$ . В этом случае контрастное отношение определялось как отношение пропускания света через включенную электрическим полем ЖК- ячейку к пропусканию света ячейкой, на которую управляющее напряжение не подано. Среднее расхождение между вычисленными и измеренными индикатрисами контрастного отношения не превышает 6% и уменьшается с уменьшением угла падения света.



Рис. 17 Экспериментальные (о, \*) и вычисленные (1, 2) индикатрисы приведенного контрастного отношения для ЖК – ячеек на эффекте «гость – хозяин»  
а) – толщина ЖК – слоя 6 мкм; б) – толщина ЖК – слоя 10 мкм;  
1 и о – без поляризатора; 2 и \* - с поляризатором

Сопоставляя экспериментальные и рассчитанные оптические характеристики различных электрооптических эффектов в ЖК, можно говорить об их хорошем количественном совпадении. Это подтверждает законность использования разработанных вычислительных методов для моделирования оптических характеристик электрооптических эффектов и ЖК- устройств отображения информации, работающих на их основе. Следует отметить, что использование двухволнового приближения в совокупности с матрицами Джонса и когерентности для моделирования характеристик электрооптических эффектов управляемым электрическим полем двойного лучепреломления обеспечивает совпадение экспериментальных и расчетных данных в пределах 20% для угла падения света на систему не более  $60^\circ$ . В тоже время уменьшение угла падения света на ЖК-устройство приводит к уменьшению расхождения, которой при нормальном падении света составляет 5%. С другой стороны двухволновое приближение с использованием матриц когерентности и Джонса для моделирования характеристик эффекта управляемого электрическим полем дихроизма (эффект «гость –хозяин») обеспечивает совпадение расчетных и экспериментальных данных не превышающее ошибки измерений для любых углов падения света на ЖК-систему

## 2.7 Оптические характеристики жидкокристаллических устройств обработки информации

Для достаточно полного теоретического или экспериментального описания электрооптических и оптических характеристик ЖК – устройств отображения информации необходимо вычислить (измерить) целый ряд параметров, к которым в первую очередь относятся:

- оптические (пропускание, контраст, угловые зависимости контраста и пропускания, цветовые координаты);
- электрооптические (вольт - контрастная характеристика, степень мультиплексирования);
- динамические (времена реакции и релаксации).

Характеристики ЖК – затвора определяет большое число его конструктивно-технологических параметров. Поэтому наиболее полное (для инженерной практики) представление об особенностях этих зависимостей можно получить только методом компьютерного моделирования. Задача еще более усложняется, если ищется оптимальная конструкция устройства. В связи с этим нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК-дисплея использовалась система компьютерного моделирования *MOUSE-LCD*.

Для адекватного описания характеристик ЖК – устройства с целью выбора оптимальной конструкции удобно использовать следующий набор оптических характеристик:

среднее по спектру или для определенных длин волн пропускание (отражение) ЖК – устройства;

координаты цвета в цветовом треугольнике и ахроматичность изображения;

средний по спектру контраст изображения или контраст для определенных длин волн; индикатриса среднего или на определенной длине волны контраста изображения.

ЖК – затвор характеризуется двумя значениями пропускания для двух состояний:

«выключено» - управляющее напряжение на затвор не подано или его значение ниже порогового; «включено» - управляющее напряжение на затвор подано напряжение выше порогового значения. Между этими двумя состояниями должен быть обеспечен требуемый контраст изображения. В этом случае среднее по спектру пропускание устройства  $T_{off}$  для состояния «выключено» («включено»  $T_{on}$ ) определим следующим образом :

$$T_{off} = \frac{\int_{400}^{800} T_{off\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad T_{on} = \frac{\int_{400}^{800} T_{on\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad (45)$$

где  $T_{off(on)\lambda}$  - пропускание устройства в состоянии «выключено» («включено») на длине волны  $\lambda$ ;  $I_{\lambda}$  - спектральное распределение источника излучения  $D_{65}$  (или какого – либо другого источника излучения);  $K_{\lambda}$  - спектральная чувствительность глаза.

Если ЖК – устройство работает в отражательном режиме, то вместо коэффициентов пропускания  $T_{off}$  и  $T_{on}$  следует использовать коэффициенты отражения  $R_{off}$  и  $R_{on}$ , которые определяются аналогично формуле (45):

$$R_{off} = \frac{\int_{400}^{800} R_{off\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}, \quad R_{on} = \frac{\int_{400}^{800} R_{on\lambda} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{800} I_{\lambda} K_{\lambda} d\lambda},$$

где  $R_{off(on)\lambda}$  - отражение устройства в состоянии «выключено» («включено») на длине волны  $\lambda$ .

Тогда средний по спектру контраст изображения  $K$  вычисляется так:

$$K = \frac{T_{off}}{T_{on}}, \quad K = \frac{R_{off}}{R_{on}}. \quad (46)$$

Формула (46) написана для случая положительного контраста изображения, т.е. когда  $T_{off}(R_{off}) > T_{on}(R_{on})$ . В противном случае (отрицательный контраст изображения) контраст следует вычислять с помощью выражения:

$$K = \frac{T_{on}}{T_{off}}, K = \frac{R_{on}}{R_{off}}.$$

Координаты цвета  $(x, y)$  определяются с помощью выражений:

$$x = \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G, y = \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda / G,$$

$$G = \int_{400}^{800} \bar{x}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{y}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda + \int_{400}^{800} \bar{z}(\lambda) T_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda, \quad (47)$$

где  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  - кривые смещения трех основных цветов в цветовой системе координат  $(x, y, z)$ .

Ахроматичность изображения  $H$  мы определяем как расстояние текущей точки изображения с координатами цвета  $(x, y)$  от точки белого цвета  $D_{65}$  с координатами  $(x_{65}, y_{65})$ :

$$H = \sqrt{(x - x_{65})^2 + (y - y_{65})^2}. \quad (48)$$

Индикатриса контраста – зависимость контраста изображения от угла падения  $\varphi$  и азимута  $\zeta$  плоскости падения света. При этом азимут плоскости падения света обычно отсчитывается от направления ориентации молекул ЖК на фронтальной поверхности ЖК – ячейки по часовой стрелке. Часто для характеристики угловой зависимости контраста вводят понятие угла обзора устройства  $\Psi$ . В нашем случае углом обзора ЖК – устройства называется угол между двумя азимутальными направлениями плоскости падения света при фиксированном угле падения света, для которых контраст изображения  $C$  не ниже определенного уровня. Поясним это определение с помощью рис. 18. На рисунке представлена изоконтрастная кривая с уровнем контраста  $C = 30 : 1$  для некоторого ЖК – устройства в полярной системе координат  $(\varphi, \zeta)$ . Угол падения света меняется от  $0^{\circ}$  до  $60^{\circ}$ , азимут плоскости падения света меняется от  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$ . Если в качестве угла падения света на устройство выбрать  $\varphi = 30^{\circ}$  и значение контраста изображения  $C = 30 : 1$ , то очевидно, что в секторе между направлениями 1 и 2 выполняется условие  $C \geq 30 : 1$ . Поэтому угол обзора данного ЖК – устройства в этом случае будет равен  $\Psi = 110^{\circ}$ . Для угла падения  $\varphi = 40^{\circ}$  и того же значения контраста угол обзора этого ЖК – устройства будет существенно меньше ( $\Psi \sim 30^{\circ}$ ).

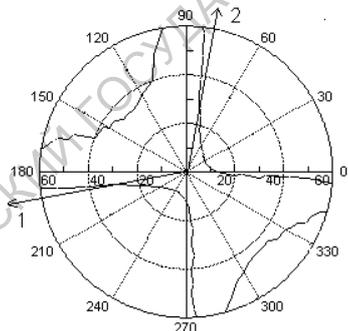


Рис. 18 Пример определения угла обзора ЖК – устройства отображения (обработки) информации.

## 2.8 Система компьютерного моделирования электрооптических и оптических характеристик ЖК- устройств отображения информации, работающих на основе различных электрооптических эффектов.

Как известно, на оптические характеристики электрооптических эффектов и устройств, работающих на их основе, оказывают большое влияние как физические параметры ЖК, так и большое число внешних факторов. Поэтому достаточно полное представление о зависимостях оптических параметров электрооптических эффектов от внутренних и внешних условий можно получить только методами численного

моделирования, так как возможности экспериментального исследования достаточно ограничены. В настоящее время для исследования оптических характеристик электрооптических эффектов и устройств отображения информации известна только одна универсальная система компьютерного моделирования "DIMOS", пригодная для моделирования различных электрооптических эффектов в ЖК и ЖК - устройств отображения информации. Нами на основе математических методов, описанных выше, разработана оригинальная система компьютерного моделирования характеристик электрооптических эффектов и устройств отображения информации, работающих на их основе. Основу системы компьютерного моделирования составляет пакет прикладных программ "ЭЛЕКТРООПТИКА- М".

### **2.8.1 Компьютерное моделирование характеристик электрооптических эффектов и устройств отображения информации на их основе**

Для проведения компьютерного моделирования характеристик электрооптических эффектов в ЖК и ЖК- устройств отображения информации нами разработаны три пакета программ: "ЭЛЕКТРООПТИКА - М", "MOUSE – LCD" и "ЭЛЕКТРООПТИКА – М – 2D". Все три пакета предназначены для моделирования электрооптических, оптических и эргономических характеристик следующих электрооптических эффектов и ЖК- устройств отображения информации, базирующихся на их основе: - эффект двойного лучепреломления в сверхзакрученных структурах ЖК (STN (supertwisted nematic)- эффект и STN- дисплей);

- эффект двойного лучепреломления в двойных сверхзакрученных структурах ЖК, наблюдаемый в двух расположенных последовательно друг за другом STN - структурах, помещенных между двумя скрещенными поляризаторами. Устройство на основе этого эффекта называется DSTN (duble layer supertwisted nematic) - дисплеем;
- эффекта двойного лучепреломления в тройной STN- экране, который представляет собой последовательность трех, расположенных друг за другом, STN- ячеек;
- эффект двойного лучепреломления в сверхзакрученной структуре ЖК, за которой расположена фазовая система, состоящая из одной или более анизотропных полимерных пленок, оптические оси которых ориентированы под углом друг к другу, и помещенных между двумя скрещенными поляризаторами. Устройство на основе этого эффекта называется NTN (neutral twisted nematic)-дисплеем;
- твист- эффект и TN (twist nematic)- дисплей;
- эффект "гость- хозяин" и GH (guest host)- дисплей;
- "штопор" - эффект;
- эффект двойного лучепреломления в  $\pi$ - ячейках.

Для достаточно полного теоретического или экспериментального описания электрооптических и оптических характеристик электрооптических эффектов и устройств отображения информации, работающих на их основе, необходимо вычислять или измерять целый ряд параметров, к которым в первую очередь относятся:

- оптические (пропускание, контраст, угловые зависимости контраста и пропускания, цветовые координаты);
- электрооптические (вольт - контрастная характеристика, времена реакции и релаксации).

В этой связи все три пакета программ разработаны так, чтобы с их помощью можно было рассчитать следующие характеристики электрооптических эффектов и устройств отображения информации на их основе:

- цветовые координаты, спектры пропускания, среднее по спектру пропускание и пространственные характеристики, зависимости всех характеристик от управляющего электрического напряжения, упругих и диэлектрических постоянных ЖК - материала, углов закрутки структуры и преднаклона ЖК и от конструктивных особенностей устройства (TN-, STN- , DSTN- , NTN- GH- дисплеи);
- времена реакции и релаксации оптического отклика ЖК - дисплея в зависимости от физических и конструктивных параметров устройства и рабочего вещества;

- пороговое напряжение возникновения полосовых диэлектрических доменов неустойчивости в закрученных структурах ЖК;
- оптические характеристики ЖК – дисплея в случае двумерной деформации слоя ЖК в электрическом поле при различной конфигурации управляющих электродов.

Первоначальная версия пакета программ была разработана "ЭЛЕКТРООПТИКА - М" для универсальных ЭВМ серии ЕС в конце 80-х годов, а затем несколько позже была реализована версия комплекса программ для персональных компьютеров для операционной системы MS DOS версии 3.0. Поэтому настоящие пакеты программ реализованы для работы в операционной системе FreeDOS, что отличает эти пакеты программ от других, которые рассчитаны на работу только в операционных системах семейства Windows. Расчетные модули программ, входящие в комплексы, написаны на свободно распространяемой версии языка программирования Fortran 77 (95), и их перекомпиляция в операционной системе семейства Linux позволит использовать эти программные комплексы в этой операционной системе. Более того, отдельные программные модули могут быть использованы самостоятельно от других модулей для решения самостоятельных подзадач (например, для расчета двумерной упругой деформации ЖК или динамики деформации ЖК в электрическом поле). Таким образом, при реализации этих программных комплексов использован принцип блочного построения, согласно которому для решения самостоятельной задачи используется самостоятельный программный блок, оформленный в виде отдельного исполняемого модуля или отдельного объектного модуля. При этом связь между отдельными программными модулями осуществляется только через файлы данных. Такой подход к моделированию электрооптических и оптических характеристик устройств отображения информации на ЖК позволяет рассматривать индикаторы произвольной конструкции, в которой используется эффект интерференции поляризованных лучей или эффект «гость – хозяин» или оба этих эффекта совместно.

Моделирование характеристик электрооптических эффектов в ЖК или ЖК- дисплея проводится в интерактивном режиме (режиме работы меню). Пакеты программ "ЭЛЕКТРООПТИКА - М", "MOUSE – LCD" и "ЭЛЕКТРООПТИКА – М – 2D" состоят из управляющих программ, программных модулей, осуществляющих конкретный расчет (DEFORM- S, OPTIC- S, DEFORM- D, OPTIC-D, DOMEN, BERREMAN-S, BERREMAN-D, 2D-DEFORM-S), и сервисных программ, которые информационно связывают между собой отдельные расчетные программные модули, а так же выводят результаты расчета в графическом и табличном виде на экран ЭВМ и на принтер. Назначение расчетных программных модулей следующее:

DEFORM- S предназначен для расчета одномерных статических деформационных полей углов ориентации директора в зависимости от физических и конструктивных параметров ЖК- дисплея и управляющего электрического поля. Результатом являются пространственные координатные зависимости углов ориентации директора ЖК и соответствующие управляющие напряжения;

2D-DEFORM-S предназначен для расчета двумерных статических деформационных полей углов ориентации директора в зависимости от физических и конструктивных параметров ЖК- дисплея и управляющего электрического поля. Результатом являются пространственные координатные зависимости углов ориентации директора ЖК и соответствующие управляющие напряжения;

OPTIC- S предназначен для расчета статического оптического отклика ЖК- дисплея от управляющего напряжения. Основан на методе матриц Джонса и матриц когерентности. Результатом расчета являются спектры пропускания, цветовые координаты, средние по спектру пропускание, контрастное отношение и их угловые зависимости как функции от управляющего напряжения;

- BERREMAN-S предназначен для расчета статического оптического отклика ЖК-дисплея от управляющего напряжения. Основан на методе матриц Берремана. Результатом расчета являются спектры пропускания, цветовые координаты, средние по спектру пропускание, контрастное отношение и их угловые зависимости как функции от управляющего напряжения;
- DEFORM-D предназначен для расчета динамики переориентации директора в ЖК-ячейке при переключении управляющего напряжения. Результатом является пространственная координатная зависимость и временная зависимость углов ориентации директора ЖК;
- OPTIC-D предназначен для расчета времен реакции и релаксации при переключении управляющего электрического напряжения между двумя рабочими значениями. Основан матричным методе Джонса и матриц когерентности. Результатом является временная зависимость цветовых координат и среднего по спектру пропускания ЖК- дисплея;
- BERREMAN-D предназначен для расчета времен реакции и релаксации при переключении управляющего электрического напряжения между двумя рабочими значениями. Основан на матричном методе Берремана. Результатом является временная зависимость цветовых координат и среднего по спектру пропускания ЖК- дисплея;
- DOMEN предназначен для расчета порогового напряжения возникновения полосовых доменов неустойчивости в закрученных структурах ЖК;

На рис. 19 показана блок – схема программных комплексов. Пакеты программ отличаются друг друга только набором программных модулей. Пакет «ЭЛЕКТРООПТИКА – М» состоит из модулей DEFORM- S, OPTIC- S, DEFORM- D, OPTIC-D и DOMEN. В пакет “MOUSE – LCD” включены следующие модули DEFORM- S, DEFORM- D, DOMEN, BERREMAN-S, BERREMAN-D. Пакет программ “ЭЛЕКТРООПТИКА – М – 2D” в своем составе имеет следующие программы DEFORM- S, OPTIC- S, DEFORM- D, OPTIC-D, DOMEN, BERREMAN-S, BERREMAN-D, 2D-DEFORM-S. Модуль OPTICS – S (BERREMAN – S) отличается от модуля OPTICS – D (BERREMAN – D) только тем, что входными массивами углов распределения директора ЖК по толщине слоя являются массивы, рассчитанные для различных управляющих напряжений, а во втором случае это массивы, рассчитанные для различных моментов времени.



Рис. 19 Принципиальная блок – схема комплексов программ

Все три пакета программ выполняют пошаговое моделирование характеристик устройств отображения информации в следующей последовательности:

- - расчет статического поля конфигурации директора ЖК в электрическом поле (одномерная или двумерная);
- расчет статического оптического отклика ЖК - дисплея на управляющее электрическое напряжение (одномерный или двумерный);

- расчет динамики переориентации директора ЖК при переключении управляющего электрического напряжения;
- расчет времен реакции и релаксации ЖК - дисплея при переключении рабочего напряжения;
- расчет порогового напряжения возникновения диэлектрических полосовых доменов неустойчивости в структуре ЖК.

При моделировании статических и динамических свойств электрооптического эффекта и ЖК - дисплея, работающего на его основе, используется полный набор физических постоянных ЖК и конструктивных параметров ЖК - устройства, который представлен в табл. 3.

Таблица 3.  
Набор входных и выходных параметров для программных модулей.

Программный модуль	Входной параметр	Выходной параметр
DEFORM- S	Постоянные упругости ЖК Диэлектрические постоянные ЖК Шаг спирали ЖК, толщина ЖК Угол закрутки ЖК структуры Углы преднаклона ЖК	Одномерные распределения углов ориентации ЖК в электрическом поле
2D-DEFORM- S	Постоянные упругости ЖК Диэлектрические постоянные ЖК Шаг спирали ЖК, толщина ЖК Угол закрутки ЖК структуры Углы преднаклона ЖК Шаг электродов, ширина электродов	Двумерные распределения углов ориентации ЖК в электрическом поле
DEFORM- D	Постоянные упругости ЖК Диэлектрические постоянные ЖК Шаг спирали ЖК, толщина ЖК Угол закрутки ЖК структуры Углы преднаклона ЖК Коэффициенты вязкости Лесли Управляющее напряжение	Временная зависимость одномерного распределения углов ориентации ЖК в электрическом поле
ОПТИС- S, BERREMAN-S	Дисперсия оптической анизотропии ЖК, Обыкновенный показатель преломления ЖК, Дихроичные спектры поглощения ЖК, Показатели преломления стекла, ориентанта, электродов в ЖК – ячейке Угол ориентации входного поляризатора и его спектр пропускания Угол ориентации выходного поляризатора и его спектр пропускания Одномерные распределения углов ориентации ЖК в электрическом поле Для устройств с фазовым компенсатором Вид фазового компенсатор – ЖК- ячейка или полимерные пленки Дисперсия показателей преломления фазового компенсатора, толщина фазового компенсатора.	Спектры пропускания устройства
ОПТИС-D, BERREMAN- D	Дисперсия оптической анизотропии ЖК, Обыкновенный показатель преломления ЖК, Дихроичные спектры поглощения ЖК, Показатели преломления стекла, ориентанта, электродов в ЖК – ячейке Угол ориентации входного поляризатора и его спектр пропускания Угол ориентации выходного поляризатора и его спектр пропускания Временная зависимость одномерного распределения углов ориентации ЖК в электрическом поле Для устройств с фазовым компенсатором Вид фазового компенсатор – ЖК- ячейка или полимерные пленки Дисперсия показателей преломления фазового компенсатора, толщина фазового компенсатора.	Временная зависимость спектров пропускания устройства

Шаги моделирования выполняются программными модулями, перечисленными выше. Каждый из модулей имеет свой набор входных параметров (см. табл. 3).

Отметим, что компьютерная система "ЭЛЕКТРООПТИКАМ" является гибкой системой как по набору решаемых задач, так и по исполнению, то есть в ней предусмотрена возможность использования отдельных программных модулей как самостоятельных программных единиц для решения частных задач моделирования характеристик какого - либо одного электрооптического эффекта или ЖК - устройства, работающего на его основе. Системы компьютерного моделирования и самостоятельные программные модули ориентированы на использование как персональной ЭВМ, так и универсальных ЭВМ типа ЕС ЭВМ.

### **Глава 3. Моделирование характеристик дисплеев и модуляторов оптического излучения на жидких кристаллах**

Среди электрооптических эффектов, которые используются в системах отображения информации на ЖК, большое внимание уделяется эффекту "гость-хозяин" и эффекту двойного лучепреломления в различных структурах ЖК и в системах ЖК- ячейка - фазовый компенсатор (который представляет собой вторую ЖК- ячейку или полимерные анизотропные пленки). В этой связи нами проведено теоретическое исследование электрооптических и оптических характеристик этих эффектов и ЖК-устройств, работающих на их основе. Теоретическое исследование проведено с помощью компьютерного моделирования с использованием разработанных нами систем компьютерного моделирования "ЭЛЕКТРООПТИКА- М" и "MOUSE – LCD". Ниже приведены результаты теоретического исследования.

#### **3.1 Экспериментальное и теоретическое исследование оптических характеристик ЖК - модулятора на $\pi$ - ячейках**

Стереотелевидение и трехмерная компьютерная "виртуальная реальность" стоят у истоков новой научно- технической революции и в этой связи следует ожидать, что в ближайшее время среди всех электрооптических устройств наиболее быстрыми темпами будут развиваться быстродействующие оптические затворы для стереосистем.

Стандартная трехмерная видеосистема состоит из электроннолучевой трубки, последовательно выдающей за время каждого полукадра изображение для левого и правого глаза, и стереочков, гасящих нежелательную для соответствующего глаза информацию. Ранние стереочки использовали PLZT- керамику, но она требовала очень высоких напряжений (свыше 100 В), была очень дорога и имела пониженное светопропускание. С ними успешно конкурировали ЖК- затворы на твист- эффекте с двухчастотной адресацией. К недостаткам последних относится очень большая (на два-три порядка выше, чем у обычных ЖК- устройств) мощность потребления, что вызывает перегрев и нарушение работы дисплея при длительной эксплуатации, неравномерность переключения по площади затвора и ограничения по габаритам устройства. С другой стороны затворы на сегнетоэлектрических ЖК при всех своих достоинствах нетехнологичны, дороги и критичны к внешним воздействиям, что пока и ограничивает возможности их широкого применения. На этом фоне все большее распространение получают  $\pi$ - ячейки, благодаря трем важнейшим достоинствам: технологическая простота, базирующаяся на традиционной дисплейной и STN- технологиях; малое время релаксации, обусловленное отсутствием обратного гидродинамического потока в ЖК после снятия напряжения; максимальный угол обзора, определяемый самокомпенсирующим характером устройства. Эти обстоятельства позволяют создать высококачественные, надежные и сравнительно дешевые модуляторы. Имея контраст порядка 10:1, время реакции 0.3 мс и время релаксации около 2 мс, такие затворы вполне пригодны для дешевых 30 - герцовых стереоскопических систем, хотя верхняя или нижняя части экрана при этом несколько теряют в контрасте из-за превышения времени обратного хода лучей ЭЛТ. Более хорошими оптическими характеристиками обладает ЖК- затвор, состоящий из двух одинаковых - ячеек со взаимноперпендикулярном расположением молекул ЖК на смежных поверхностях и помещенные между двумя скрещенными поляризаторами. Закрытое состояние затвора реализуется тогда, когда обе  $\pi$ - ячейки находятся в одном состоянии (на обе ячейки подано одинаковое управляющее напряжение). При этом одна из ячеек является фазовым компенсатором для другой. Открытое состояние затвора достигается путем переключения одной из ячеек в другое состояние. Такая конструкция позволяет получить за счет управления равные времена реакции и релаксации, величина которых определяется только временами реакции составляющих устройство ячеек. В настоящее время такой ЖК- модулятор имеет контраст в видимом диапазоне 50:1 и время переключения 0.2 - 0.3 мс.

Однако наличие воздушного промежутка между ячейками в ЖК- затворе приводит к падению пропускания и уменьшению контраста. Поскольку для большей части непрошедшего напрямую излучения будут нарушены условия фазовой компенсации, что приводит к возрастанию пропускания в закрытом состоянии и к падению контраста. В следствии этого размывается и раздваивается изображение, что особенно заметно в проекционных системах. Введение в зазор между ячейками иммерсионного материала или оптического клея вносит дополнительные технологические и эксплуатационные трудности. В частности, при больших размерах дисплеев для проекционных систем и телевизионных экранов в процессе неизбежных при работе температурных перепадов деформируется и разрушается либо периферический герметик ЖК- ячейки, либо используемый в иммерсионный зазоре материал. Именно поэтому двухслойные STN-экраны не имеют жесткого соединения корпусов. В связи с этим нами предлагается видоизмененная конструкция ЖК - затвора состоящего из двух  $\pi$  - ячеек лишенная этого недостатка. Нами проведено экспериментальное исследование оптических характеристик предлагаемой конструкции ЖК - модулятора и теоретически выяснено влияние различных конструктивных и технологических параметров на его оптические характеристики.

### 3.1.1. Экспериментальное и теоретическое исследование оптических характеристик ЖК - затвора

Конструкция двухслойной шторки на  $\pi$ - ячейках состоит из двух ячеек, в которых центральная стеклянная пластина является общей для обоих ЖК - слоев. На обращенные друг к другу поверхности последовательно нанесены прозрачные окисно-индиевые сплошные электроды толщиной 100 - 110 мкм, изолирующий слой окиси кремния толщиной 250- 300 мкм, ориентирующий слой на основе полиимидного лака АД 9103. Молекулы ЖК - вещества ориентированы в одном направлении, причем их угол наклона к поверхности подложки у одной пластины противоположен по знаку углу наклона на другой, что и формирует склонную к 180 - градусной закрутке структуру. При том направления ориентации молекул на сторонах центральной пластины взаимно перпендикулярны. Зазор между пластинами обеспечивался шестимикронными калибраторами из дробленого стекловолокна. В качестве ЖК основы использовался низковязкий ЖК- материал ЖКМ 1391 класса фенилциклогесанов, изготовленный НИОПИК (г. Москва). Поляризатором, оптическая ось которого составляет  $45^{\circ}$  с осью ЖК- слоя, служил поляроид NPF - G 1220 DU фирмы Nitto (Япония). В качестве анализатора использовался такой же поляроид, оптическая ось которого была скрещена с оптической осью поляризатора. Далее эта конструкция называется затвором типа А.

Такие же материалы и параметры слоев использовались при изготовлении одиночных ячеек традиционного двухслойного затвора (тип затвора В).

Зависимость пропускания затворов обоих типов от управляющего напряжения несущей частоты 1000 Гц при подаче его одновременно на оба слоя показана на рис. 20. На этом рисунке и в дальнейшем "а" и "b" соответствуют типам А и В затвора.

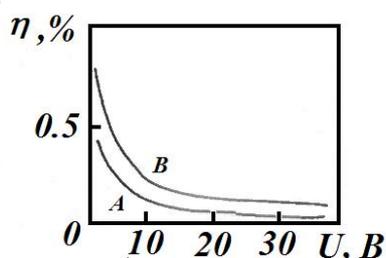


Рис. 20 Зависимость пропускания устройства от управляющего напряжения

Заметим, что зависимости пропускания от напряжения получены при снижении напряжения от максимальной величины. Все замеры производились при нормальном падении света и наблюдении в направлении перпендикулярном плоскости шторок. При напряжении много выше порогового, порядка 30-40 В, фазовая задержка каждого слоя

близка к нулю и видно, что компенсация в этом диапазоне почти идеальная. С уменьшением управляющего напряжения фазовая задержка возрастает, достигая максимума примерно при 2 В. Поскольку абсолютное значение задержки каждого слоя зависит от совокупности неуправляемых факторов (колебаний толщин и сопротивления внешних слоев, угла преднаклона молекул ЖК и т.д.), фактические фазовые задержки каждого ЖК- слоя различны и с ростом различия эффективность компенсации падает и поглощение затвора ухудшается. В условиях эксплуатации это означает, что одна половина экрана будет в несколько раз отличаться по яркости от другой. С дальнейшим уменьшением напряжения (в нашем случае это меньше чем 1.75 В), в местах дефектов поверхности, в том числе вблизи калибраторов, через 10 - 20 мс, т.е. еще до окончания полукадра,  $\pi$ - структура начинает релаксировать в исходную. Визуально это воспринимается как грубая неравномерность пропускания по рабочему полю ("пятнистость") и рассеяние, поэтому на практике такой режим недопустим. Это означает, что пониженное рабочее (опорное) напряжение  $U$  должно быть не менее 1.8 -2.0 В. Измерение пропускания при меньших напряжениях проводилось нами на участках рабочего поля, не имеющих поверхностных дефектов, т.е. там, где  $\pi$ - структура сохранялась в течении нескольких секунд.

Как видно из рис. 20, существенным фактором, влияющим на эффективность компенсации в шторке, является отсутствие внутренних отражений: в шторке типа А, где они значительно уменьшены, поглощение возрастает минимум на 30%, а в наиболее важной области, в районе 2.0 В - примерно в 2-2.5 раза. Это позволяет сделать перепад яркостей фона различных частей экрана визуально неразличимым и, таким образом, принципиально повысить качество устройства.

Зависимость пропускания от величины напряжения частотой 1000 Гц на одной из ячеек при подаче на другую напряжения 30 В той же частоты приведена на рис. 21. Максимальное пропускание достигается в том случае, когда фазовая задержка одного из слоев близка к нулю, а второго – к  $\lambda/2$ , т.е. при  $U = 2.0$  В. При этом напряжении шторка становится практически бесцветной, в то время как при  $U = 3.0$  В наблюдается синеватый оттенок, при  $U = 1.5$  В - желтый, при напряжениях менее 1 В - розовый. С этой точки зрения, оптимальным является диапазон рабочих опорных напряжения от 2.0 до 3.0 В. Видно также, что при этих  $U$  пропускание затвора типа А несколько выше, чем у типа В.

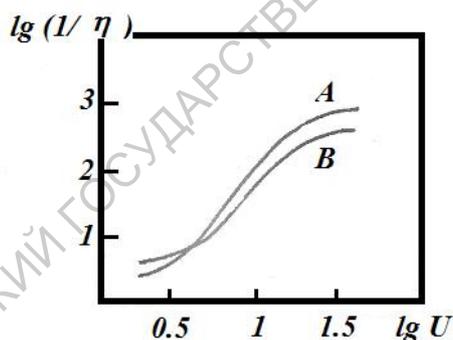


Рис. 21 Зависимость пропускания от управляющего напряжения

На рис. 22 показаны вольт- контрастные характеристики шторок обоих типов, из которого видно, что в традиционном устройстве Б максимальный контраст реализуется при уменьшенном пропускании и синеватым оттенком, что оказывает некоторое влияние на правильность передачи цветов. Максимальное ахроматическое пропускание достигается при одновременном ухудшении контраста почти в 2 раза, из - за роста пропускания закрытого состояния. Устройство типа А обеспечивает либо повышение контраста до 100:1, т.е. в 2 раза, при голубоватом оттенке открытого состояния, либо - до 75:1 т.е. более чем в 2.5 раза, при ахроматическом пропускании. Используя для шторки А опорное напряжение  $U = 2.0$  В вместо оптимального для шторки В  $U = 3.0$  В, можно в 1.5

раза поднять максимальное пропускание и контраст, по сравнению с традиционной конструкцией.

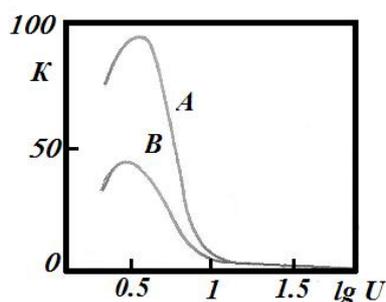


Рис. 22 Зависимость контрастного отношения от управляющего напряжения

Двойные  $\pi$ - ячейки с единой центральной пластиной отличаются также лучшими углами обзора. Так ячейка типа А превосходит ячейку В во всех направлениях, а в отдельных (наихудших) это различие составляет почти 100%. Кроме того, в шторке типа А отсутствует дублирование изображения, практически неизбежное при наличии воздушного промежутка.

Длительность переключения из закрытого состояния в открытое и обратно зависит от величины приложенного верхнего рабочего напряжения  $U$  и не зависит от опорного напряжения  $U$ : в диапазоне опорных напряжений  $U = 0 - 4.0$  В времена срабатывания шторок обоих типов составили 0.15-0.25 мс и 0.07-0.1 мс при  $U = 30$  В и 40 В, соответственно.

На базе описанной конструкции быстродействующего ЖК затвора нами разработано несколько вариантов двойных  $\pi$ -ячеек:

- с размером информационного поля  $140 \times 140$  мм для проекционной системы стереотелевидения;
- с размером информационного поля  $58 \times 31$  мм для активных стереочков компьютерных и телевизионных стереосистем;
- с размером информационного поля  $140 \times 40$  мм для активных стереошлемов лиц с ослабленным зрением ("вторые очки").

Принципиально возможно создание ЖК- затворов размером  $250 \times 300$  мм для исследования активного приэкранного элемента телевизора с диагональю 36 см и более крупных дисплеев.

Как видно из экспериментальных исследований оптических характеристик ЖК-затвора, работающего на основе двойных  $\pi$ -ячеек, контраст и пропускания устройства сильно зависят от его реальной конструкции. В связи с этим нами проведено теоретическое исследование оптических характеристик двойных  $\pi$ -ячеек с целью выявления основных причин, которые ограничивают максимально достижимые значения контраста и пропускания. Для исследования оптических характеристик ЖК-затвора типа А нами был применен метод компьютерного моделирования. Для этой цели использовался пакет прикладных программ "Электрооптика- 2М". Программные средства включают в себя программы по расчету распределений углов ориентации директора по толщине слоя ЖК в электрическом поле и оптических характеристик таких устройств. Ниже представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик ЖК-затвора типа А и выяснены основные факторы, ограничивающие максимально достижимые значения контраста и пропускания.

В условиях идеальной фазовой компенсации одним из главных факторов, определяющих контрастное отношение, является характеристики используемых поляризаторов. В пренебрежении эффектами френелевского отражения от границ раздела коэффициент пропускания устройства для неполяризованного света на фиксированной длине волны  $\lambda$  при использовании неидеальных поляризаторов будет выражаться формулой

$$\eta = \frac{2\eta_{\perp}\eta_{\parallel} + (\eta_{\perp} - \eta_{\parallel})^2 \sin 2\delta}{2},$$

где  $\delta = \frac{\pi(\gamma_{LC} - \gamma_{PC})}{2}$ ,  $\gamma_{LC} = \Delta n_{LC} L_{LC}$ ,  $\gamma_{PC} = \Delta n_{PC} L_{PC}$

$\Delta n_{LC}$  и  $L_{LC}$  - оптическая анизотропия и толщина рабочей  $\pi$  - ячейки;  $\Delta n_{PC}$  и  $L_{PC}$  - оптическая анизотропия и толщина компенсирующей ячейки;  $\eta_{\parallel}$  и  $\eta_{\perp}$  - максимальное и минимальное пропускания поляроида на данной длине волны  $\lambda$ . Минимальное пропускание устройства ( $\delta = \pi n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ), согласно формуле (38),

$$\eta_{\min} = \eta_{\parallel} \eta_{\perp},$$

максимальное ( $\delta = \pi n + \pi/2$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ )

$$\eta_{\max} = (\eta_{\perp}^2 + \eta_{\parallel}^2) / 2.$$

Отсюда величина максимального контрастного отношения, достижимого при использовании поляроидов данного типа на длине волны  $\lambda$ , может быть определена по формуле

$$K_{\max} = \eta_{\max} / \eta_{\min} = \frac{\eta_{\parallel}^2 + \eta_{\perp}^2}{2\eta_{\parallel} \eta_{\perp}}$$

Отношение

$$KO = \tau_{\max} / \tau_{\min}$$

где  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\min}$  - средние спектральные величины, определяемые через  $\eta_{\parallel}(\lambda)$  и  $\eta_{\perp}(\lambda)$  определяет верхнюю границу для реально достижимого среднего контрастного отношения  $KO$ . Для оптимизированной системы, работающей в области нулевого интерференционного минимума - первого интерференционного максимума с большой степенью точности выполняется равенство

$$KO = K_{\max}$$

Величины максимального контрастного отношения для ЖК- затвора типа А и среднего по спектру пропускания  $T$ , достижимые при использовании некоторых типов промышленных поляроидов приведены в табл.4

Одним из путей повышения контрастного отношения при использовании поляризаторов с относительно невысокой степенью поляризации является применение дублированных поляроидов, которое состоит в том, что вместо одного входного поляроида и одного выходного поляроида используются два входных и два выходных. Оси наибольшего пропускания поляроидов, составляющих соответствующую пару (входную или выходную), параллельны друг другу. Максимальный и минимальный коэффициенты пропускания такой системы ( $t_{\max}$  и  $t_{\min}$ ) выражаются формулами

$$t_{\min} = \eta_{\parallel}^2 \eta_{\perp}^2 = (\eta_{\parallel}^4 + \eta_{\perp}^4) / 2.$$

Соотнеся эти формулы с формулами для одиночных поляроидов, можно увидеть, что

$$t_{\min} = \eta_{\min}^2$$

а также, с учетом того, что  $\eta_{\parallel}$  близко к 1, а  $\eta_{\perp}$  близко к 0, то

$$t_{\max} = 2\eta_{\max}^2$$

Следовательно, максимальное контрастное отношение для случая двух дублированных поляроидов  $K_{\max}''$  должно соотносится с максимальным контрастным отношением в случае двух обычных поляроидов ( $K$ ) следующим образом

$$K_{\max}'' = 2K_{\max}^2,$$

что подтверждается расчетом (см. табл.4). Из табл.4 видно, что использование дублированных поляроидов позволяет резко увеличить величину контрастного отношения (этот вывод справедлив только для случая идеальной или почти идеальной компенсации). Одним из недостатков такого метода повышения контраста является несколько меньшая величина среднего пропускания  $T$ . Заметим, что использование трех поляроидов вместо четырех (если входной - дублированный поляроид, выходной - простой или наоборот), как показали расчеты, результаты которых представлен в той же таблице, такого резкого увеличения контрастного отношения не дает. Проводя анализ, аналогичный проведенному выше, нетрудно показать, что величина максимального контрастного отношения такой системы не может превышать максимальное контрастное отношение обычной системы более чем в 2 раза.

Таблица 4  
Зависимость оптических характеристик ЖК – затвора на двойной  $\pi$  - ячейке от типа поляризатора

Тип поляризатора	Устройство с двумя поляризаторами	Устройство с тремя поляризаторами	Устройство с четырьмя поляризаторами
NPF-F-1200DU			
KO	16	31	489
$T$	0.39	0.34	0.3
NPF-F-1229DU			
KO	26	52	1145
$T$	0.35	0.29	0.24
NPF-F-1225DU			
KO	18	36	644
$T$	0.42	0.39	0.36

Выше рассматривался идеализированный случай полной фазовой компенсации. В реальных приборах условия полной фазовой компенсации нарушаются вследствие следующих причин:

- 1) технологического разброса толщин слоя ЖК и фазового компенсатора;
- 2) потерь на отражение и многократного отражения.

Технологический разброс толщин ЖК- слоя и фазового компенсатора приводит к отклонению их значений от оптимальных. С целью исследовать, какое влияние это окажет на величину контрастного отношения был проведен расчет характеристик ЖК- затвора типа А при разном соотношении толщин ЖК- слоя в основной и компенсирующей ячейках. Как уже говорилось, полная компенсация достигается при равенстве толщин основной и компенсирующей ячеек; с рассогласованием по толщине контраст должен падать. В табл. 5 приведены значения контрастного отношения при отклонении толщин ЖК слоя в компенсирующей ячейке от толщины слоя ЖК в основной ячейке на величину от 0 до 30%. В расчетах полагалось, что поляроиды являются идеальными.

Таблица 5  
Зависимость оптических характеристик ЖК – затвора на двойной  $\pi$  - ячейке от толщины неоднородного слоя ЖК

Отклонение толщины фазового компенсатора от оптимального значения, %	Контрастное отношение
0	308 000
5	37 800
10	10 400
20	2 700
30	1 190

Как видно из таблицы с ростом отклонения толщины фазового компенсатора от оптимальной величины действительно наблюдается спад контрастного отношения. Однако и при достаточно больших отклонениях контрастное отношение остается высоким. Это позволяет говорить о невысокой критичности характеристик рассматриваемого устройства к согласованию толщин слоя ЖК и компенсатора.

Аналогичные результаты в отношении этого фактора следует ожидать и в случае, когда в качестве компенсатора используется полимерная пленка.

Большое влияние на оптические характеристики ЖК- затвора оказывают тонкие слои ориентанта и электрода в ЖК- ячейках, физические параметры которых должны быть оптимизированными. В табл. 6 приведены рассчитанные значения контрастного отношения для устройства с компенсирующей ЖК ячейкой с системами электрод - ориентант, характеризуемыми разной степенью потерь на отражение. В первом случае эта система является неоптимизированной: полные потери на отражение составляют около 19%. Во втором случае система электрод - ориентант является оптимизированной: потери на отражение - меньше 3%. Как видно из таблицы, качество системы электрод - ориентант оказывает очень сильное влияние на контрастное отношение. Контрастное отношение для устройства, в котором эта система оптимизирована, контраст на несколько порядков выше.

Причиной малого контраста при больших потерях на отражение является появление многократно отраженных волн, рассогласованных по фазе с основными интерферирующими волнами и неудовлетворяющим условию интерференционного минимума: двукратно отраженные волны имеют фазовый сдвиг  $3 \mu_{LC}$  четырехкратно отраженные  $5 \mu_{LC}$ . Это ведет к резкому увеличению пропускания в компенсируемом состоянии. Этот эффект может быть уменьшен путем уменьшения величины  $\mu_{LC}$ . Этого можно добиться, увеличивая рабочее напряжение, уменьшая толщину слоя ЖК, используя ЖК с малой анизотропией. В табл. 6 приведены значения контрастного отношения при различных значениях анизотропии ЖК  $\Delta n_{LC}$  ( $\Delta n_{LC} = n_e - n_o$ ). Как видно из таблицы двукратное уменьшение  $\Delta n_{LC}$  увеличивает контрастное отношение приблизительно в 3.8 раза. Заметим, что так как потери на отражение от структуры электрод - ориентант в ЖК- ячейках невозможно принципиально уничтожить, то невозможно достичь идеальной компенсации, и таким образом это ограничивает максимально достижимое значение контраста и пропускания. Однако, существенным моментом в этом случае является наличие оптимальных физических параметров этих слоев, при которых оптические характеристики ЖК- затвора являются наилучшими.

Таблица 6  
Зависимость оптических характеристик ЖК – затвора на двойной  $\pi$  - ячейке от параметров электродного и ориентирующего слоев

	Устройство с не оптимальными параметрами ориентирующего и электродного слоев			Устройство с оптимальными параметрами ориентирующего и электродного слоев		
1-ый пассирующий слой	толщина 0.11 мкм; показатель преломления 1.45			толщина 0.11 мкм; показатель преломления 1.45		
Электродный слой	толщина 0.06 мкм; показатель преломления 2			толщина 0.02 мкм; показатель преломления 2		
2-ой пассирующий слой	толщина 0.05 мкм; показатель преломления 1.45			толщина 0.05 мкм; показатель преломления 1.45		
Ориентирующий слой	толщина 0.02 мкм; показатель преломления 1.4			толщина 0.06 мкм; показатель преломления 1.75		
$\Delta n$ ( $\lambda = 550$ нм)	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2
Контрастное отношение	895	235	67	146 000	37 800	10 000

Таким образом нами предложена усовершенствованная конструкция ЖК- затвора из двух  $\pi$ - ячеек, отличающаяся единой центральной стеклянной пластиной, что обеспечило повышенное в 1.5 раза пропускание, в 2 - 3 раза повышенный контраст и увеличенный угол обзора.

Проведенное теоретическое исследование оптических характеристик ЖК- затвора показало, что контраст устройства может быть существенно повышен путем использования дублированных поляризаторов и оптимизированием значений физических параметров ориентирующих и проводящих слоев. Теоретически показано, что идеальной

фазовой компенсации в таких системах достичь невозможно из-за присутствия многократно отраженных волн в ЖК-ячейках.

### 3.1.2 Влияние конструктивных параметров ЖК затвора на его оптические характеристики

Существует большое число конструктивно-технологических параметров ЖК-затвора, которые определяют его электрооптические и оптические характеристики. Мы рассмотрели влияние конструктивных (угла закрутки структуры ЖК ( $\Phi_T$ ), толщины слоя ЖК, отношения  $L/p_0$ , где  $p_0$  – шаг спирали закрученной структуры ЖК) и физических (оптической анизотропии  $\Delta n$  ЖК слоя) параметров ЖК затвора на его оптические характеристики.

В связи с этим рассмотрены следующие варианты конструкции ЖК затвора: одинарная  $\pi$  – ячейка с малым углом закрутки; двойная  $\pi$  – ячейка с малым углом закрутки при перпендикулярном расположении ЖК – ячеек;  $\pi$  – ячейка с большим углом закрутки; двойная  $\pi$  – ячейка с большим углом закрутки при перпендикулярном расположении ЖК – ячеек. При моделировании электрооптических характеристик ЖК – затвора использовались данные для ЖК вещества типа ЖКМ ZLI 4792 фирмы Merck, Германия ( $K_{11} = 10.5 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{22} = 6.9 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{33} = 16.8 \cdot 10^{-6}$  дин,  $\varepsilon_{\perp} = 4.88$ ,  $\varepsilon_{\parallel} = 13.54$ ,  $\Delta n$  (436 нм) = 0.104,  $\Delta n$  (546 нм) = 0.1,  $\Delta n$  (633 нм) = 0.096). Во всех расчетах эти физические параметры оставались постоянными, а в качестве поляризатора использовалась пленка NPF-F 1205 DU. Что касается остальных параметров ЖК-дисплея (показателей преломления и толщин ориентирующих, электродных и пассивирующих слоев), то при расчетах использовались их реальные значения (см. табл. 7, центральный столбец).

Таблица 7  
Зависимость оптических характеристик ЖК – затвора на двойной  $\pi$  - ячейке от параметров электродного и ориентирующего слоев

	Реальное устройство с не оптимальными параметрами ориентирующего и электродного слоев			Гипотетическое устройство с оптимальными параметрами ориентирующего и электродного слоев		
1-ый пассивирующий слой	толщина 0.11 мкм; показатель преломления 1.45			толщина 0.11 мкм; показатель преломления 1.45		
Электродный слой	толщина 0.06 мкм; показатель преломления 2			толщина 0.02 мкм; показатель преломления 2		
2-ой пассивирующий слой	толщина 0.05 мкм; показатель преломления 1.45			толщина 0.05 мкм; показатель преломления 1.45		
Ориентирующий слой	толщина 0.02 мкм; показатель преломления 1.4			толщина 0.06 мкм; показатель преломления 1.75		
$\Delta n$ ( $\lambda = 550$ нм)	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2
Контрастное отношение	895	235	67	146 000	37 800	10 000

Следует обратить внимание, что управляющие напряжения очень сильно зависят от типа ЖК и должны подбираться для каждого ЖК отдельно. Тем не менее, в качестве основного рабочего напряжения было выбрано напряжение в 15 В, и расчет показал, что для данного ЖК увеличение значения рабочего напряжения до 20 – 30 В оказывает очень слабое влияние на его теоретические электрооптические характеристики. При исследовании влияния величины оптической анизотропии на электрооптические характеристики ЖК – затвора дисперсия была оставлена такой же, как у ZLI 4792, и пропорционально изменялась только величина оптической анизотропии.

В таблице 8 представлены оптические характеристики четырех типов ЖК – затворов. Сравнение характеристик этих конструкций показывает, что с технологической точки зрения оптимальной является конструкция ЖК – затвора на основе одинарной  $\pi$  – ячейки с большим углом закрутки структуры, так как для этого затвора средний по спектру контраст и максимальное пропускание близки к конструкции на основе двойных ЖК – ячеек. Понять этот факт поможет рис. 23, на котором показаны углы ориентации директора ЖК для двух рабочих состояний: «включено» и «выключено». Состояние

«включено» - состояние ЖК, которое соответствует управляющему напряжению, обеспечивающему фазовый набег в ЖК, равный  $\pi$ . Состояние «выключено» соответствует нулевому управляющему напряжению на ЖК - ячейке. В состоянии «выключено» ориентация директора ЖК (на рисунке эти состояния помечены цифрой 1) является невозмущенной и характеризуется линейными зависимостями от толщины, как угла закрутки структуры, так и угла наклона молекул ЖК. В этом состоянии структуры ЖК с  $\Phi_T = 180^\circ$  и с  $\Phi_T = 0^\circ$  (после формирования  $\pi$ -структуры, без напряжения) идентичны и при одинаковой толщине имеют одинаковый фазовый набег. В состоянии «включено» (на рисунке эти состояния помечены цифрой 2) структура ЖК с  $\Phi_T = 0^\circ$  аналогична двум ЖК - ячейкам с толщиной в 2 раза меньше исходной, находящихся в сильно возмущенном состоянии и расположенных последовательно друг за другом. В то же время структура с  $\Phi_T = 180^\circ$  так же аналогична двум ЖК - ячейкам с толщиной в 2 раза меньше исходной, находящихся в сильно возмущенном состоянии и расположенных последовательно друг за другом, но ориентированных перпендикулярно своими оптическими осями в центре слоя ЖК. Таким образом, такая одинарная  $\pi$  - ячейка с  $\Phi_T = 180^\circ$  в состоянии «включено» обладает эффектом самокомпенсации, в отличие от  $\pi$  - ячеек с другими углами закрутки ЖК - структуры.

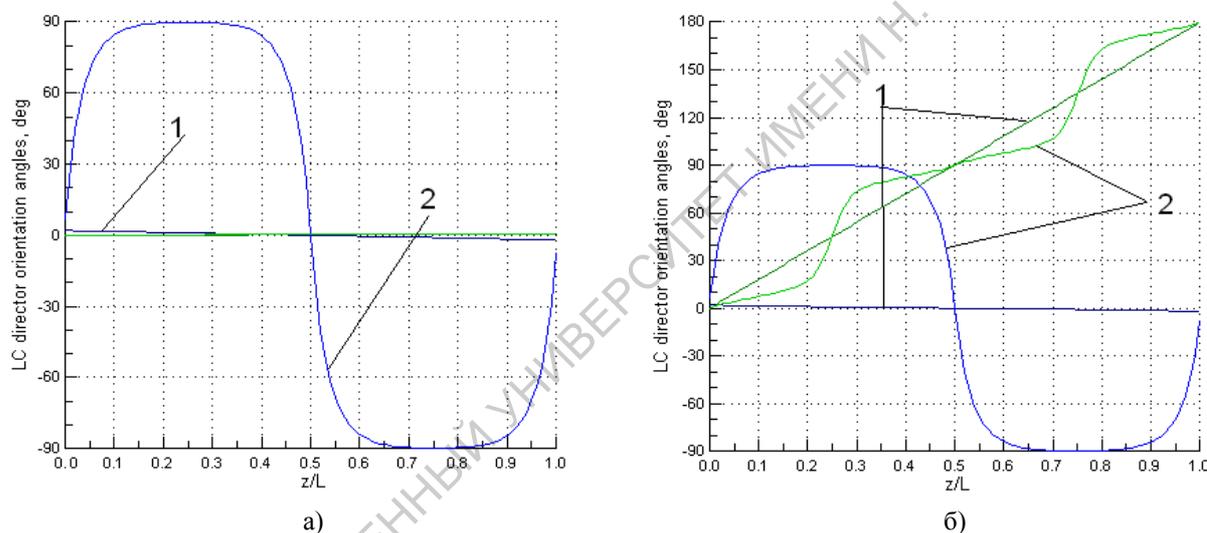


Рис. 23 Распределение углов ориентации директора ЖК по толщине слоя в электрическом поле для незакрученной структуры (а) и для структуры с углом закрутки структуры  $180^\circ$  (б)

Таблица 8.  
Оптические характеристики ЖК – затвора различных конструкций.

Тип	Одинарная $\pi$ – ячейка без закрутки	Двойная $\pi$ – ячейка без закрутки	Одинарная $\pi$ – ячейка с углом закрутки структуры $180^\circ$	Двойная $\pi$ – ячейка с углом закрутки структуры $180^\circ$
Характеристика				
Максимальное среднее по спектру пропускание, %	32	35	34,5	35
Средний по спектру контраст изображения	50	320	285	306

Так как оптические характеристики двойной  $\pi$  – ячейки с нулевым углом закрутки структуры хорошо исследованы, а двойная  $\pi$  – ячейка с  $\Phi_T = 180^\circ$  имеет близкие по своему значению характеристики к одинарной ЖК – ячейке с таким же углом закрутки, то дальнейшие исследования касаются только одинарной  $\pi$  – ячейки с большим углом закрутки структуры.

На рис. 24 – 26 представлены результаты компьютерного моделирования для одинарной  $\pi$  – ячейки с большим углом закрутки структуры в зависимости от толщины

ЖК – слоя, угла закрутки структуры и оптической анизотропии ЖК  $\Delta n$ . Как видно из этих рисунков, существует оптимальный набор конструктивных и физических параметров, при которых одинарная  $\pi$  – ячейка с большим углом закрутки структуры имеет высокие значения контраста изображения и максимального пропускания. Отметим, что отношение  $L/p_0$  слабо влияет на оптические характеристики устройства, но малые значения, соответствующие левой границе зоны Гранжана, обеспечивают несколько более высокие значения контраста. Влияние оптической анизотропии ЖК на оптические характеристики устройства также носит характер кривой с максимумом при  $\Delta n \cdot L \sim 0.55$  мкм. Спектральные характеристики устройства для оптимального набора параметров таковы, что эти устройства можно использовать как базовые для полноцветных дисплеев. Угловые характеристики в пределах  $\pm 20^\circ$  во всех азимутальных направлениях представляют собой окружность с контрастом не хуже чем 30:1 (рис. 27).

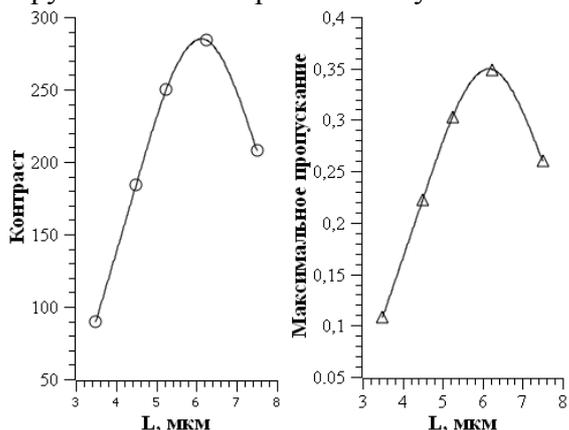


Рис. 24 Зависимость контраста изображения и максимального пропускания в одинарной  $\pi$  – ячейке с большим углом закрутки структуры от толщины ЖК – слоя.

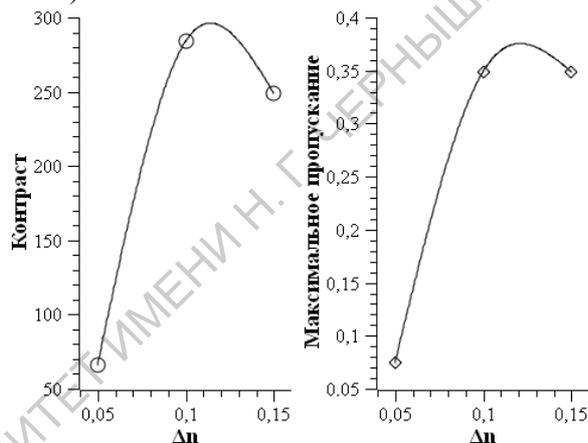


Рис. 25 Зависимость контраста изображения и максимального пропускания в одинарной  $\pi$  – ячейке с  $\Phi_T = 180^\circ$  от оптической анизотропии ЖК – слоя при толщине слоя  $L = 6$  мкм.



Рис. 26 Зависимость контраста изображения в одинарной  $\pi$  – ячейке ( $L = 6$  мкм,  $\Delta n = 0.1$ ) от угла закрутки ЖК – слоя при толщине слоя.

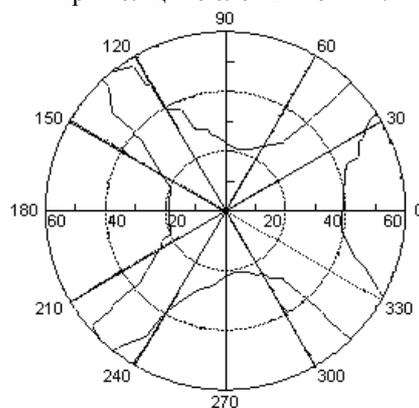


Рис. 27 Индикатриса среднего по спектру контраста изображения (30 : 1) одинарной  $\pi$  – ячейки с  $\Phi_T = 180^\circ$  и оптимальным набором конструктивных параметров.

### 3.1.3 Оптические характеристики различных конструкций ЖК затвора

В данном разделе рассмотрено влияние конструктивных параметров ЖК – затвора на его оптические характеристики. В качестве таких параметров выбраны угол преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках ( $\theta_0$ ) и угол закрутки структуры ЖК ( $\Phi_T$ ). Кроме этого проведен анализ характеристик ЖК – затвора различного типа, который определялся углами ориентации входного ( $\alpha_1$ ) и выходного ( $\alpha_2$ ) поляризаторов. Отметим, что для каждого из типов ЖК – затвора определялась своя оптимальная толщина зазора в рабочей ячейке.

При моделировании электрооптических характеристик ЖК – затвора использовались данные для ЖК вещества типа ЖКМ ZLI 4792 фирмы Merck. Во всех расчетах эти физические параметры оставались постоянными, а в качестве поляризатора использовалась пленка NPF – F 1205 DU. Что касается остальных параметров ЖК – затвора, то в расчетах использовались их технологические значения (1-ый пассивирующий слой с толщиной 0.11 мкм и с показателем преломления 1.45; электродный слой с толщиной 0.06 мкм и с показателем преломления 2; 2-ой пассивирующий слой с толщиной 0.11 мкм и с показателем преломления 1.45; ориентирующий слой с толщиной 0.02 мкм и с показателем преломления 1.4).

Основной конструкцией быстродействующего затвора является  $\pi$  - ячейка с ассиметричными граничными условиями ( $\theta_{01} = -\theta_{02}$ , где  $\theta_{01}$  – угол наклона молекул ЖК на фронтальной подложке ячейки;  $\theta_{02}$  – угол наклона молекул ЖК на второй подложке ячейки) и при угле закрутки ЖК – структуры  $\Phi_T = 0^\circ$  или  $180^\circ$ . Оптимальные оптические характеристики такого ЖК – затвора достигаются при ориентации входного поляризатора  $\alpha_1 = 45^\circ$  к натиранию на первой подложке и выходного поляризатора  $\alpha_2 = -45^\circ$ . Структура с  $\Phi_T = 180^\circ$  более с точки зрения оптических характеристик предпочтительнее структуры с  $\Phi_T = 0^\circ$ . Поэтому интересно рассмотреть оптические характеристики ЖК – затвора на  $\pi$  - ячейке при различных углах закрутки структуры  $\Phi_T$ . На рис. 27 представлены зависимости среднего по спектру пропускания ЖК – затвора в состоянии «выключено»  $T_{off}$  (2а) и среднего по спектру контраста изображения  $C$  (2б) от угла закрутки ЖК – структуры. Как видно из этого рисунка обе зависимости имеют осциллирующий характер, при этом максимальные значения  $T_{off}$  и  $C$  достигаются при  $\Phi_T = 90^\circ$  и  $180^\circ$ . Осциллирующий характер зависимости  $T_{off}(\Phi_T)$  объясняется тем, что в данном ЖК – затворе используется эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления. А в этом случае зависимость пропускания невозмущенного состояния ЖК – ячейки от угла закрутки структуры имеет гармоническую зависимость [12]. Этим же объясняется и характер зависимости  $C(\Phi_T)$ . В то же время амплитуда колебаний в зависимости  $T_{off}(\Phi_T)$  находится на уровне 15% от максимального значения, а максимальное значение контраста изображения больше в 2 раза, чем минимальное. Следует отметить, что для каждого угла закрутки структуры ЖК величина зазора в рабочей ячейке своя, а рабочее напряжение для состояния «включено» для всех структур одинаково (15 В).

На рис. 28 представлена зависимость ахроматичности изображения  $H$  в состоянии «выключено» для ЖК – затвора от угла закрутки  $\Phi_T$ . Кривая  $H(\Phi_T)$  имеет сложный характер и на данном интервале изменения  $\Phi_T$  (от  $90^\circ$  до  $270^\circ$ ) имеет два минимума, один из которых приходится на  $\Phi_T = 180^\circ$ . Отметим, что минимальная ахроматичность (иными словами бесцветность) необходима для обеспечения полноцветного изображения и является одним из требований, которые предъявляются к системам отображения на ЖК. Тем не менее, окраска изображения в состоянии «выключено» для всех ЖК – структур выражена слабо, а в состоянии «включено» окраска изображения полностью определяется качеством используемых поляризаторов и также является неокрашенным. Для сравнения величина ахроматичности для твист – ячейки в состоянии «выключено» соответствует 0.029 и принимается за эталон для создания полноцветных устройств отображения информации.

На рис. 29 показана зависимость угла обзора  $\Psi$  ЖК – затвора на  $\pi$  - ячейке от угла закрутки ЖК  $\Phi_T$  для двух углов падения света  $30^\circ$  и  $35^\circ$ . Как видно из этого рисунка максимальным углом обзора при угле падения  $30^\circ$  обладает устройство с углами закрутки  $90^\circ$  и  $270^\circ$ , в то время как при угле падения  $35^\circ$  угол обзора для этих устройств резко падает. Для ЖК – затворов с  $\Phi_T = 180^\circ$  ( $150^\circ$  и  $210^\circ$ ) угол обзора остается одинаковым для этих углов падения и приблизительно равным  $90^\circ$ . Для меньших углов падения для всех устройств угол обзора возрастает, а для углов падения света больших  $40^\circ$  резко падает.

Зависимость цвета ЖК – затвора от угла падения света для всех углов закрутки структуры ЖК слабая, как для состояния «выключено», так и для состояния «включено».

Изменение углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях  $\theta_{01}$  и  $\theta_{02}$  в пределах до  $\pm 5^\circ$  не оказывают существенного влияния на изменение всех оптических характеристик для ЖК – затвора с различными углами закрутки ЖК – структуры. Дальнейшее увеличение угла преднаклона  $\theta_{01}$  (и  $\theta_{02}$ ) приводит падению контраста изображения и уменьшению угла обзора для всех углов падения света ЖК – затвора с любыми углами закрутки  $\Phi_T$ .

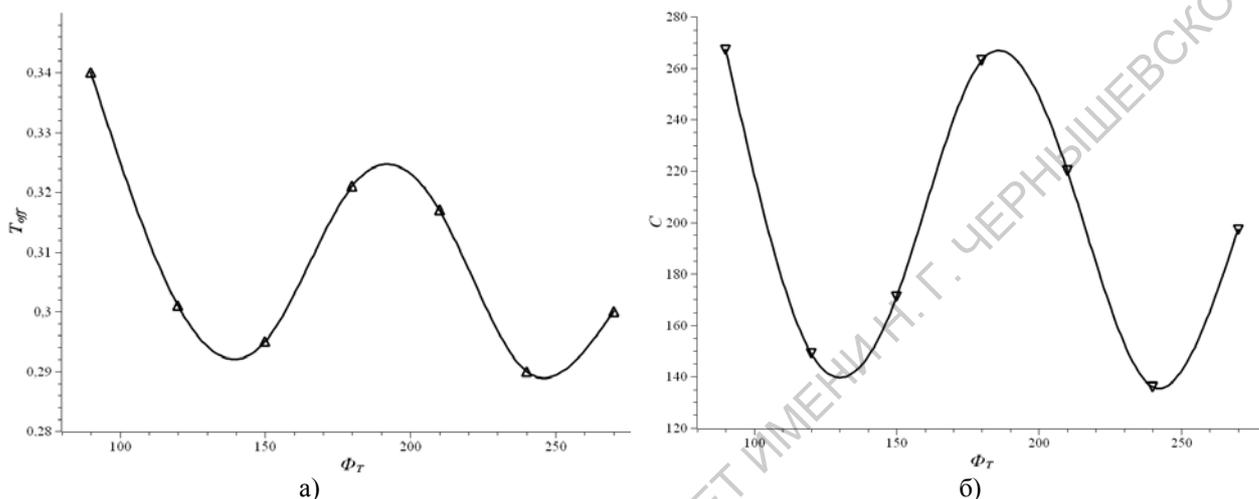


Рис. 27 Зависимость среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено»  $T_{off}$  (а) и среднего по спектру контраста изображения  $C$  (б) от угла закрутки ЖК – структуры  $\Phi_T$  для ЖК – затвора на основе  $\pi$ -ячейки

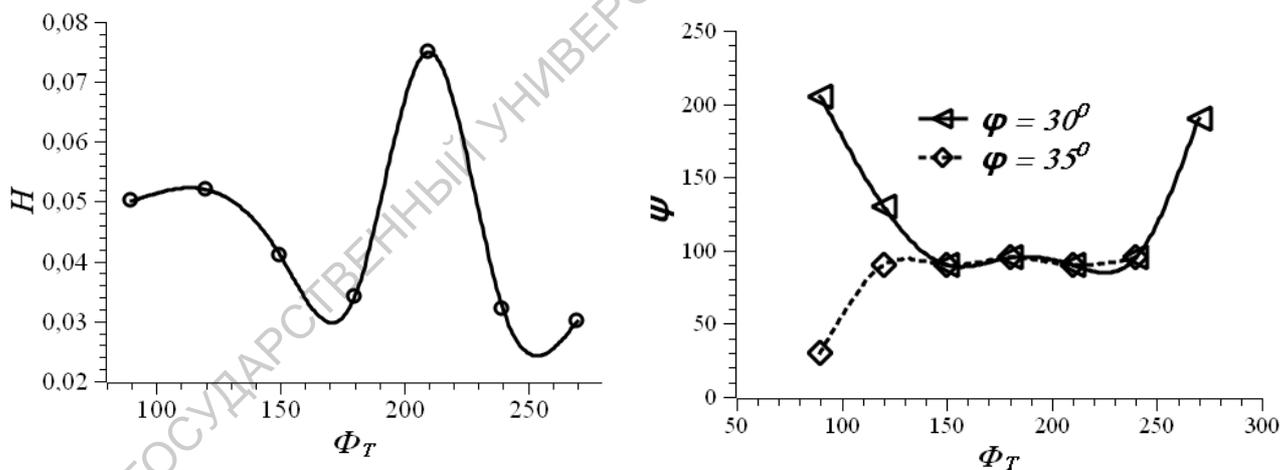


Рис. 28 Зависимость ахроматичности ЖК – затвора  $H$  от угла закрутки ЖК – структуры  $\Phi_T$  для ЖК – затвора на основе  $\pi$ -ячейки

Рис. 29 Зависимость угла обзора  $\Psi$  от угла закрутки ЖК – структуры  $\Phi_T$  для ЖК – затвора на основе  $\pi$ -ячейки

Далее заметим, что классическая twist – структура ЖК ( $\Phi_T = 90^\circ$ ) используется в системах обработки и отображения информации давно, тем не менее, она до сих пор очень востребована в таких устройствах. Поэтому необходимо сделать краткое сравнение оптических характеристик ЖК – затворов на классической twist – структуре при различных условиях ориентации молекул ЖК на подложках ( $\theta_{01}$  и  $\theta_{02}$ ) и при различных углах ориентации входного ( $\alpha_1$ ) и выходного ( $\alpha_2$ ) поляризаторов. Обычно в технике ЖК – устройств используется либо симметричные граничные условия ( $\theta_{01} = \theta_{02}$ ), либо антисимметричные граничные условия ( $\theta_{01} = -\theta_{02}$ ). При этом для волноводного режима работы ЖК – затвора используется ориентация поляризаторов, при которой  $\alpha_1 = 0^\circ$  и  $\alpha_2 = 90^\circ$ . Для работы ЖК – затвора в режиме интерференции поляризованных лучей -  $\alpha_1 = 45^\circ$  и

$\alpha_2 = -45^0$ . В таблице 9 представлено сравнение оптических характеристик таких ЖК – затворов, которые работают в  $\pi$  - режиме (т. е. в состоянии «включено» разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами равна  $\pi$ ) при очень высоких управляющих напряжениях (десятки пороговых значений). Очевидно, что наилучшими оптическими характеристиками обладает классическая твист – ячейка с симметричными граничными условиями, работающая в волноводном режиме, но при высоких управляющих напряжениях. Несколько уступает ей классическая твист – ячейка, которая работает в режиме интерференции поляризованных лучей. Наихудшими оптическими характеристиками обладает твист – ячейка с антисимметричными граничными условиями, использующая волноводный режим. Это объясняется тем, что даже при столь высоких управляющих напряжениях искажение твист – структуры в состоянии «включено» недостаточное и структура ЖК продолжает сохранять частично волноводный режим. Если же сравнивать между собой оптические характеристики ЖК – затвора на основе классической твист – ячейки (симметричные граничные условия и волноводный режим) с аналогичными характеристиками ЖК – затвора на основе твист – структуры (симметричные граничные условия), работающей в  $\pi$  - режиме, то выигрывает первая конструкция. Это объясняется тем, что при высоких управляющих напряжениях в волноводном режиме максимальный контраст изображения и углы обзора ЖК – затвора ограничены только качеством поляризаторов. Для ЖК – затвора, работающего в  $\pi$  - режиме, ограничения на контраст изображения оказывает не только качество поляризатора, но и условия фазового рассогласования интерферирующих волн. Последнее замечание касается не только ЖК – затвора на классической твист – структуре, но ЖК – затвора, использующего другие углы закрутки ЖК, в частности с  $\Phi_T = 180^0$ .

Таблица 9.

Оптические характеристики ЖК – затвора на основе твист – структуры ( $\Phi_T = 90^0$ ) при различных углах преднаклона ЖК на подложках и при различных углах ориентации поляризаторов.

	Твист – структура с антисимметричными граничными условиями $\pi$ - режим $\theta_{01} = 2^0$ , $\theta_{02} = -2^0$ , $\alpha_1 = 45^0$ , $\alpha_2 = -45^0$	Твист – структура с антисимметричными граничными условиями волноводный режим $\theta_{01} = 2^0$ , $\theta_{02} = -2^0$ , $\alpha_1 = 0^0$ , $\alpha_2 = 90^0$	Твист – структура с симметричными граничными условиями волноводный режим $\theta_{01} = 2^0$ , $\theta_{02} = 2^0$ , $\alpha_1 = 0^0$ , $\alpha_2 = 90^0$	Твист – структура с симметричными граничными условиями $\pi$ - режим $\theta_{01} = 2^0$ , $\theta_{02} = 2^0$ , $\alpha_1 = 45^0$ , $\alpha_2 = -45^0$
$T_{off}$	34.6	35.4	36	32.8
$C$	267	39	323	295
$H$	0.05	0.024	0.029	0.031
$\Psi_{30, 0}^0$	205	90	300	30
$\Psi_{33, 0}^0$	30	90	300	30

### 3.2. Сравнительный анализ характеристик отражательных STN-дисплеев с одним и двумя поляризаторами

В последнее время в отражательных дисплеях на базе STN- структур наметилась тенденция к использованию однополяридных конструкций. Разнообразие отражательных дисплеев, работа которых основана на использовании двух или одного поляризатора, ставят вопрос о выборе оптимальной конструкции устройства, отвечающего тем или иным требованиям. В связи с этим нами проведен сравнительный анализ оптических характеристик отражательных однополяридных и двух поляридных STN- дисплеев и обоснованы их достоинства и недостатки.

#### 3.2.1. Конструкция отражательного дисплея и принцип ее работы

В качестве базовой структуры ЖК была выбрана ЖК -ячейка с углом закрутки ЖК  $180^0$ . Структура ЖК с углом закрутки  $180^0$  была выбрана потому, что просветная конструкция ЖК-дисплея на основе этой ЖК -структуры, работающая в режиме ОМІ,

имеет высокую степень ахроматичности и высокий уровень контраста без использования дополнительных фазовых компенсаторов. В случае отражательного ЖК -дисплея с двумя поляроидами, просветная конструкция добавляется только зеркалом. Отражательные ЖК -дисплеи с одним поляризатором, работающие в режиме интерференции поляризованных лучей, как правило, состоят из следующих элементов: входной поляризатор, ЖК -ячейка (использующая тот или иной электрооптический эффект), фазовый компенсатор, отражатель. Фазовый компенсатор может располагаться как до ЖК -ячейки, так и после нее. В обоих случаях отражатель, как правило, представляет собой металлическое зеркало.

Принцип работы одно поляроидного отражательного дисплея может быть описан следующим образом. Свет попадая на входной нейтральный поляризатор становится линейно поляризованным и далее попадает на ЖК -ячейку. В состоянии “выключено” линейно поляризованный свет пройдя через ЖК -ячейку становится циркулярно поляризованным, а проходя через ЖК -ячейку, находящуюся в состоянии “включено” свет приобретает линейную поляризацию. Проходя через фазовую пластинку свет изменяет состояние поляризации так, чтобы при отражении от зеркала и после прохождения фазового компенсатора свет попадал на ЖК -ячейку с той же поляризацией, что и при выходе из ЖК -ячейки при прямом ходе луча. В силу этого такая фазовая пластинка должна быть четверть волновой пластинкой. Таким образом, в состоянии “выключено” свет пройдя через ЖК -ячейку и далее через четверть волновую пластинку становится линейно поляризованным. При отражении от зеркала в этом случае линейно поляризованный свет не меняет состояние своей поляризации. Поэтому проходя обратно через четверть волновую пластинку он становится снова циркулярно поляризованным, не изменяя направления вращения поляризации (что происходит в случае отсутствия четверть волновой пластинки), и следовательно проходя ЖК-ячейку и входной поляризатор максимально пропускается. В состоянии “включено” свет при выходе из ЖК -ячейки является линейно поляризованным, и пройдя через четверть волновую пластинку становится циркулярно поляризованным. После отражения от зеркала и при обратном прохождении через четверть волновую пластинку свет перед входом в ЖК-ячейку снова имеет линейную поляризацию. В этом случае свет с такой поляризацией не проходит через ЖК-ячейку и входной поляризатор при обратном ходе луча. Таким образом, осуществляется переключение между состояниями “включено” и “выключено”. Благодаря тому, что используется только один поляризатор, такая конструкция имеет высокую степень светлоты изображения.

### **3.2.2. Метод поиска оптимальных параметров конструкции дисплея**

При поиске оптимальной конструкции отражательного ЖК - дисплея с одним поляризатором и фазовой пластинкой использовался комплекс программ MOUSE-LCD, модифицированным под данную конструкцию. Метод заключался в следующем. На первом этапе находилась оптимальная конструкция просветного двух поляроидного варианта ЖК - дисплея, работающего в режиме ОМІ на основе ЖК - структуры с углом закрутки  $180^0$ . Далее второй поляризатор заменялся на друг за другом последовательно расположенные четверть волновую пластинку и зеркало и находились оптимальные параметры фазовой пластинки, которые обеспечивали максимальный контраст, светлоту изображения и ахроматичность.

### **3.2.3. Результаты моделирования характеристик ЖК – дисплея, работающего в режиме ОМІ**

Исследование оптических характеристик и поиск оптимальных параметров конструкций проводился для ячейки, заполненной ЖК-веществом ZLI -5800-100 с углом закрутки  $\Phi_T = 180^0$ , углом преднаклона молекул ЖК на подложках  $\theta_0 = 2^0$  и отношением шага спирали к толщине ЖК-ячейки равным 0.3. Фазовая пластинка имела дисперсию анизотропии  $\Delta n$  ( $\lambda = 420$  нм) = 0.00343,  $\Delta n$  ( $\lambda = 500$  нм) = 0.0032,  $\Delta n$  ( $\lambda = 610$  нм) = 0.003. В качестве поляризаторов использовалась поляроидная пленка NPF-1205 DU.

На рис. 30 показаны электрооптические и оптические характеристики отражательного STN-дисплея с одним и двумя поляризаторами при нормальном падении света на устройство. Как видно из рис. 30а среднее по спектру отражение в состоянии “выключено” у одно поляроидного дисплея значительно выше, чем у двух поляроидного, в тоже время средний по спектру контраст у первой конструкции индикатора не превышает 40, а у второй достигает значения до 20000. Одновременно с этим крутизна зависимости среднего по спектру пропускания от управляющего напряжения  $S$

$$S = (R_{90} - R_{10}) / (U_{90} - U_{10})$$

где  $R_{90} = R_{max} \cdot 0.9$ ,  $R_{10} = R_{max} \cdot 0.1$ ,  $R_{max}$  - максимальное среднее по спектру отражение дисплея,  $U_{90}$ ,  $U_{10}$  - управляющие напряжения, соответствующие  $R_{90}$ ,  $R_{10}$ ; имеет большее значение для одно поляроидной конструкции отражательного индикатора ( $S = 1.55$ ), чем для двух поляроидной ( $S = 0.356$ ). Это в первую очередь связано с большим значением среднего отражения в состоянии “выключено” у одно поляроидного дисплея. Цветовые характеристики у обоих типов дисплеев для состояний “выключено” и “включено” близки, но изменение координат цвета при переходе из одного состояния в другое происходят по разным путям. Если для двух поляроидной конструкции с увеличением управляющего напряжения координаты цвета изменяются вблизи расположения белого цвета, то у одно поляроидной конструкции цвета уходят в пурпурные через красные (рис. 30б).

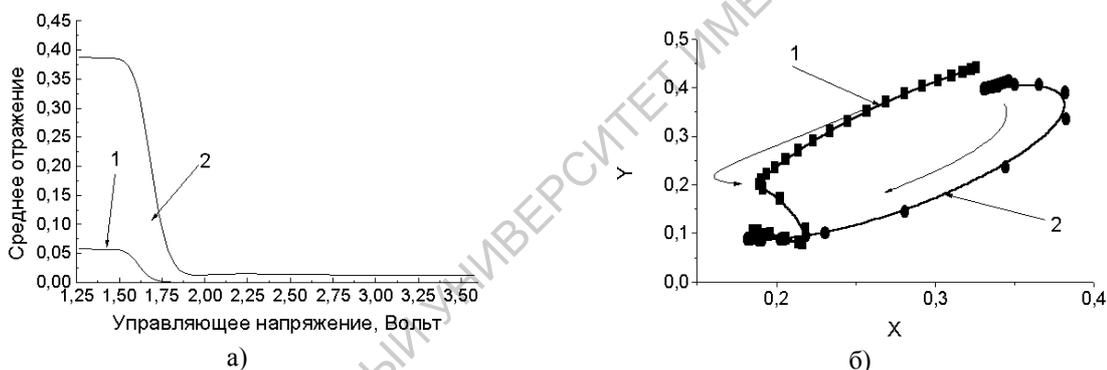


Рис. 30 Зависимость среднего по спектру отражения (1а) от управляющего напряжения и координат цвета (1б) при нормальном падении света на отражательный STN-дисплей:  
1 - двух поляроидная конструкция; 2 – одно поляроидная конструкция

В табл. 10 представлены индикатрисы среднего по спектру контраста для двух поляроидной и одно поляроидной конструкций отражательного STN-дисплея для угла падения света на систему  $45^{\circ}$ . В таблице  $\beta$  обозначает азимут плоскости падения света и отсчитывается от направления натирания на входной поверхности ЖК- ячейки. Если в качестве критерия оценки углов наблюдения ввести значения контраста равное 10, то из этой таблицы видно, что двух поляроидная конструкция имеет более хорошие угловые характеристики. При этом у двух поляроидной конструкции сектор в направлении от  $0^{\circ}$  до  $100^{\circ}$  изменения азимута  $\beta$  имеет высокие оптические характеристики. Однако, если ввести в рассмотрение еще один критерий - индикатрису среднего пропускание в состоянии “выключено” для различных углов падения света на дисплей, то оказывается, что для двух поляроидной конструкции из рассмотрения следует исключить азимуты плоскости падения света от  $80^{\circ}$  до  $100^{\circ}$ , так как в этих направлениях среднее по спектру отражение в состоянии “выключено” резко падает, хотя контраст при этом достаточно высок. Последнее обстоятельство снижает углы обзора двух поляроидного отражательного дисплея и делает угловые характеристики одно поляроидного отражательного STN-дисплея сравнимыми с аналогичными характеристиками двух поляроидной конструкции.

Угловые характеристики просветных ЖК-дисплеев можно улучшить путем использования двусосных фазовых компенсаторов. Аналогичным образом можно поступить и в случае отражательного дисплея. Так как двух поляроидный отражательный

STN-дисплей в нашем случае не имеет фазового компенсатора вообще и кроме того у него низкий уровень светлоты, то мы исследовали способ улучшения угловых характеристик только одно поляроидной конструкции отражательного дисплея. Рассмотрим проблему улучшения угловых характеристик отражательного STN- дисплея с одним поляризатором с точки зрения изменения конструкции индикатора. Действительно, для того чтобы сохранить циркулярную поляризацию света вышедшего из фазового компенсатора при угле падения света отличном от  $0^0$ , необходимо за четверть волновой пластинкой обычной конструкции расположить фазовую пластинку, имеющую точно такое же значение  $\Delta nd$  и близкую дисперсию анизотропии показателей преломления, что и первая, отрицательную анизотропию, а оптическая ось такой пластинки должна быть перпендикулярна ее поверхности (то есть поверхности индикатора, см. рис. 31). В этом случае такая фазовая пластинка при нормальном падении света будет работать как изотропный слой, а при увеличении угла падения она будет корректировать фазовые соотношения между обыкновенным и необыкновенным лучами, сохраняя циркулярную поляризацию света падающего на зеркало света. При отражении от зеркала и прохождении через такой фазовый компенсатор, поляризация света падающего на слой ЖК при любых углах падения света на систему будет очень близка к линейной, что и позволяет улучшить угловые характеристики отражательного дисплея.

Таблица 10.

Индикатрисы среднего по спектру контрастного отношения  $K$  для двухполяроидного и однополяроидного отражательного STN-дисплея при угле падения света  $45^0$

$\beta$ $^0$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
двухполяроидная конструкция																		
K	1158	564	34	22	230	37	5	9	181	1133	22	6	5	21	43	4	4	16
однополяроидная конструкция																		
K	7	16	6	7	11	7	3	3	6	27	5	3	3	3	2	2	2	3

На рис. 32 под обозначением NEW приведена индикатриса среднего контраста такого ЖК- дисплея, а под обозначением OLD конструкция с одной фазовой одноосной пленкой. При расчете оптических характеристик такой конструкции в качестве отрицательного одноосного кристалла использовался турмалин со следующей дисперсией анизотропии показателей преломления  $\Delta n (\lambda = 488 \text{ нм}) = 0.0204$ ,  $\Delta n (\lambda = 532 \text{ нм}) = 0.0202$ ,  $\Delta n (\lambda = 633 \text{ нм}) = 0.0195$ . Как видно из этого рисунка угловые характеристики ЖК-дисплея с таким фазовым компенсатором значительно лучше, чем у ЖК-дисплея с обыкновенной четверть волновой пластинкой и весь сектор в диапазоне изменения азимута плоскости падения света от  $0^0$  до  $90^0$  становится рабочим. Кроме этого появляется дополнительный сектор в диапазоне азимута плоскости падения света  $150 - 210^0$ , что значительно увеличивает углы обзора такого устройства.

Таким образом, методом компьютерного моделирования проведено сравнение электрооптических характеристик различных конструкций отражательных STN-дисплеев с одним и двумя поляризаторами. Показано, что однополяроидная конструкция отражательного STN-дисплея по сравнению с двухполяроидной (при равных наборах физических параметров дисплеев) кроме высоких уровней светлоты, имеет большую крутизну зависимости среднего по спектру отражения от управляющего напряжения. При этом цветовые характеристики дисплеев обоих типов одинаковы для состояний “выключено” и “включено”. В результате проведенных исследований найден простой способ увеличения углов обзора отражательного STN- дисплея с одним поляризатором и фазовым компенсатором. Таким образом, можно сделать следующий вывод: в условиях сильной внешней засветки и одновременно высоких уровнях требуемого среднего по спектру контраста ( $K > 100$ ), предпочтение следует отдать двухполяроидной конструкции, и наоборот когда внешняя освещенность невелика и требуемый уровень контраста

изображения не превышает 100, однополяроидная конструкция отражательного STN-дисплея с точки зрения оптических характеристик более выгодна, чем двухполяроидная система.

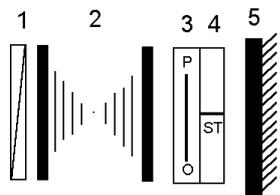


Рис. 31 Конструкция однополяроидного отражательного STN-дисплея с фазовым компенсатором, состоящим из двух одноосных пластинок, которые имеют одинаковую абсолютную величину оптической анизотропии и толщину, и одна из которых положительный кристалл, а вторая отрицательный

1 - поляризатор; 2 - ЖК-ячейка с углом закрутки структуры  $180^\circ$ ; 3 - фазовая пластинка в четверть длины волны с положительной оптической анизотропией и с оптической осью OP, параллельной поверхности индикатора; 4 - фазовая пластинка с отрицательной оптической анизотропией и оптической осью ST, перпендикулярной поверхности индикатора; 5 - металлическое зеркало

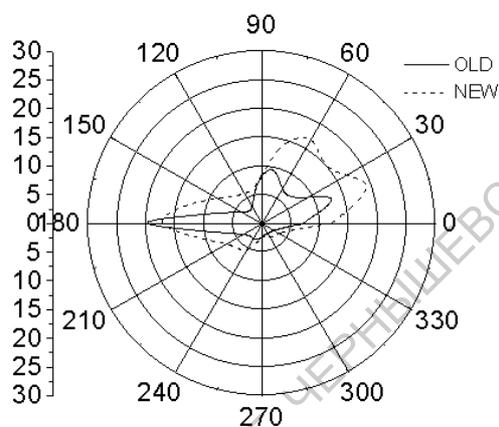


Рис. 32 Индикатрисы среднего по спектру контраста при угле падения света  $45^\circ$  для отражательного STN-дисплея с одним поляризатором:

OLD - фазовый компенсатор из одной четверть волновой пластинки;  
NEW - фазовый компенсатор из двух одноосных пластинок, одна из которых положительный кристалл, а вторая отрицательный.

### 3.3. Жидкокристаллический дисплей одновременно использующий эффект интерференции поляризованных лучей в сверхзакрученных структурах жидкого кристалла и эффект “гость-хозяин”

Широкое использование различных жидкокристаллических (ЖК) структур в различных устройствах отображения информации естественно ставит вопрос об оптимальном выборе конструкции такого устройства. В частности в отражательных системах, использующих сверхзакрученные структуры ЖК, используются как двух поляридные так и одно поляридные конструкции дисплеев. Известно, что одно поляридная конструкция отражательного ЖК-дисплея имеет высокий уровень пропускания в светлом состоянии, но достаточно низкие уровни контраста изображения. Поэтому такую конструкцию, прежде всего, следует использовать в условиях малых уровней внешней подсветки. В то же время двух поляридная конструкция отражательного ЖК-дисплея имеет очень высокие уровни контраста изображения, но малое пропускание в светлом состоянии, что делает ее пригодной для применения только в условиях сильной внешней подсветки. Поэтому возникает необходимость в соединении обеих конструкций отражательного ЖК-дисплея в одну для реализации возможности одновременной работы при любых уровнях внешней подсветки. Данный раздел посвящен компьютерному исследованию характеристик отражательного ЖК-дисплея, представляющего собой комбинацию однополяридной и двухполяридной конструкции индикатора.

#### 3.3.1 Характеристики ЖК-дисплея.

Для адекватного описания характеристик ЖК-дисплея с целью выбора оптимальной конструкции удобно использовать следующий набор электрооптических и оптических характеристик:

среднее по спектру или для определенных длин волн отражение (пропускание) ЖК-дисплея;  
цветовые характеристики;  
средний по спектру контраст изображения или контраст для определенных длин волн;  
степень мультиплексирования или крутизна зависимости среднего по спектру отражения от управляющего напряжения;  
индикатриса среднего или на определенной длине волны контраста изображения;  
времена реакции и релаксации или время срабатывания.

Существует большое число конструктивно-технологических параметров ЖК-дисплея, определяющих его электрооптические и оптические характеристики. Поэтому наиболее полное (для инженерной практики) представление об особенностях этих зависимостей можно получить только методом компьютерного моделирования. Задача еще более усложняется, если ищется оптимальная конструкция устройства. В связи с этим нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК-дисплея использовалась система компьютерного моделирования MOUSE-LCD.

### 3.3.2. Конструкция ЖК-дисплея

На рис. 33 представлена конструкция отражательного дисплея, которая состоит из следующих элементов. Свет падает на входной поляризатор 1, затем проходит через ЖК-ячейку 2 со сверхзакрученной (STN) структурой ЖК, которая является рабочей, использующей эффект интерференции поляризованных лучей. За этой ЖК-ячейкой расположена планарная ячейка “гость-хозяин”, которая выполняет либо роль второго поляризатора, либо является изотропной слабо поглощающей пластинкой, когда на ее электроды подается управляющее напряжение, намного превышающее пороговое напряжение перехода Фредерикса. За ячейкой “гость-хозяин” располагается гомеотропная ЖК-ячейка, выполняющая роль либо фазового компенсатора, когда управляющее напряжение на ее электродах превышает значение порогового напряжения перехода Фредерикса, либо изотропной пластинки (управляющее напряжение на ее электродах равно 0). За последней ЖК-ячейкой расположено зеркало (отражатель). Такой ЖК-дисплей может работать одновременно в двух модах, которые на рисунке показаны как “а” и “б”. Мода “а” соответствует двух поляроидной конфигурации отражательного ЖК-дисплея. В этом случае на управляющие электроды планарной ЖК-ячейки “гость-хозяин” и гомеотропной ЖК-ячейки управляющие напряжения не подаются. Тогда ячейка “гость-хозяин” выполняет роль второго поляризатора, а гомеотропная ЖК-ячейка является изотропным слоем для света падающего нормально на ЖК-дисплей. Мода “б” соответствует однополяроидной конструкции ЖК-дисплея, когда на управляющие электроды ячейки “гость-хозяин” подано управляющее напряжение равное нескольким пороговым значениям эффекта Фредерикса. В этом случае такая ЖК-ячейка не поглощает или слабо поглощает падающие на нее свет и не является поляризатором. На гомеотропную ЖК-ячейку в этом случае также подано управляющее напряжение, при этом такое, что ячейка выполняет роль фазовой пластинки с фазовым набегом в четверть длины волны. Ячейка “гость-хозяин” и гомеотропная ячейки должны быть выполнены в виде шторок со сплошными электродами. Элементы изображения создаются только ЖК-ячейкой 2, которая использует эффект интерференции поляризованных лучей в STN-структуре. Таким образом в этой конструкции ЖК-дисплея одновременно реализуется одно- и двух поляроидная конструкция индикатора.

Принцип работы двух поляроидной конструкции отражательного ЖК-дисплея на основе интерференции поляризованных лучей в сверхзакрученной структуре ЖК, то есть моды “а”, аналогичен тому, как работает устройство в просветном режиме. В этом случае обычная просветная конструкция добавляется только зеркалом.

Принцип работы одно поляроидного отражательного дисплея, то есть моды “б”, может быть описан следующим образом. Свет, попадая на входной нейтральный

поляризатор, становится линейно поляризованным и далее попадает на ЖК -ячейку 2. В состоянии “выключено” линейно поляризованный свет, пройдя через ЖК -ячейку 2, становится циркулярно поляризованным, а проходя через ЖК -ячейку 2, находящуюся в состоянии “включено”, свет приобретает линейную поляризацию. Так как в этой моде ячейка “гость-хозяин” 3 представляет собой слабо поглощающий изотропный слой, то она не оказывает влияние на работу устройства. Проходя через гомеотропную ЖК -ячейку 4, свет изменяет состояние поляризации так, чтобы при отражении от зеркала и после прохождения фазового компенсатора (ЖК -ячейки 4) свет попадал на ЖК -ячейку 2 с той же поляризацией, что и при выходе из ЖК -ячейки 2 при прямом ходе луча. В силу этого такая гомеотропная ЖК -ячейка 4 должна быть четверть волновой пластинкой. Последнее достигается путем подачи соответствующего управляющего напряжения на электроды ячейки 4. Таким образом, в состоянии “выключено” свет, пройдя через ЖК-ячейку 2 и далее через гомеотропную ЖК-ячейку 4, становится линейно поляризованным. При отражении от зеркала в этом случае линейно поляризованный свет не меняет состояние своей поляризации. Поэтому, проходя обратно через ЖК-ячейку 4 он становится снова циркулярно поляризованным, не изменяя направления вращения поляризации (что происходит в случае отсутствия фазового компенсатора), и следовательно проходя ЖК -ячейку 2 и входной поляризатор 1 максимально пропускается. В состоянии “включено” свет при выходе из ЖК -ячейки 2 является линейно поляризованным, и пройдя через гомеотропную ЖК -ячейку 4, становится циркулярно поляризованным. После отражения от зеркала и при обратном прохождении через ЖК -ячейку 4, свет перед входом в рабочую ЖК -ячейку 2, снова имеет линейную поляризацию. В этом случае свет с такой поляризацией не проходит через рабочую ЖК -ячейку 2 и входной поляризатор 1 при обратном ходе луча. Таким образом, осуществляется переключение между состояниями “включено” и “выключено”.

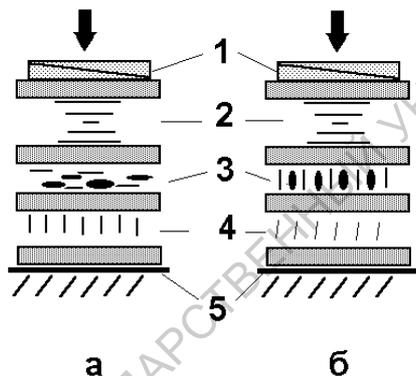


Рис. 33 Конструкция комбинированного отражательного STN-дисплея с ячейкой “гость - хозяин”  
 1- поляризатор; 2 - рабочая STN-ячейка, работающая в режиме ОМІ; 3 - ячейка “гость-хозяин”, выполняющая роль управляемого поляризатора; 4- гомеотропная ячейка, играющая роль управляемого фазового компенсатора; 5 - зеркало.

### 3.3.3 Результаты моделирования комбинированного дисплея

При поиске оптимальной конструкции отражательного ЖК-дисплея предлагаемой конструкции (см. рис. 33) использовался комплекс программ MOUSE-LCD [57], модифицированным под данную конструкцию. Метод заключался в следующем. На первом этапе находилась оптимальная конструкция просветного двух поляридного варианта ЖК- дисплея, работающего в режиме ОМІ [103] на основе ЖК -структуры с углом закрутки  $180^{\circ}$ . Далее второй поляризатор заменялся на друг за другом последовательно расположенные ЖК -ячейку “гость-хозяин” 3, гомеотропную ЖК -ячейку 4 и зеркало 5 и находились оптимальные конструкции, которые обеспечивали максимальный контраст, светлоту изображения и ахроматичность изображения. Структура ЖК с углом закрутки равным  $180^{\circ}$  была выбрана нами из-за того, что двух поляридная конструкция на основе этой структуры дает изображение высокой степени ахроматичности без дополнительных фазовых компенсаторов и одновременно при этом эта структура ЖК обеспечивает высокие (не менее 100:1) уровни мультиплексирования.

Исследование оптических характеристик и поиск оптимальных параметров конструкций проводился для рабочей ячейки 2, заполненной ЖК -веществом ZLI -5800-100 с углом закрутки  $\Phi_T = 180^0$ , углом преднаклона молекул ЖК на подложках  $\theta_0 = 2^0$  и отношением шага спирали к толщине ЖК -ячейки равным 0.3. В качестве красителя для ячейки “гость-хозяин” 3 в расчетах использовался идеальный черный краситель с дихроичным отношением равным 40. Гомеотропная ЖК -ячейка считалась заполненной веществом с отрицательной диэлектрической анизотропией и анизотропией показателя преломления равной  $\Delta n(\lambda = 420 \text{ нм}) = 0.102$ ,  $\Delta n(\lambda = 500 \text{ нм}) = 0.096$ ,  $\Delta n(\lambda = 610 \text{ нм}) = 0.09$ . В качестве поляризатора использовалась поляроидная пленка NPF-1205 DU.

В табл. 11 показаны основные электрооптические и оптические характеристики комбинированного отражательного дисплея для двух его мод, а на рис. 17 представлены его цветовые характеристики. Из этой таблицы и рис. 34 видно, что как одно поляроидная так и двух поляроидная моды отражательного ЖК-дисплея сами по себе имеют недостатки, о которых говорилось во введении. Однако комбинированный ЖК-дисплей этих недостатков лишен.

Таблица 11.  
Характеристики двухмодового отражательного STN-дисплея

Характеристика дисплея	Однополяроидная мода дисплея	Двухполяроидная мода дисплея
Максимальное среднее по спектру отражение дисплея R, %	28.6	5.8
Максимальный средний по спектру контраст дисплея К	31	> 20000
Максимальная степень мультиплексирования дисплея N при среднем контрасте 10:1	100	более 200 при крайне малом среднем по спектру отражении дисплея
Время срабатывания (время включения + время выключения), мс	не более 200	не более 200

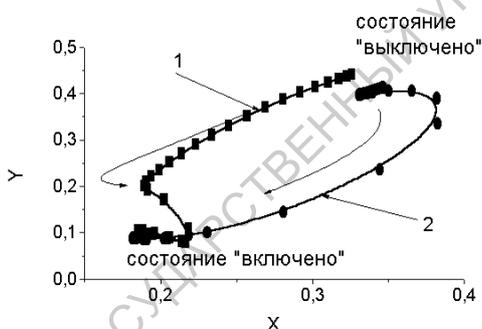


Рис. 34 Цветовые координаты комбинированного отражательного STN-дисплея с ячейкой “гость - хозяин” для двух рабочих мод  
1 - однополяроидная мода; 2 - двухполяроидная мода. Стрелками показано направление увеличения управляющего напряжения на электродах рабочей STN - ячейки.

В табл. 12 представлены индикатрисы среднего по спектру контраста для двухполяроидной и однополяроидной мод комбинированного отражательного STN-дисплея для угла падения света на систему  $45^0$ . В таблице  $\beta$  обозначает азимут плоскости падения света и отсчитывается от направления натирания на входной поверхности рабочей STN ЖК -ячейки. Если в качестве критерия оценки углов наблюдения ввести значения контраста равное 10, то из этой таблицы видно, что двух поляроидная мода имеет более хорошие угловые характеристики. При этом у двух поляроидной конструкции сектор в направлении от  $0^0$  до  $100^0$  изменения азимута  $\beta$  имеет высокие оптические характеристики. Однако, если ввести в рассмотрение еще один критерий - индикатрису среднего отражения в состоянии “выключено” для различных углов падения света на дисплей, то оказывается, что для двух поляроидной моды из рассмотрения следует исключить азимуты плоскости падения света от  $80^0$  до  $100^0$ , так как в этих направлениях среднее по спектру отражение в состоянии “выключено” резко падает, хотя контраст при этом достаточно высок. Последнее обстоятельство снижает углы обзора двух

поляроидной моды отражательного дисплея и делает угловые характеристики одно поляроидной моды комбинированного отражательного STN-дисплея сравнимыми с аналогичными характеристиками двух поляроидной моды.

Таким образом, проведено компьютерное исследование комбинированного отражательного ЖК-дисплея, одновременно работающего в однополяроидном и двухполяроидном режимах. В качестве второго поляроида предлагается использовать стандартную ячейку “гость-хозяин” с дихроичным черным красителем с очень высоким дихроичным отношением. Предлагаемое устройство может одновременно работать как в условиях сильной внешней засветки, так при малых уровнях внешней освещенности. В обеих рабочих модах отражательный STN ЖК-дисплей имеет хорошие электрооптические и оптические характеристики и может быть выполнен на основе простых стандартных ЖК - элементов с использованием простой технологии изготовления ЖК - индикаторов типа STN -дисплеев и ячеек “гость-хозяин”.

Таблица 12.

Индикатрисы среднего по спектру контрастного отношения для двухполяроидной и однополяроидной мод отражательного STN-дисплея при угле падения света  $45^0$

$\beta, ^0$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340
двухполяроидная мода																		
К	1158	564	34	22	230	37	5	9	181	1133	22	6	5	21	43	4	4	16
однополяроидная мода																		
К	7	16	6	7	11	7	3	3	6	27	5	3	3	3	2	2	2	3

### 3.4. Характеристики жидкокристаллических устройств отображения информации на основе эффекта “гость-хозяин”

Широкое применение устройств отображения информации на жидких кристаллах (ЖК), использующих эффект “гость-хозяин”, ставит вопрос о поиске оптимальных параметров конструкции таких систем. Достаточно полное исследование этого вопроса проведено для безполяроидных ЖК-устройств “гость-хозяин”, однако на практике значительного распространения такие индикаторные системы не получили из-за низкого значения контраста. Значительно более высокими эргономическими параметрами обладают ЖК-дисплеи типа “гость-хозяин”, использующие один поляризатор. Исследования однополяроидных ЖК-устройств отображения информации “гость-хозяин” выполнены достаточно большим числом авторов, однако эти исследования проводились только для определенного набора параметров конструкции индикатора при фиксированном значении угла закрутки структуры ЖК без проведения сравнительного анализа. Целью данного раздела является исследование влияния параметров конструкции ЖК - индикатора и физических свойств ЖК (толщины ЖК - слоя, угла закручивания структуры, анизотропии показателя преломления ЖК) на оптические характеристики (контраст, пропускание и индикатрисы контраста) одно поляроидного ЖК - устройства отображения информации типа “гость-хозяин”.

#### 3.4.1. Характеристики ЖК-устройств отображения информации типа “гость-хозяин”.

Для полного описания ЖК-устройств отображения информации используется большой набор оптических и эргономических, а также динамических характеристик. Нами исследовались характеристики ЖК-дисплея “гость-хозяин” с негативным типом изображения. В качестве оптических характеристик этого устройства нами рассматривались следующие:

- среднее по спектру пропускание  $T_{on}$  для состояния “включено” (напряжение на управляющих электродах 5 - 10 пороговых)
- пропускание  $T_{max-on}$  на длине волны максимума поглощения дихроичного красителя для состояния “включено”;
- средний по спектру контраст;

- контраст  $k = T_{max - on} / T_{max - off}$ , где  $T_{max - off}$  - пропускание на длине волны максимума поглощения дихроичного красителя для состояния “выключено”;
- индикатриса контраста.

Для исследования влияния различных параметров ЖК-индикатора “гость-хозяин” на его оптические характеристики использовалась система компьютерного моделирования “MOUSE-LCD”.

### 3.4.2. Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение.

Нами исследовались оптические характеристики однополяридных ЖК-индикаторов “гость-хозяин” на основе планарных и твист-ячеек с углом закручивания ЖК-структуры  $90^0$ . В качестве ЖК была выбрана ЖК смесь ZLI - 4714/3, а в качестве дихроичных красителей использовались отечественный краситель КД-4 и “черный” краситель фирмы Merck. Экспериментальные поляризованные спектры пропускания этих красителей представлены на рис. 35. При расчетах использовался нейтральный поляризатор NPF - 1205 DU.

На рис. 36 приведены зависимости среднего контраста  $K$  и среднего по спектру пропускания для состояния “включено”  $T_{on}$  от толщины планарной и твист ЖК-ячеек  $L$  при постоянной концентрации “черного” красителя. Для планарной ячейки (кривые 1 и 2) поведение  $K$  и  $T_{on}$  с ростом толщины ЖК-слоя противоположны друг другу, и поэтому для достижения более высоких значений среднего контраста беспредельное увеличение толщины ЖК невозможно из-за резкого падения пропускания в  $T_{on}$ . Это означает, что существует некоторая оптимальная толщина ЖК - ячейки, при которой как величина среднего контраста  $K$  так и величина пропускания  $T_{on}$  имеют одинаково приемлемые значения. Уменьшение величины  $T_{on}$  с ростом толщины легко объясняется линейной зависимостью оптической плотности красителя от толщины ЖК - слоя, тогда  $T_{on} = \exp(-\beta cL)$ . Зависимость среднего контраста  $K$  от толщины  $L$  можно следующим образом. Так как  $K = T_{off} / T_{on}$ , то  $K \approx \exp((\rho_{max} - \rho_{min})cL)$ , ( $\rho_{max}$  и  $\rho_{min}$  - максимальная и минимальная удельные оптические плотности дихроичного красителя,  $c$  - концентрация дихроичного красителя), и согласно этому выражению рост толщины ЖК-слоя приводит к увеличению контраста. Следует отметить, что увеличение толщины ЖК-слоя для достижения больших значений контраста ограничено не только приемлемой величиной пропускания  $T_{on}$ , но и увеличением времен переключения ЖК-индикатора из состояния “выключено” в состояние “включено” и обратно.

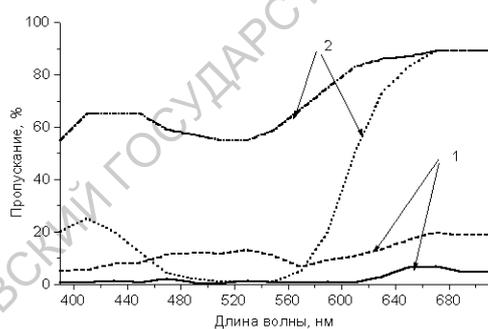


Рис.35 Экспериментальные поляризованные спектры пропускания дихроичных красителей: 1- “черный” краситель; 2 - КД - 4

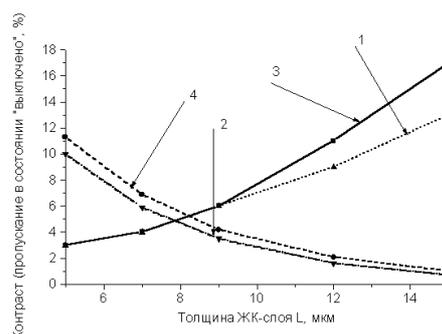


Рис. 36 Зависимость среднего пропускания для состояния “включено”  $T_{on}$  (кривые 2, 4) и среднего контраста  $K$  (кривые 1, 3) для планарной и твист ЖК-ячеек от толщины ЖК-слоя для “черного” красителя: 1, 2 - планарная ячейка; 3, 4 - твист - ячейка

На этом же рисунке показаны аналогичные зависимости от толщины  $L$  для твист - ячейки “гость-хозяин”(кривые 3 и 4), заполненной “черным” красителем. Как видно из рисунка зависимости  $T_{on}$  и  $K$  от толщины ЖК - слоя  $L$  аналогичны по своему поведению таким же зависимостям для планарной ЖК - ячейки. Характер этих зависимостей

объясняется также как и для планарной ЖК - ячейки “гость-хозяин”. Однако значения контраста  $K$  для твист - ячейки “гость-хозяин”, при одинаковых параметрах ЖК-индикатора, несколько выше, чем для ЖК - ячеек с планарной ориентацией.

В отличие от планарной ЖК - ячейки, для твист – ячейки интересно рассмотреть зависимость контраста  $K$  и пропускания  $T_{on}$  от толщины ЖК - слоя  $L$  в случае постоянства не концентрации красителя  $c$ , а средней оптической плотности и параметра порядка красителя, так как при этом среднее пропускания в состоянии “включено”  $T_{on}$  должно изменяться несильно. Такая зависимость контраста  $K$  и пропускания  $T_{on}$  от толщины ЖК слоя для твист - ячейки “гость-хозяин” представлена на рис. 37. Действительно, среднее по спектру пропускания для состояния “включено” меняется очень незначительно, в то время как средний контраст  $K$  возрастает на 15 % при изменении толщины ЖК от 5 до 9 мкм, и при дальнейшем увеличении  $L$   $K$  остается постоянным. Такое поведение контраста в зависимости от толщины твист - ячейки объясняется следующим. В состоянии “выключено”, когда управляющее напряжение на электродах ячейки равно 0, в случае ЖК - ячейки с малой толщиной, волноводный режим Могена нарушается из - за поглощения красителя, поэтому плоскость поляризации линейно поляризованного света не отслеживает поворот молекул ЖК и поглощение в этом случае становится меньше. При увеличении толщины слоя ЖК свет начинает распространяться через ЖК в режиме Могена, когда поляризация линейно-поляризованного света строго отслеживает поворот молекул ЖК в твист - структуре и направление поляризации света в каждом слое ЖК совпадает с направлением максимального поглощения дихроичного красителя. Таким образом, при малых значениях толщины слоя ЖК поглощение твист - структуры в состоянии “выключено” меньше, чем при больших значениях  $L$  при условии постоянства средней оптической плотности красителя и его параметра порядка. Поэтому среднее по спектру пропускание в состоянии “выключено”  $T_{off}$  с увеличением толщины ЖК - слоя  $L$  при постоянных значениях средней оптической плотности и параметра порядка дихроичного красителя сначала убывает, а потом при дальнейшем увеличении толщины ЖК и достижении режима Могена не меняется. С другой стороны, так как средняя оптическая плотность и параметр порядка красителя постоянны, а в состоянии “включено” структура ЖК сильно искажена и не закручена, то пропускание в этом состоянии  $T_{on}$  не зависит от  $L$ . Эти обстоятельства и объясняют поведение среднего контраста твист - ячейки “гость-хозяин” с изменением толщины ЖК при постоянстве средней оптической плотности и параметра порядка дихроичного “черного” красителя. При меньшей средней оптической плотности красителя, но таком же параметре порядка величина контраста становится меньше, и вхождение в режим Могена происходит при меньших значениях толщины ЖК - слоя  $L$ . Увеличение толщины слоя ЖК, как и в случае планарной ЖК - ячейки приводит к одновременному увеличению времен переключения ЖК - индикатора между состояниями “выключено” и “включено” и обратно, а это служит ограничением для бесконечного увеличения толщины ЖК.

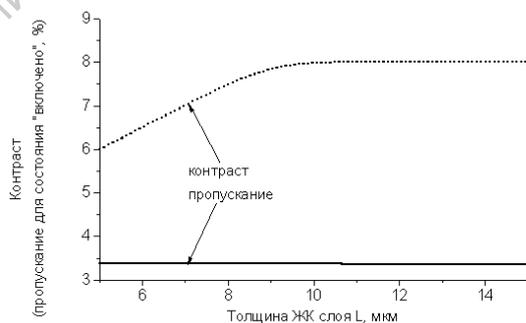


Рис. 37 Зависимость среднего контраста  $K$  и среднего по спектру пропускания  $Y_{on}$  от толщины ЖК - слоя твист - ячейки “гость-хозяин” при постоянной средней оптической плотности “черного” красителя и его параметра порядка

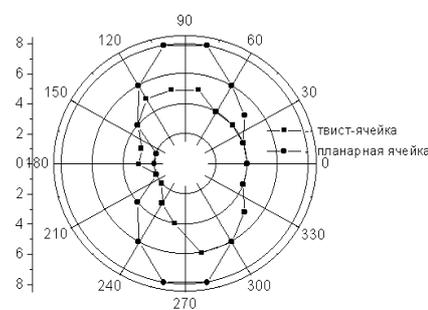


Рис. 38 Сравнение индикатрис среднего контраста для планарной и твист - ячеек “гость-хозяин” при одинаковых параметрах для угла падения света на индикатор  $50^\circ$

Анизотропия показателей преломления ЖК оказывает влияние на средний контраст и пропускание в состоянии “включено” только для твист - индикаторов “гость-хозяин”. При этом увеличение анизотропии показателей преломления ЖК в твист -структуре приводит к увеличению среднего контраста индикатора за счет уменьшения пропускания в состоянии “выключено”. Объяснение этому аналогично тому, которое было дано выше для случая влияния толщины ЖК - слоя при постоянных средней оптической плотности и параметре порядка красителя на средний контраст и пропускание в состоянии “выключено”. В тоже время анизотропия показателей преломления очень слабо влияет на пропускание индикатора в состоянии “включено”.

С точки зрения эргономических характеристик большое значение играют индикатрисы контраста ЖК - индикаторов, работающих на основе планарной и твист структур ЖК. Индикатрисы среднего контраста для планарной ячейки симметричны относительно направления ориентации директора, а симметрия индикатрис контраста относительно перпендикулярного направления нарушена из-за углов преднаклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях. В тоже время индикатрисы контраста для твист - ячеек “гость-хозяин” вообще лишены симметрии, так как симметрия двулучепреломления наблюдается относительно прямой, проходящей через биссектрису угла закручивания структуры ЖК, а симметрия поглощения в этом случае вообще отсутствует. При этом с увеличением угла падения света на индикатор индикатрисы среднего контраста становятся более вытянутыми. На рис. 38 показаны в сравнении индикатрисы среднего контраста для планарной и твист ЖК - ячеек. Как видно из этого рисунка индикатриса контраста для планарной ЖК - ячейки более широкая, чем для твист - ячейки. Увеличение толщины слоя ЖК приводит в обоих случаях к более вытянутым индикатрисам контраста. Уменьшение концентрации красителя в ЖК приводит к уменьшению значения контраста, а индикатрисы в этом случае становятся более широкими. Анизотропия показателя преломления ЖК оказывает влияние на индикатрисы среднего контраста только для ЖК - индикаторов на основе твист - структуры, а для планарной структуры этого влияние не выявлено. При этом большая анизотропия ЖК для твист - структуры делает индикатрису среднего контраста более вытянутой.

С целью исследования оптических характеристик цветных индикаторов “гость-хозяин” нами также рассматривались ЖК-дисплеи с красителем КД-4. В силу того, что индикатор имеет слабую окраску в состоянии “включено” и сильно окрашен в состоянии “выключено”, в качестве оптических характеристик, описывающих поведение такого устройства, мы выбрали пропускания в состояниях “включено” и “выключено” на длине волны максимума поглощения  $T_{max-on}$ ,  $T_{max-off}$  и контраст на длине максимума поглощения  $k$ . На рис. 39 приведены зависимости контраста  $k$  от толщины ЖК - ячейки “гость-хозяин” при постоянной концентрации красителя КД-4 для планарной и твист ячеек, а в таблице 13 представлена зависимость пропускания для состояния “включено” от толщины ЖК - слоя для того же случая.

Таблица 13.

Зависимость контраста  $k$  от толщины планарной ЖК-ячейки при постоянной концентрации красителя КД-4

Толщина ЖК-слоя $L$ , мкм	2	3	5	7	9	11	13	15	20
Пропускание для состояния “включено” $T_{max-on}$ (%) для планарной ячейки	23,5	18,3	11	6,6	4	2,4	1,5	0,9	0,2
Пропускание для состояния “включено” $T_{max-on}$ (%) для твист-ячейки	27,4	22,7	15,8	10,9	7,6	5,3	3,6	2,5	1

Как видно из рис. 39 (кривая 1) зависимость контраста от толщины ЖК-слоя имеет максимум, наличие которого связано с тем, что величина напряжения для состояния “включено” имеет конечное значение. Вместе с этим как видно из таблицы 10 увеличение толщины  $L$  приводит к резкому падению пропускания ЖК-индикатора в состоянии “включено”  $T_{max-on}$ , что объясняется увеличением изотропного поглощения красителя, так

как оптическая плотность линейно зависит от толщины. С другой стороны уменьшение концентрации красителя приводит к увеличению пропускания в состоянии “включено”, но контраст при этом резко падает. Иная ситуация наблюдается для ЖК - индикаторов “гость-хозяин”, работающих на основе твист - структуры ЖК. Как видно из рис. 39 (кривая 2) контраст с ростом толщины ЖК - слоя в твист - ячейке при постоянной концентрации красителя возрастает, однако, как это видно из табл.10, пропускание в состоянии “включено” при этом падает. Поэтому существует некоторая величина толщины ЖК слоя  $L$ , при которой контраст достаточно велик, а значение пропускания для состояния “включено” еще не мало. Кроме этого, как уже отмечалось выше, увеличение толщины приводит к одновременному росту времен включения и выключения ЖК - ячейки, что является ограничением для увеличения толщины ЖК - слоя. Следует отметить, что в отличие от аналогичной зависимости для планарной ячейки, кривая  $k = k(L)$ , при данных пределах изменения толщины ЖК - слоя, не имеет максимума. Величина контраста для твист - ячейки “гость-хозяин” меньше, чем для планарной ячейки с такими же параметрами. Отсутствие максимума в зависимости  $k = k(L)$  и более малые значения контраста связаны в первую очередь с нарушением волноводного режима Могена, когда падающая на поглощающую твист - структуру линейно-поляризованная волна не отслеживает поворот поляризации света молекулами ЖК, и поглощение при этом уменьшается. Однако, при более больших значениях толщины  $L$ , контраст должен уменьшаться за счет увеличения изотропного поглощения, как в случае планарной ячейки.

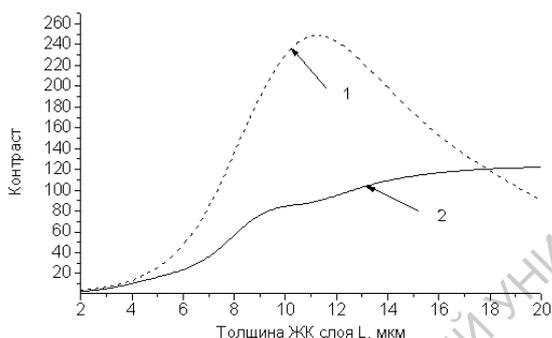


Рис. 39 Зависимость контраста от толщины ЖК-ячейки “гость-хозяин” при постоянной концентрации красителя КД-4 с  $\rho = 1\%$ :  
1 - планарная ячейка; 2 - твист - ячейка

Зависимости контраста и пропускания в состоянии “выключено” твист - ячейки “гость-хозяин”  $k$  от толщины ЖК - слоя  $L$  при постоянных значениях параметра порядка и средней оптической плотности красителя КД-4 полностью аналогичны таким же зависимостям для “черного” красителя, отличие состоит только в величине контраста (для КД - 4 он выше). Пропускание  $T_{max-off}$  для состояния “выключено” в зависимости от толщины ЖК  $L$  для твист-ячейки при тех же условиях, также аналогична такой же зависимости для “черного” красителя.

Анизотропия показателей преломления для ЖК - индикатора типа “гость-хозяин” на твист-ячейке оказывает такое же влияние на контраст и пропускание для состояний “включено” и “выключено”, как и для случая с “черным” красителем.

Пространственные зависимости контраста ЖК - индикатора “гость-хозяин” с красителем КД-4 повторяют аналогичные зависимости для дисплея с “черным” красителем.

Проведенное численное моделирование оптических характеристик однополяридных ЖК-индикаторов “гость-хозяин” показало:

- в планарных ЖК-ячейках “гость-хозяин” изменение толщины ЖК слоя играет роль только когда постоянной остается концентрация красителя, в то время как в твист-ячейках “гость-хозяин” одновременное пропорциональное уменьшение концентрации красителя и увеличение толщины ЖК-слоя во столько же раз приводит к росту контраста изображения, оставляя постоянным пропускание в состоянии “включено”. При этом увеличение толщины ЖК-слоя в твист-ячейке ограничено только увеличением времен переключения между состояниями “выключено” и “включено” и обратно;

- при одинаковых технологических параметрах и при толщинах ЖК-слоя меньших чем 10 мкм, планарные ЖК-ячейки имеют более высокий контраст изображения, чем ячейки “гость-хозяин” на твист-структуре, при толщинах ЖК-слоя больших, чем 10 мкм и прочих равных технологических параметрах твист-структуры имеют более высокий контраст;
- при постоянной концентрации дихроичного красителя как твист-структура, так и планарная структура ЖК имеют оптимальное значение толщины ячейки, которое определяется требуемым уровнем контраста изображения и приемлемым уровнем значения пропускания в состоянии “включено”. Это значение зависит также и от требуемых времен переключения между состояниями “выключено” и “включено” и обратно;
- индикатрисы контраста с увеличением толщины слоя ЖК как для планарной, так и для твист-структуры приобретают более направленный характер, при этом планарные ЖК-ячейки имеют более широкую индикатрису контраста, чем твист-ячейки “гость-хозяин”.

### 3.4.3 Оптические характеристики «классического» модулятора на основе эффекта «гость – хозяин»

Рассмотрим следующие основные структуры ЖКМ на эффекте «гость – хозяин»:

- планарная ЖК структура с различными углами закрутки ЖК ( $\Phi_T$ ) с поляроидом;
- планарная ЖК структура с различными углами закрутки ЖК без поляроида;
- гомеотропная ЖК структура без поляроида.

Планарной ЖК структурой называется структура с любым углом закрутки ЖК молекул, но с углами  $\theta_0$  их преднаклона на ориентирующей подложке, находящимися в пределах от  $1^\circ$  до  $30^\circ$ . Гомеотропной структурой называется структура, у которой угол наклона молекул ЖК на ориентирующей подложке находится в пределах от  $85^\circ$  до  $90^\circ$ . Заметим, что в планарной структуре используются ЖК вещества с положительной диэлектрической анизотропией ( $\Delta\epsilon > 0$ ), а в гомеотропной структуре используются ЖК материалы с отрицательной диэлектрической анизотропией ( $\Delta\epsilon < 0$ ).

Существует большое число конструктивно-технологических и физических параметров ЖКМ, которые определяют его оптические характеристики. В данном разделе рассмотрены следующие конструктивные параметры ЖКМ: толщина  $L$  ЖК слоя; угол  $\Phi_T$  закрутки планарной структуры или отношение  $L/p_0$  толщины  $L$  ЖК слоя к шагу  $p_0$  холестерической спирали для гомеотропной структуры; угол  $\theta_0$  преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках для планарной структуры ЖК. В качестве физических параметров ЖКМ рассмотрены: величина анизотропии  $\Delta n$  показателей преломления ЖК; концентрация  $c$  красителя, растворённого в ЖК; величина  $\Delta\epsilon$  диэлектрической анизотропии ЖК.

При моделировании электрооптических характеристик ЖКМ с планарной структурой использовались физические параметры для ЖК вещества типа ZLI 4756/2 (фирма Merck, Германия. Для случая гомеотропной ориентации ЖК в модуляторе использовались физические параметры для ЖК вещества типа ZLI 3200 (фирма Merck, Германия):  $K_{11} = 9,5 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{22} = 6,9 \cdot 10^{-6}$  дин,  $K_{33} = 10,8 \cdot 10^{-6}$  дин,  $\epsilon_{\perp} = 11,3$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 6,54$ ,  $\Delta n$  (436 нм) = 0,046,  $\Delta n$  (546 нм) = 0,044  $\Delta n$  (633 нм) = 0,042). Во всех расчётах эти физические параметры оставались постоянными, а в качестве поляризатора использовалась пленка NPF – F 1205 DU. В качестве красителя использовалась смесь M1B 9 (фирмы Merck, Германия) со следующими оптическими параметрами: концентрация красителя  $c = 1\%$ , рабочая толщина ЖК слоя  $d = 9$  мкм, дихроичное отношение  $D = 11,7$ .

В расчётах использовались следующие технологические параметры ЖКМ: 1-ый пассивирующий слой с толщиной 0,11 мкм и с показателем преломления 1,45; электродный слой с толщиной 0,06 мкм и с показателем преломления 2,0; 2-ой пассивирующий слой с толщиной 0,11 мкм и с показателем преломления 1,45; ориентирующий слой с толщиной 0,02 мкм и с показателем преломления 1,4.

Электрооптические характеристики ЖКМ на эффекте «гость–хозяин» в основном определяются изменением оптической плотности рабочего вещества от максимального значения  $D_{//}$  до минимального значения  $D_{\perp}$ . При этом сами оптические плотности зависят от конструктивных и физических параметров ЖКМ следующим образом:

$$D_{//} = \alpha_{//} c L, D_{\perp} = \alpha_{\perp} c L,$$

где  $\alpha_{//}$  и  $\alpha_{\perp}$  - соответственно максимальный и минимальный коэффициенты экстинкции рабочего вещества;  $c$  – концентрация красителя, которая обычно не превышает 3 % ;  $L$  – толщина ЖК слоя.

Кроме этого, на характеристики ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» существенную роль оказывает зависимость максимального поглощения красителя от управляющего напряжения. Поэтому в качестве исследуемых характеристик нами выбраны зависимость среднего по спектру контраста  $K$  изображения и среднего по спектру пропускания  $T_{\text{он}}$  в состоянии «включено» от физических параметров ЖКМ (концентрация  $c$  красителя, анизотропия  $\Delta n$  показателей преломления ЖК слоя, диэлектрическая анизотропия  $\Delta \epsilon$  ЖК слоя) и от его конструктивных параметров (толщина  $L$  ЖК слоя, угол  $\Phi_T$  закрутки структуры ЖК для планарной ориентации ЖК слоя, отношение  $L/p_0$  толщины  $L$  ЖК слоя к шагу  $p_0$  холестерической добавки для гомеотропной ориентации ЖК, угол  $\theta_0$  преднаклона ЖК молекул на ориентирующих полках для планарной ориентации ЖК). Кроме этого, исследовались времена оптического отклика ЖКМ в зависимости от этих же параметров.

Заметим, что одной из основных оптических характеристик ЖКМ является индикатриса контрастного отношения. Однако, угловые зависимости контраста изображения ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» выражены слабо, а форма индикатрис контраста близка к окружности. При этом значения контраста изображения для углов падения в пределах  $10^{\circ} - 70^{\circ}$  отличаются от значений контраста для нормального падения (максимальное значение контраста) не более чем на 20%.

В следующих разделах статьи приведены результаты компьютерного моделирования для ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» для трех типов ЖК структур:

- планарная ЖК структура с одним поляризатором при различных углах закрутки;
- планарная ЖК структура без поляризатора с различными углами закрутки;
- гомеотропная ЖК структура без поляризатора.

Заметим, что первые две конструкции обеспечивают негативное изображение, а третья конструкция - позитивное.

#### 3.4.3.1 ЖКМ на планарной структуре с одним поляризатором

На рис. 40 представлена зависимость контраста изображения, формируемого ЖКМ, от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК для различных толщин  $L$  ЖК слоев с  $90^{\circ}$ -ным углом закрутки ЖК молекул. Видно, что в таком ЖКМ следует использовать ЖК с большой величиной  $\Delta n$ , так как малая величина  $\Delta n$  приводит к нарушению волноводного режима Могена и, как следствие, к уменьшению поглощения света в состоянии «выключено». В то же время для состояния «включено» этой зависимости нет, так как в этом состоянии ЖК изотропен. Поэтому с ростом анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК контраст  $S$  изображения тоже растёт.

На рис. 41 представлены концентрационные зависимости контраста  $S$  изображения для ЖКМ на структуре с углом закрутки  $90^{\circ}$ . Как следовало ожидать, ЖКМ с более высокой концентрацией  $c$  красителя имеет более высокие оптические характеристики. Это связано с тем, что величина  $T_{\text{он}}$  слабее зависит от концентрации  $c$ , чем  $T_{\text{офф}}$ . Зависимость  $T_{\text{офф}}(c)$  является сильной и монотонно убывающей. При этом с увеличением толщины  $L$  и, в соответствии с законом Бугера, величина  $T_{\text{офф}}$  пропускания ЖКМ в состоянии «включено» изменяется от 38% до 29% при изменении концентрации  $c$  красителя от 1 до 3%. Аналогичное поведение показывает и зависимость контраста  $K$  изображения от толщины  $L$  слоя ЖК. Это можно легко понять, если вспомнить, что оптическая плотность красителя  $D_{//,\perp}$  зависит от произведения  $cL$ . При этом величина  $T_{\text{он}}$  слабо зависит от толщины, в то время как зависимость  $T_{\text{офф}}(L)$  является сильной и монотонно убывающей.

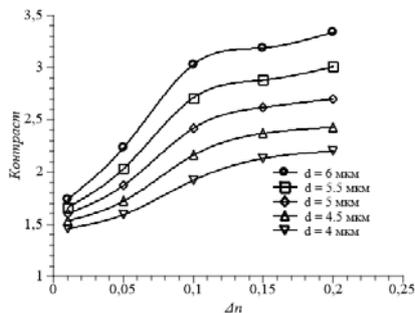


Рис. 40 Зависимость контраста  $S$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ( $c = 1,1\%$ ,  $\Phi_T = 90^\circ$ )

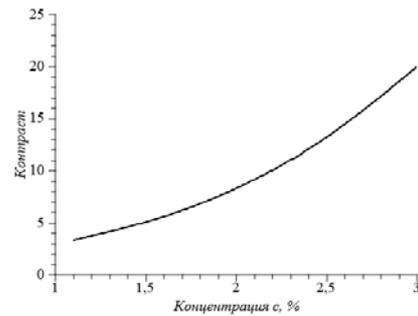


Рис. 41 Зависимость контраста  $S$  изображения от концентрации  $c$  красителя ( $L = 6$  мкм,  $\Delta n = 0,2$ ,  $\Phi_T = 90^\circ$ )

Зависимости контраста изображения и величины пропускания ЖКМ в состоянии «включено» от диэлектрической анизотропии ЖК крайне слабые. Это объясняется тем, что в состоянии «выключено» (когда управляющее напряжение ниже порогового) пропускание ЖКМ не зависит от  $\Delta \epsilon$ , а в состоянии «включено» управляющее напряжение существенно превышает пороговое значение и пропускание в этом состоянии так же слабо зависит от  $\Delta \epsilon$ .

На рис. 42 представлена зависимость контраста  $S$  изображения ЖКМ от угла  $\Phi_T$  закрутки ЖК структуры. При изменении  $\Phi_T$  в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  эта зависимость слабая, а при дальнейшем увеличении  $\Phi_T$  контраст падает, так как для состояния «выключено» нарушается режим Могена. Это приводит к увеличению величины  $T_{off}$  пропускания ЖКМ, в то время как его пропускание  $T_{on}$  практически не зависит от угла закрутки ЖК структуры. Поэтому контраст  $K$  изображения при увеличении  $\Phi_T$  падает.

Аналогичное поведение показывает и зависимости контраста  $K$  изображения и пропускания  $T_{on}$  от угла  $\theta_0$  преднаклона молекул ЖК на подложках ЖКМ. Значение  $T_{on}$  от  $\theta_0$  практически не зависит, так как управляющее напряжение в этом состоянии существенно превышает пороговое значение и не зависит от угла  $\theta_0$  преднаклона. Зависимость  $K(\theta_0)$  слабо убывающая, так как пропускание  $T_{off}$  в состоянии «выключено» в указанных пределах изменения угла  $\theta_0$  преднаклона слабо растёт.

### 3.4.3.2 ЖКМ на планарной структуре без поляризатора

Конструкция ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» без поляроида имеет свои достоинства и недостатки. К плюсам можно отнести высокий уровень пропускания в состоянии «включено», а к минусам – малый контраст изображения. Однако, если использовать различные закрученные ЖК структуры, то можно одновременно получить пропускание на уровне 50 – 60% и контраст на уровне 5 : 1. На рис. 43 представлена зависимость контраста  $K$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК. В отличие от конструкции с поляридом, в этой конструкции для обеспечения максимального контраста изображения необходимо использовать ЖК с минимальным значением  $\Delta n$ , так как в этом случае для обеспечения максимального поглощения света в состоянии «выключено» необходимо нарушить режим Могена.

Зависимости ( $K$ ,  $T_{on}$ ) оптических характеристик ЖКМ от толщины  $L$  ЖК слоя и концентрации  $c$  красителя повторяют аналогичные зависимости для ЖКМ с поляридом. Отличие заключается только в уровне контраста изображения, а объяснение поведения этих кривых точно такое же.

На рис. 44 представлена зависимость контраста изображения от угла  $\Phi_T$  закрутки планарной ЖК структуры. Как видно, максимальный контраст изображения достигается при  $\Phi_T = 180^\circ$ . Это объясняется тем, что в состоянии «включено» пропускание ЖКМ практически не зависит от угла закрутки, так как значение управляющего напряжения существенно превышает пороговое. В состоянии «выключено» максимальное поглощение света соответствует  $\Phi_T = 180^\circ$ , так как этот угол закрутки соответствует всевозможным линейным состояниям поляризации света, которые могут быть поглощены молекулами

красителя, ориентированными максимальной осью поглощения вдоль направления поляризации падающего излучения.

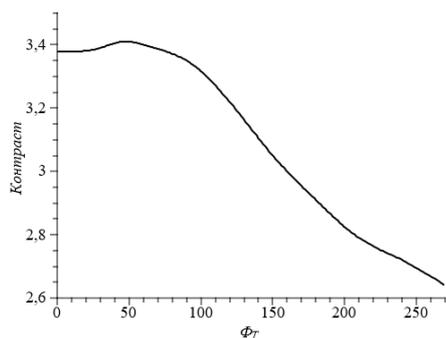


Рис. 42 Зависимость контраста  $C$  изображения от угла  $\Phi_T$  закрутки структуры ЖК ( $L = 6$  мкм,  $\Delta n = 0,2$ ,  $c = 1,1$  %)

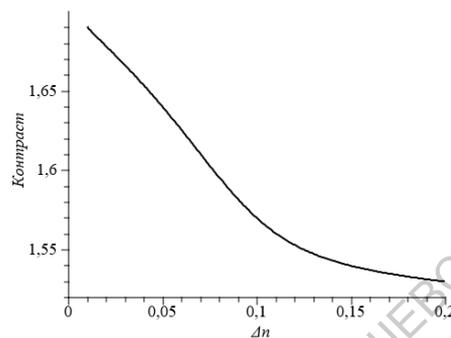


Рис. 43 Зависимость контраста  $C$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ЖК ( $\Phi_T = 90^\circ$ ,  $L = 6$  мкм,  $c = 1,1$  %)

Как и для ЖКМ с поляроидом, величина  $T_{on}$  не зависит от  $\theta_0$ , так как управляющее напряжение в этом состоянии существенно превышает пороговое значение и не зависит от угла  $\theta_0$  преднаклона. Зависимость  $K(\theta_0)$  слабо убывающая, так как пропускание в состоянии «выключено» в указанных пределах изменения угла преднаклона слабо растёт.

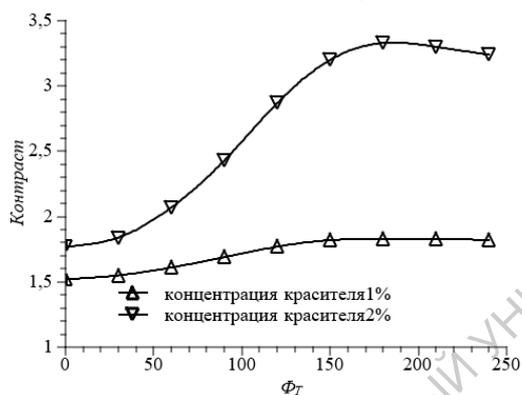


Рис. 44 Зависимость контраста  $C$  изображения от угла  $\Phi_T$  закрутки ЖК структуры ( $\Delta n = 0,01$ ,  $d = 6$  мкм)

Приведённые зависимости контраста  $K$  изображения и пропускания  $T_{on}$  от диэлектрической анизотропии  $\Delta \epsilon$  полностью повторяют такие же зависимости, как для ЖКМ с поляроидом, только величина контраста  $K$  приблизительно в 2 раза ниже за счет более высоких значений  $T_{off}$  пропускания.

### 3.4.3.3 ЖКМ на гомеотропной структуре без поляризатора

Как показали исследования, все функциональные зависимости оптических характеристик ЖКМ на эффекте «гость – хозяин» на основе гомеотропной структуры без поляризатора повторяют аналогичные зависимости ЖКМ на основе планарной структуры без поляризатора и имеют то же объяснение. Только следует иметь в виду, что в случае гомеотропной структуры роль угла  $\Phi_T$  закрутки структуры играет отношение  $L/p_0$ , и равновесный угол  $\Phi_T$  закрутки ЖК структуры определяется соотношением:

$$\Phi_T = \frac{L}{\pi p_0} 180.$$

Все функциональные зависимости оптических характеристик от физических и технических параметров ЖКМ на основе гомеотропной структуры представлены на рис. 45, 46 и 47.

### 3.5. Оптические характеристики отражательного жидкокристаллического дисплея типа гость-хозяин без поляроида с фазовым компенсатором

Электрооптический эффект в жидких кристаллах (ЖК) гость-хозяин является одним из наиболее широко распространенных эффектов, на основе которого созданы устройства отображения информации ЖК [1, 4]. Достоинством этих индикаторов является

простота изготовления и высокие эргономические характеристики, такие как контраст изображения и углы обзора. Вместе с этим к недостаткам устройств типа гость-хозяин следует отнести малые коэффициенты пропускания или отражения индикаторов с высоким уровнем контраста при использовании поляризаторов (менее 20 % для просветных конструкций) или малые значения контраста (менее 2:1) при высоких коэффициентах пропускания или отражения для неполяридных дисплеев. Кроме этого существенным недостатком этих индикаторов является малая информативная емкость, обусловленная низкими значениями степени мультиплексирования таких устройств (меньшим, чем 32:1). Для поляридных конструкций индикаторов гость-хозяин возможно повышение коэффициента пропускания при одновременно высоких значениях контраста изображения за счет использования закрученных структур ЖК с углом закручивания  $\Phi_T = 90^\circ$  путем использования фазового компенсатора, расположенного между поляридом и ячейкой с ЖК. Однако если рассматривать наиболее распространенную отражательную конструкцию такого ЖК - устройства, то коэффициент отражения в целом для такого индикатора при этом не превышает 15%, что существенно сужает область применения таких устройств. Современные системы отображения информации отражательного типа, работающие на основе различных электрооптических эффектах в ЖК, должны удовлетворять следующим требованиям:

- коэффициент отражения должен иметь значение не менее чем 20 %;
- контраст изображения должен быть не менее чем 5:1 как для черно-белого, так и для цветного изображения. Если краситель цветной, то контраст изображения рассчитывается на длине волны, соответствующей максимуму поглощения красителя;
- степень мультиплексирования должна быть не менее чем 32:1.

В данном разделе проведено исследование оптических характеристик отражательного ЖК - дисплея типа гость-хозяин, выполненной на основе сверхзакрученных структур ЖК (STN - структур), без поляриода с фазовой пленкой. На основе выполненных исследований найдена оптимальная конструкция отражательного STN ЖК-дисплея гость-хозяин без поляриода, которая удовлетворяет требованиям, предъявляемым к высокоинформативным устройствам отображения информации.

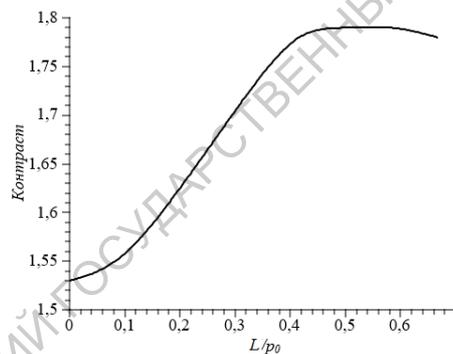


Рис. 45 Зависимость контраста  $C$  изображения от отношения  $L/p_0$  ( $\Delta n = 0,01$ ,  $L = 6$  мкм,  $c = 1,1\%$ )

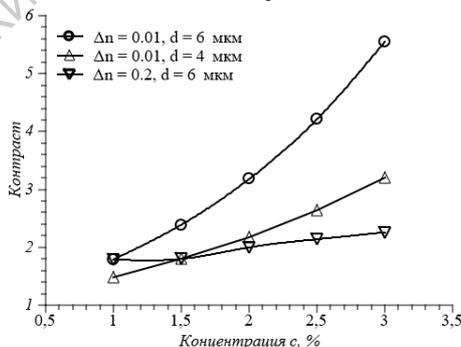


Рис. 46 Зависимость контраста  $C$  изображения от концентрации  $c$  красителя ( $\Delta n = 0,01$ ,  $L = 6$  мкм,  $L/p_0 = 0,5$ )

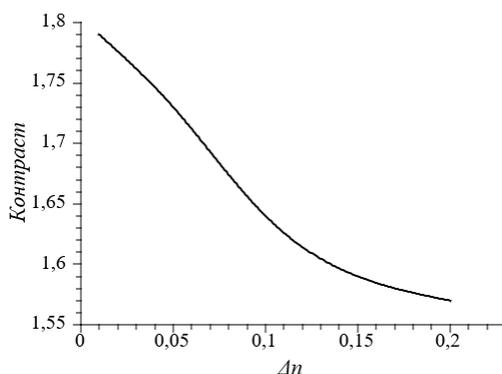


Рис. 47 Зависимость контраста  $C$  изображения от анизотропии  $\Delta n$  показателя преломления ( $c = 1,1 \%$ ,  $L/p_0 = 0,5$ ,  $d$ )

### 3.5.1. Конструкция ЖК – дисплея и принцип его действия

В настоящее время большое внимание в системах отображения информации на ЖК уделяется отражательным одно поляроидным конструкциям, которые используют интерференцию поляризованных лучей в сверхзакрученных структурах ЖК. Напомним, что сверхзакрученной структурой ЖК называется такая ориентация ЖК, при которой угол закручивания структуры  $\Phi_T$  превышает  $90^\circ$  и величина его обычно находится в пределах от  $180^\circ$  до  $270^\circ$ . Такие ЖК - структуры называют STN – структурами, а устройства работающие на их основе называются STN – дисплеями. В этом случае конструкция дисплея состоит из следующих элементов: поляризатора, ЖК-ячейки, фазового компенсатора и зеркала. Ячейка типа гость-хозяин является поляризатором с малой степенью поляризации, а обычный фазовый компенсатор представляет собой аналог однородного планарного слоя ЖК, поэтому система, состоящая из ячейки гость-хозяин, обычного фазового компенсатора и зеркала, эквивалентна описанной выше конструкции отражательного ЖК-дисплея на основе сверхзакрученной структуры ЖК. В этом случае поляризатором является управляемая ячейка гость – хозяин, а фазовая пластинка создает нужное фазовое соотношение для получения контрастного изображения. Используя ячейку гость - хозяин с различными ориентационными структурами ЖК, можно получить достаточно большого значения степени мультиплексирования. В этом случае конструкция отражательного дисплея представляет собой индикатор «бутербродного» типа и состоит из ЖК- ячейки гость-хозяин, фазовой пленки (обычно используемой в STN-устройствах) и отражателя. Этот ЖК – дисплей работает по следующему принципу. В состоянии выключено, когда на управляющие электроды ЖК -ячейки гость – хозяин напряжение не подано, то естественный свет проходящий через нее становится поляризованным. При этом тип поляризации света, прошедшего через ячейку гость-хозяин, зависит от исходной ориентации ЖК в рабочей ячейке. В самом простом случае планарной незакрученной ориентации ЖК, свет, прошедший через ячейку, будет иметь частичную линейную поляризацию. При других способах ориентации ЖК в ячейке гость-хозяин свет, прошедший через нее будет иметь частичную эллиптическую поляризацию. Далее свет, проходя через фазовую пластинку и отражаясь от зеркала и вновь проходя через фазовую пластинку, приобретает определенный фазовый набег, регулируя который путем соответствующего подбора толщины фазовой пластинки можно добиться полного поглощения или полного пропускания света через ячейку гость-хозяин при обратном ходе луча. В состоянии включено, когда на управляющие электроды ячейки гость – хозяин подано напряжение, свет, прошедший через нее, не меняет состояние своей поляризации, и остается неполяризованным. Следовательно, в этом состоянии свет проходит через устройство с максимальным отражением. Толщина фазовой пластинки должна быть подобрана так, чтобы в состоянии выключено отражение устройства было минимальным. Благодаря этому будет осуществляться переключение между состояниями включено и выключено с максимальным и минимальным отражениями соответственно. Отметим, что такое устройство может как черно-белым, так и цветным, когда переключение между двумя состояниями происходит из сильно окрашенного в неокрашенное или слабо окрашенное состояние. Цветовое переключение между включенным и выключенным

состоянием определяется спектром пропускания дихроичного красителя, используемого в ячейке гость-хозяин. Фазовая пластинка служит только для получения минимального значения коэффициента отражения дисплея в состоянии выключено.

В таблице 14 представлено сравнение экспериментально измеренных и рассчитанных характеристик отражательного ЖК-дисплея гость-хозяин без поляроида с фазовой пленки и без нее. В качестве оптических характеристик, описывающих ЖК - индикатор, нами использовались:

- отражение индикатора на длине волны максимума поглощения дихроичного красителя;
- контраст изображения, вычисляемый как отношение максимального и минимального отражений индикатора, определенных для длины волны, соответствующей максимуму поглощения дихроичного красителя.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных приведенных в табл. 14 показывает их полное согласие. Кроме этого, как это видно из таблицы, исследуемое устройство отображения информации имеет существенно более высокие значения контраста изображения, чем обычный отражательный дисплей гость-хозяин без поляроида. Если характеристики устройства с фазовым компенсатором сравнить с аналогичными характеристиками для индикатора с поляроидом, то последнее устройство, имеет преимущество в контрасте изображения, но существенно проигрывает устройству без поляроида с фазовой пленкой в значении максимального отражения дисплея на длине волны максимума поглощения дихроичного красителя. Таким образом, безполяроидный отражательный ЖК-дисплей гость-хозяин с фазовой пленкой является перспективной конструкцией с точки зрения оптических и эргономических характеристик и требует поиска оптимальных значений технических параметров устройства.

Таблица 14.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных для дисплея безполяроидного отражательного дисплея гость-хозяин с фазовой пластинкой и без нее

	без фазовой пластины эксперимент	без фазовой пластины расчет	с фазовой пластиной эксперимент	с фазовой пластиной расчет
отражение индикатора на длине волны максимума поглощения дихроичного красителя в светлом состоянии, %	34.4	38.1	33.7	40,9
отражение индикатора на длине волны максимума поглощения дихроичного красителя в темном состоянии, %	18.7	20.6	4.6	5.8
контраст изображения	1.8	1.85	7.5	7.1

### 3.5.2. Оптические характеристики отражательного ЖК-дисплея типа гость-хозяин без поляроида

Для однозначного описания оптических характеристик ЖК-индикаторов типа гость-хозяин мы использовали следующие:

- для черно-белого красителя среднее по спектру отражение для состояния включено  $R_{on}$ , когда напряжение на управляющих электродах ЖК-ячейки существенно превышает пороговое напряжение;
- для черно – белого красителя среднее по спектру отражение для состояния выключено  $R_{off}$ , соответствующее управляющему напряжению на электродах ЖК -ячейки близи порогового напряжения
- для черно-белого красителя средний по спектру контраст  $K = R_{on}/R_{off}$ ;
- степень мультиплексирования  $N$ , определенная стандартным образом.

Если используется в качестве гостя дихроичный краситель, который имеет одну полосу поглощения в красной, синей, зеленой или в другой какой-либо области видимого спектра, то вместо средних по спектру значений отражений  $R_{on}$ ,  $R_{off}$  и  $K$  для описания

характеристик дисплея мы используем значения  $R_{on}(\lambda_{max})$ ,  $R_{off}(\lambda_{max})$ ,  $K(\lambda_{max})$ , вычисленные для длины волны максимума поглощения цветного дихроичного красителя  $\lambda_{max}$ . Это делается в силу того, что средние по спектры значения отражений и контраста в случае синего и красного красителей не будут давать большого различия в этих характеристиках для красителей с различными значениями дихроичного отношения. При этом следует отметить, что для цветного красителя большое различие в  $R_{on}(\lambda_{max})$  и  $R_{off}(\lambda_{max})$  (то есть большого контраста на длине волны максимума поглощения красителя) будет означать большое различие в насыщенности цвета красителя, но доминирующая длина волны при этом будет постоянна. Таким образом, использование значений отражений и контраста, вычисленных или измеренных на длине волны максимума поглощения красителя, вполне оправдано и дает однозначное описание оптических характеристик дисплея.

Исследование характеристик предлагаемого ЖК – устройства проводилось методом компьютерного моделирования с помощью программного комплекса MOUSE – LCD. В качестве ЖК - вещества мы выбрали ZLI- 5800-100, при этом нами рассматривались незакрученная ориентация ЖК, и закрученные структуры с углом закрутки  $\Phi_T = 0^0, 90^0, 180^0, 240^0$ , и  $250^0$ . Угол преднаклона молекул ЖК на подложках ячейки считался равным  $4^0$ . Для расчетов нами были выбраны красители, имеющие высокие значения дихроичного отношения, такие как КД – 6 (максимум поглощения на длине волны  $\lambda = 430$  нм), КД – 10 (максимум поглощения  $\lambda = 650$  нм), КД – 184 (максимум поглощения на длине волны  $\lambda = 520$  нм) и черный краситель. Фазовая пластика, параметры которой использовались в расчетах, имела следующую дисперсию анизотропии показателя преломления  $\Delta n(\lambda = 0.42 \text{ мкм}) = 0.00343$ ,  $\Delta n(\lambda = 0.5 \text{ мкм}) = 0.0032$ ,  $\Delta n(\lambda = 0.61 \text{ мкм}) = 0.003$ .

На рис. 48 показаны зависимости среднего по спектру отражения от управляющего напряжения для ЖК-дисплея гость-хозяин без поляроида с фазовым компенсатором, заполненного черным красителем, для различных ориентационных структур ЖК. Как видно из этого рисунка, величина отражения дисплея для состояния выключено уменьшается с ростом угла закрутки и максимальна для нулевого значения  $\Phi_T$ . Это объясняется тем, что увеличение угла закрутки ЖК - структуры соответствует переходу работы дисплея в режим Вайта - Тейлора. Для этого режима характерно увеличение поглощения безполяроидного индикатора гость-хозяин в состоянии выключено с ростом угла закручивания ЖК - структуры. Таким образом, увеличивая угол закрутки структуры ЖК, мы делаем ячейку гость-хозяин поляридом с большей степенью поляризации, и, следовательно, уменьшаем отражение всего индикатора в целом. С другой стороны значения отражения для состояния включено для ЖК – структур с различными углами закрутки  $\Phi_T$  примерно одинаковы, так как в состоянии включено слой ЖК является почти изотропным и в дисплее перестает наблюдаться интерференция поляризованных лучей. Поэтому максимально достижимый контраст растет с ростом угла закрутки ЖК - структуры. В то же время, как и следовало ожидать, крутизна зависимости среднего по спектру (или на длине волны максимума поглощения красителя) отражения от управляющего напряжения сильно различна и максимальна для ЖК - структуры с углом закрутки  $\Phi_T = 250^0$ . Дальнейший рост угла закрутки структуры приводит к появлению гистерезиса в зависимости среднего по спектру отражения индикатора от управляющего напряжения и к резкому уменьшению степени мультиплексирования. Заметим, что для любых ориентационных структур ЖК цветовые координаты такого устройства при любых значениях управляющего напряжения соответствуют ахроматическому изображению.

На рис. 49 представлены зависимости среднего по спектру отражения в состоянии включено и среднего контраста дисплея от толщины слоя ЖК для ячейки гость-хозяин с углом закрутки структуры ЖК  $250^0$ , заполненной черным - белым красителем. Как видно из этого рисунка с ростом толщины слоя ЖК среднее по спектру отражение дисплея в состоянии включено падает, что объясняется экспоненциальной зависимостью пропускания ЖК - ячейки гость-хозяин от ее толщины. Аналогично ведет себя и среднее

по спектру отражение в состоянии выключено. Однако скорость падения отражения для состояния включено значительно меньше, чем для состояния выключено, так как во втором случае слой ЖК поглощает обе поляризационные моды, а в первом только одна, так как ЖК почти изотропен и его коэффициент поглощения в этом состоянии минимален. В силу этого контраст изображения  $K$  с ростом толщины ячейки гость-хозяин  $L_{LC}$  увеличивается. Иными словами с увеличением толщины слоя ЖК, ячейка гость-хозяин в состоянии выключено становится более хорошим поляризатором, однако при этом пропускание поляризатора значительно падает. Это приводит к уменьшению среднего по спектру отражения дисплея в состоянии включено и в целом ухудшает оптические характеристики всего дисплея. Таким образом существует некоторая оптимальная толщина ЖК- слоя, которая обеспечивает одновременно высокие значения  $R_{on}$  и  $K$ . Для черного красителя оптимальное значение  $L_{LC} = 12$  мкм. Аналогичные зависимости получаются и для цветных красителей типа КД-6, КД-10 или КД-184, но оптимальное значение толщины ЖК- слоя для каждого красителя имеет свою величину.

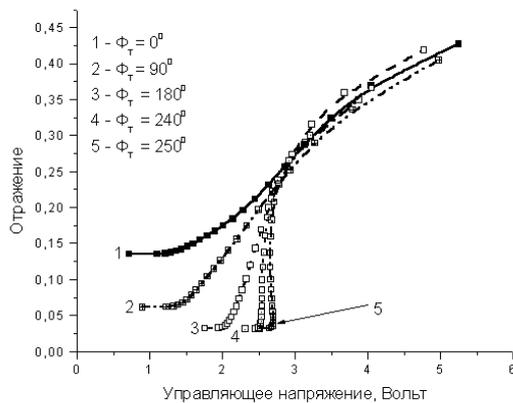


Рис. 48 Зависимость среднего по спектру отражения отражательного ЖК-дисплея гость – хозяин с фазовой пластинкой без поляроида от управляющего напряжения, в котором в качестве красителя используется черный краситель фирмы Merck [90] и ориентации ЖК с различными углами закрутки структуры  $\Phi_T$

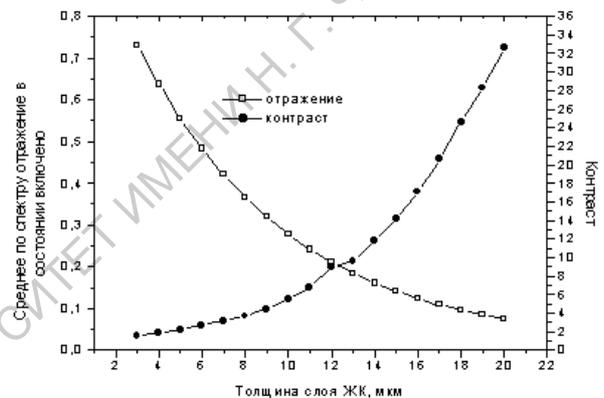


Рис. 49 Зависимость среднего по спектру отражения безполяридного ЖК-дисплея гость-хозяин с фазовой пластинкой в состоянии включено  $R_{on}$  и среднего по спектру контраста  $K$  от толщины ЖК- слоя  $L_{LC}$

Зависимость среднего по спектру контраста и отражения в состоянии включено от концентрации дихроичного красителя имеет характер, аналогичный зависимости этих же параметров от толщины ЖК- слоя. Так с увеличением концентрации дихроичного красителя контраст изображения возрастает, но вместе с этим падает отражение для состояния включено. Поэтому простое увеличение концентрации красителя приводит не только к улучшению одной оптической характеристики дисплея, но и к ухудшению другой. В силу этого существует оптимальная концентрация, которая соответствует требуемым значениям светлоты и контрасту изображения. Примером может служить дихроичный краситель КД-184. Этот краситель выбран в силу того, что максимум поглощения его соответствует максимуму кривой видности человеческого глаза. Как показывает расчет для дисплея на основе ЖК - структуры с углом закрутки  $250^\circ$  при концентрации красителя 1% контраст изображения  $K(\lambda_{max}) = 10:1$ , однако при этом отражение в состоянии включено  $R_{on} < 20\%$ . Поэтому с точки зрения удовлетворения всех требований к качеству изображения, оптимальным значением концентрации красителя при данной толщине является 0.85 – 0.87 %, так как при этих значениях величина отражения в состоянии включено превышает 21% при контрасте  $K(\lambda_{max}) > 6:1$  и степени мультиплексирования  $N = 32:1$ . Следует отметить, что оптимальное значение

концентрации дихроичного красителя зависит от требуемой величины степени мультиплексирования. Так если в приведенном выше примере уменьшить значение степени мультиплексирования, то можно повысить значение концентрации красителя до 1% и при этом увеличить одновременно значения контраста светлоты изображения. Кроме этого оптимальное значение концентрации зависит от угла закрутки структуры ЖК, и для каждого значения  $\Phi_T$  следует искать свое оптимальное значение концентрации красителя, которое обеспечивает требуемые характеристики дисплея.

На рис. 50 показаны зависимости отражения ЖК-дисплея в состоянии выключено  $R_{off}(\lambda_{max})$  и контраста  $K(\lambda_{max})$  при степени мультиплексирования  $N = 32:1$  для различных красителей от толщины ЖК-слоя  $L_{LC}$  для ЖК-структуры с углом закрутки  $\Phi_T = 250^\circ$ . Эти зависимости получены при условии, что средняя оптическая плотность ЖК-ячейки и дихроичное отношение красителя остаются постоянными. Анализ зависимостей  $R_{off}(\lambda_{max})$  от  $L_{LC}$  показывает, что для каждого из красителя существует такое значение  $L_{LC}$ , при котором  $R_{off}(\lambda_{max})$  минимально. Такое поведение зависимости  $R_{off}(\lambda_{max})$  от  $L_{LC}$  можно объяснить следующим образом. Рассмотрим прохождение неполяризованного света через поглощающий закрученный слой ЖК. Для такого слоя ЖК собственными поляризационными модами являются эллиптически поляризованные волны. В этом случае коэффициент поглощения для эллиптической поляризации зависит не только от дихроичного отношения и средней оптической плотности красителя (как для случая незакрученной структуры ЖК), но и от параметра  $(\Delta n_{LC} L_{LC} / \lambda)$  (где  $\Delta n_{LC}$  – анизотропия показателей преломления ЖК) [120]. Варьируя толщину слоя ЖК (при постоянных значениях средней оптической плотности и дихроичного отношения красителя), мы тем самым изменяем и коэффициент поглощения для одной из двух эллиптических поляризаций. Из этого следует, что зависимость пропускания ячейки гость-хозяин от толщины ЖК-слоя имеет характер схожий с аналогичной зависимостью для твист-ячейки, помещенной между двумя поляризаторами. Поэтому существует такая толщина ЖК-слоя, при которой наблюдается минимум пропускания ячейки гость-хозяин при изменении  $L_{LC}$ , что аналогично условию минимума Гуч-Терри для твист-ячейки. Так как каждый дихроичный краситель имеет свои значения дихроичного отношения и средней оптической плотности, то для разных красителей будут разные значения  $L_{LC}$ , соответствующие минимальному пропусканию ячейки гость-хозяин. Минимальное значение пропускания ячейки гость-хозяин означает и минимальное значения  $R_{off}(\lambda_{max})$  всего отражательного устройства гость-хозяин с фазовой пластинкой. В отличие от  $R_{off}(\lambda_{max})$  значение отражения дисплея в состоянии включено  $R_{on}(\lambda_{max})$  очень слабо зависит от изменения толщины слоя ЖК, так как в этом состоянии структура ЖК сильно искажена и имеет слабое поглощение и слабую анизотропию показателя преломления. Поэтому ячейка гость-хозяин становится изотропной системой и перестает играть роль поляризатора для фазовой пластинки. Такое поведение зависимости  $R_{on}(\lambda_{max})$  от  $d_{LC}$  одинаково для всех красителей, отличие состоит только в величине самого  $R_{on}(\lambda_{max})$  для разных красителей. Так как зависимость  $R_{off}(\lambda_{max})$  от  $L_{LC}$  имеет минимум, а  $R_{on}(\lambda_{max})$  от  $L_{LC}$  зависит слабо, то зависимости  $K(\lambda_{max})$  от  $L_{LC}$  имеет максимум для всех рассмотренных нами красителей (рис. 50).

На рис. 51 показаны зависимости отражения в состоянии выключено и контраста дисплея от толщины фазовой пленки  $L_{ph}$  для различных красителей и структуры ЖК с  $\Phi_T = 250^\circ$ . Как видно из этого рисунка зависимость контраста  $K(\lambda_{max})$  от толщины фазовой пленки имеет максимум, а зависимость отражения дисплея в состоянии выключено  $R_{off}(\lambda_{max})$  от этой же величины имеет минимум. В то же время с ростом толщины фазовой пленки величина отражения индикатора в состоянии включено  $R_{on}(\lambda_{max})$  незначительно падает. Минимум в зависимостях отражения дисплея  $R_{off}(\lambda_{max})$  от толщины фазовой пленки связан с тем, что явление интерференции поляризованных лучей наблюдается в фазовой пленке, а ячейка гость-хозяин выступает в роли поляризатора. В этом случае

наша система становится эквивалентна фазовой пластинке, помещенной между двумя поляризаторами. Тогда пропускание такой системы (или отражение в нашем случае) зависит от  $L_{ph}$  как  $\sin(2\pi\Delta n L_{ph}/\lambda_{max})$ . Нами рассмотрен узкий интервал изменения  $L_{ph}$ , соответствующий минимуму зависимости  $R_{off}(\lambda_{max})$  от  $L_{ph}$ , и поэтому наблюдается только один минимум. Следует отметить, что пологость зависимостей  $R_{off}(\lambda_{max})$  от  $L_{ph}$  объясняется малостью оптической анизотропии фазовой пленки  $\Delta n$ . При этом для каждой длины волны имеется свой фазовый набег, то есть толщина фазовой пленки, при котором наблюдается минимум в зависимости  $R_{off}(\lambda_{max})$  от  $L_{ph}$ , поэтому для каждого красителя фазовая пластинка должна быть своей. В силу этого для черно-белого красителя высокого значения контраста изображения во всем видимом диапазоне длин волн достичь невозможно. Зависимость отражения дисплея в состоянии включено  $R_{on}(\lambda_{max})$  от толщины фазовой пленки  $L_{ph}$  объясняется также тем, что мы наблюдаем интерференцию поляризованных лучей в фазовой пленке, только в этом случае степень поляризации света прошедшего через ячейку гость-хозяин очень мала, так как слой ЖК сильно возмущен. В предельном случае бесконечно большого напряжения, когда слой ЖК представляет собой гомеотропно ориентированный образец, эта зависимость пропадает, так как ЖК - ячейка перестает работать как поляризатор. Минимум в зависимости отражения дисплея в состоянии выключено от толщины фазовой пленки, и слабая зависимость отражения дисплея в состоянии включено от толщины фазовой пленки объясняет максимум в зависимости контраста  $K(\lambda_{max})$  от толщины фазовой пленки  $L_{ph}$ .

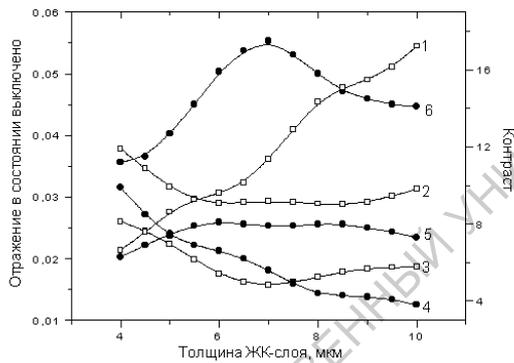


Рис. 50 Зависимость отражения безполяридного ЖК-дисплея гость-хозяин с фазовой пластинкой в состоянии выключено  $R_{off}(\lambda_{max})$  и контраста изображения  $K(\lambda_{max})$  от толщины ЖК-слоя  $L_{LC}$  при постоянных значениях средней оптической плотности и дихроичном отношении для различных красителей на соответствующих длинах волн максимума поглощения красителей 1, 4 – КД – 6; 2, 5 – КД – 184; 3, 6 – КД – 10; 1, 2, 3 –  $R_{off}(\lambda_{max})$ ; 4, 5, 6 –  $K(\lambda_{max})$

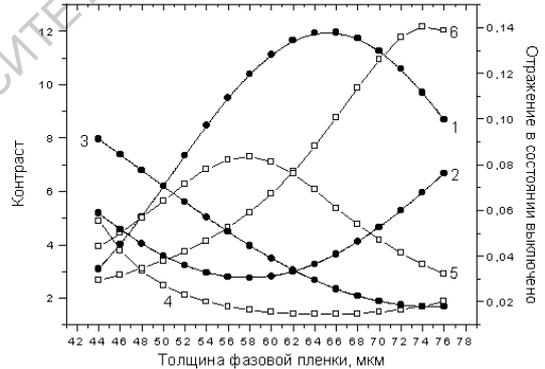


Рис. 51 Зависимость отражения безполяридного ЖК-дисплея гость-хозяин с фазовой пластинкой в состоянии выключено  $R_{off}(\lambda_{max})$  и контраста изображения  $K(\lambda_{max})$  от толщины фазовой пластинки  $L_{ph}$  для различных красителей на соответствующих длинах волн максимума поглощения красителей 1, 4 – КД – 6; 2, 5 – КД – 184; 3, 6 – КД – 10; 1, 2, 3 –  $R_{off}(\lambda_{max})$ ; 4, 5, 6 –  $K(\lambda_{max})$

На рис. 52 показана зависимость степени мультиплексирования безполяридного отражательного дисплея с фазовой пленкой с углом закрутки ЖК - структуры  $\Phi_T = 250^0$  от отношения толщины ЖК - слоя  $L_{LC}$  к шагу спирали ЖК  $p_0$ . Зависимость  $N = f(L_{LC}/p_0)$  вычислялось при условии, что контраст изображения имеет величину не менее чем 5:1. Как и для случая обычного STN -дисплея эта зависимость имеет ярко выраженный максимум, только величина максимально достижимой степени мультиплексирования в несколько раз меньше, чем для STN-дисплея. Происхождение максимума в зависимости  $N = f(L_{LC}/p_0)$  можно объяснить следующим образом. Рабочим интервалом значений является  $\Phi_T/360 > L_{LC}/p_0 \geq \Phi_T/360 - 0.25$ . Первоначальное уменьшение отношения  $L_{LC}/p_0$  приводит к

росту крутизны зависимости отражения дисплея от управляющего напряжения, а дальнейшее уменьшение этой величины приводит к возникновению гистерезиса в зависимости  $R = f(U)$ , что в свою очередь уменьшает крутизну этой кривой. Поэтому зависимость  $N = f(L_{LC}/p_0)$  имеет максимум.

Таким образом, можно сказать, что предлагаемая конструкция отражательного ЖК-дисплея гость-хозяин без поляроида с фазовой пластинкой является перспективной как с точки зрения характеристик устройства, так и с точки зрения простоты конструкции дисплея. При этом оптимальной с точки зрения характеристик ЖК-дисплея гость-хозяин является структура ЖК с углом закрутки  $250^\circ$ , которая одновременно может обеспечить высокие значения контраста и светлоты изображения, а также высокий уровень мультиплексирования отражательно индикатора с фазовой пластинкой.

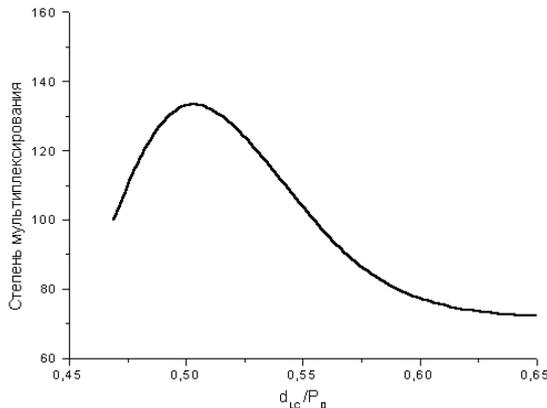


Рис. 52 Зависимость степени мультиплексирования отражательного безполяридного ЖК-дисплея гость-хозяин с фазовой пластинкой от отношения  $L_{LC}/p_0$  для структуры с углом закрутки  $\Phi_T = 250^\circ$  при контрасте не менее чем 5:1 на длине волны максимума поглощения красителя КД – 10

В данном разделе методом компьютерного моделирования проведено исследование улучшенной конструкции отражательного STN ЖК-дисплея гость-хозяин с фазовым компенсатором. Показано, что путем подбора параметров фазовой пластинки, спектра красителя и угла закрутки структуры ЖК можно получить одновременно высокие значения отражения, контраста изображения, а так же высокую степень мультиплексирования. С точки зрения эргономических характеристик устройства оптимальной является структура ЖК с углом закрутки  $250^\circ$ , для которой степень мультиплексирования дисплея может превышать значение 100:1. При этом значение отражения дисплея в состоянии включено имеет величину не менее чем 21 % и контраст изображения не ниже 5:1 для черно-белого красителя. Для цветного красителя типа КД-6 или КД-10 возможно увеличение контраста изображения на длине волны максимума поглощения красителя до 10:1.

### 3.6. Фазовая компенсация и ограничение значения максимального контраста устройства

В настоящий момент времени в ЖК – индикаторной технике для улучшения цветовых и угловых характеристик дисплеев, использующих эффект интерференции поляризованных волн, используются различные фазовые компенсаторы. В качестве фазового компенсатора могут использоваться либо идентичные ЖК – ячейки, как в случае DSTN – дисплеев или двойных  $\pi$  - ячеек, так и полимерные пленки, например для NSTN – дисплеев или тройных субтрактивных STN – дисплеев. И том и в другом случае фазовые компенсаторы служат для компенсации фазовых соотношений между интерферирующими волнами. В настоящей главе книги на примерах нескольких конструкций показано, что фазовые компенсаторы могут улучшать электрооптические характеристики также и устройств использующих эффект «гость – хозяин», а также применяются в однополяридных отражательных STN – дисплеях. Таким образом, можно сделать вывод, что использование фазовых компенсаторов приводит к улучшению электрооптических и оптических характеристик любых ЖК – устройств отображения информации, в основе работы которых лежит управляемая электрическим полем интерференция

поляризованных лучей и эффект «гость – хозяин» в независимости от ЖК – структуры. Поэтому нами предлагается следующий принцип фазовой компенсации для улучшения оптических и электрооптических характеристик для ЖК – устройств отображения информации. Оптические и электрооптические характеристики для любого ЖК – устройства отображения информации, в основе которого лежит использование управляемого электрическим полем эффекта интерференции поляризованных лучей или эффекта «гость – хозяин», вне зависимости от ЖК – структуры, могут быть улучшены путем использования фазового компенсатора. Для управляемого электрическим полем эффекта интерференции поляризованных лучей принцип фазовой компенсации используется для получения одинаковой разности фаз между интерферирующими лучами во всем видимом диапазоне для всех управляющих напряжений, а для эффекта «гость – хозяин» этот принцип применяется для получения поляризационной моды, которая максимально поглощается в данной ЖК – структуре при нулевом или рабочем напряжениях. Используя этот принцип, как было показано выше, можно улучшить оптические и электрооптические характеристики подавляющего большинства промышленно выпускаемых ЖК – устройств отображения информации любой информативной емкости от наручных часов, до экранов персональных компьютеров.

При использовании фазовых компенсаторов для достижения оптимальных оптических характеристик в устройствах, работающих на основе двойного лучепреломления, стоит сделать замечания о физических явлениях, которые ограничивают теоретический максимум контраста изображения. Действительно, для корректного вычисления максимально достижимого контраста изображения в таком устройстве необходимо учитывать волны, которые дважды или более раз отражались от различных границ раздела внутри рабочей ЖК- ячейки и для которых условие фазовой компенсации будет нарушено, так как условие фазовой компенсации выполняется только для волн прошедших сквозь ЖК- ячейку только один раз. В этом случае для достижение максимально возможного контраста изображения в ЖК- дисплеях с фазовыми компенсаторами необходимо сводить к минимуму потери на отражение внутри самой ЖК- ячейки.

### **3.7. Модулятор на основе волноводного режима в твист - структуре с большим углом закрутки**

В настоящее время большинство мониторов используют жидкокристаллическую (ЖК) панель, работающую на основе электрооптического твист – эффекта с углом закрутки структуры  $90^{\circ}$ . Преимущество этой жидкокристаллической технологии состоит в том, что ее стоимость невелика, а электрооптические характеристики ЖК устройств имеют высокие показатели. Поэтому подобные ЖК дисплеи сегодня являются самыми популярными. Заметим, что панели на твист – эффекте главным образом широко используются на рынке настольных дисплеев с размерами экрана от 15 до 28 дюймов. Другой разновидностью ЖК панелей, получивших наиболее широкое применение, являются ЖК устройства небольшого размера (например,  $190 \times 54$  мм), использующие явление интерференции поляризованных лучей в ЖК структурах с углами закрутки более  $90^{\circ}$ . Как правило, такие устройства не является черно – белыми или полноцветными, что ограничивает область их применения. С другой стороны в литературе отсутствуют данные об использовании ЖК структур с большими углами закрутки, которые работают в волноводном режиме. Речь идет о структурах ЖК с углом закрутки  $270^{\circ}$ , которые используются обычно в режиме интерференции поляризованных лучей. Под волноводным режимом в закрученной структуре ЖК понимается явление вращения плоскости поляризации поляризованного света слоем ЖК, при котором угол поворота плоскости поляризации света равен углу закрутки структуры ЖК. Такая ориентационная структура ЖК по сравнению с «классической» твист-структурой отличается высокой степенью мультиплексирования при прочих равных параметрах, что позволяет использовать подобные ЖК панели для создания простых и дешевых полноцветных

устройств малого и среднего размера. Поэтому целью данной работы является исследование оптических характеристик ЖК устройства типа оптического затвора, работа которых основана на использовании волноводного режима в ЖК структуре с углом закрутки  $270^0$ , в зависимости от его конструктивных параметров. В задачи исследования входило определение минимально необходимого набора оптических характеристик ЖК устройства для адекватного описания его оптических свойств, а также поиск оптимальных значений конструктивных параметров ЖК устройства. Для решения поставленных задач нами был применен метод компьютерного моделирования, который, в силу сложности натурального эксперимента в технике ЖК устройств отображения информации, является стандартным средством для этих целей.

Существует большое число параметров ЖК устройства, которые определяют его электрооптические и оптические характеристики. Однако для большинства ЖК устройств характерно то, что у ЖК модулятора существует только два рабочих состояния: закрытое, когда излучение сквозь него не проходит; открытое, когда излучение должно проходить сквозь него с максимальным коэффициентом пропускания. Часто открытое состояние соответствует нулевому управляющему напряжению (или напряжению ниже порога Фредерикса), а закрытое состояние - управляющему напряжению значительно выше порогового напряжения. В этом случае открытое состояние соответствует состоянию «выключено», закрытое – «включено». В силу этого большинство физических и технических параметров не оказывают влияния на оптические характеристики ЖК затвора. Исключением являются четыре параметра, которые всегда определяют оптические характеристики затвора: толщина слоя ЖК ( $L$ ); анизотропия показателя преломления ЖК ( $\Delta n$ ); угол закрутки структуры ЖК ( $\Phi_T$ ); угол ориентации входного (или выходного) поляризатора ( $\theta$ ). Влияние величин углов  $\Phi_T$  и  $\theta$  на оптические характеристики в волноводном режиме обычно не учитывается, так как используются углы закрутки ЖК структуры, кратные нечетному числу  $90^0$ , а ориентации входного и выходного поляризаторов в этом случае всегда совпадают с направлением натирания на первой и второй подложках ЖК ячейки. Кроме этого, на оптические характеристики серьезное влияние оказывает отношение толщины ЖК слоя ( $L$ ) к величине шага спирали ЖК структуры ( $p$ ), что рассмотрено в данной работе.

В разделе приведены данные по влиянию величин  $L$ ,  $\Delta n$  и  $L/p$  на среднее по спектру пропускание в состоянии «выключено»  $T_{off}$  ЖК устройства, средний по спектру контраст и ахроматичность ЖК устройства в состоянии «выключено»  $H$ . В связи со сложностью натурального моделирования нами для исследования характеристик и поиска оптимальных параметров ЖК затвора использовалась система компьютерного моделирования *MOUSE-LCD*. При моделировании электрооптических характеристик ЖК устройства использовались данные для ЖКМ ZLI 4792. Во всех расчетах эти физические параметры оставались постоянными. При исследовании влияния величины оптической анизотропии на оптические характеристики ЖК устройства дисперсия показателей преломления принималась такой же, как у ЖК ZLI 4792. Ниже приведены результаты компьютерного моделирования.

На рис. 53 и 54 представлены результаты компьютерного моделирования оптических характеристик твист – ячейки с углом закрутки структуры  $270^0$  в зависимости от толщины ЖК – слоя и оптической анизотропии. Зависимости  $T_{off} = T_{off}(L)$  (рис. 53а) и  $K = K(L)$  (рис. 53б) имеют вид кривых с максимумами, что объясняется тем, что условие волноводного режима для этой структуры выполняется только при условии  $\Delta n \cdot L \approx 0.6$  мкм. Отклонение от этого условия приводит как уменьшению пропускания в состоянии «выключено», так и к падению контраста. Условие волноводного режима в этом случае не так критично к толщине ЖК слоя, как для классического твист-эффекта с  $90^0$  углом закрутки структуры. Отклонение толщины ЖК слоя от оптимального значения может составлять до  $\pm 1$  мкм. Ахроматичность устройства в состоянии «выключено» также не

сильно зависит от  $L$ , и почти во всем диапазоне изменения толщины  $H = 0.05 \pm 0.01$  (рис. 53в).

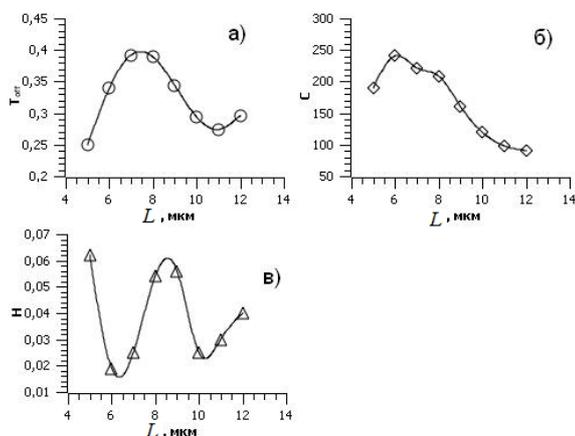


Рис. 53 Зависимость оптических характеристик твист – ячейки с углом закрутки структуры  $270^\circ$  от толщины слоя ЖК; а - зависимость среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» от толщины ЖК слоя; б - зависимость среднего по спектру контраста от толщины ЖК слоя; в - зависимость ахроматичности в состоянии «выключено» от толщины ЖК слоя.

Аналогичные выводы можно сделать относительно зависимости оптических характеристик такого модулятора от оптической анизотропии ЖК  $\Delta n$ . Отличие состоит в том, что интервал изменения  $\Delta n$  гораздо уже (рис. 54).

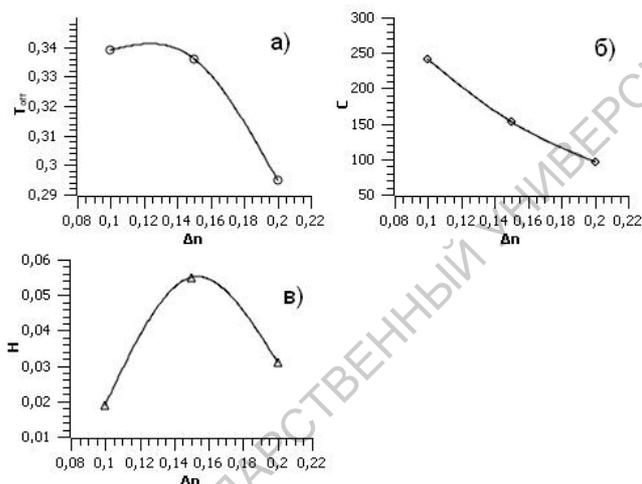


Рис. 54 Зависимость оптических характеристик твист – ячейки с углом закрутки структуры  $270^\circ$  от оптической анизотропии ЖК  $\Delta n$ ; а - зависимость среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено» от оптической анизотропии ЖК; б - зависимость среднего по спектру контраста от оптической анизотропии ЖК; в - зависимость ахроматичности в состоянии «выключено» от оптической анизотропии ЖК

На рис. 55 представлена зависимость контраста твист – ячейки с углом закрутки структуры  $270^\circ$  от отношения толщины ЖК – слоя  $L$  к шагу спирали  $p$ . Пропускание  $T_{off}$  и ахроматичность  $H$  от величины  $d/p$  не зависят, так как в состоянии «выключено» определяются только величиной  $\Delta n \cdot L$ , которая в данном случае постоянна. Зависимость контраста имеет вид кривой с максимумом, наличие которого объясняется тем, что при больших значениях  $L/p$  крутизна вольт-контрастной кривой меньше, чем при малых значениях указанного отношения. Поэтому слой ЖК более искажен при малых значениях  $L/p$ , то есть пропускание в состоянии «включено» имеет меньшую величину. С другой стороны изменение  $L/p$  до значений, соответствующих левой границе зоны Гранжана, приводит к появлению гистерезиса в вольт-контрастной кривой, поэтому в состоянии «включено» пропускание начинает расти. Поэтому кривая  $K=K(L/p)$  имеет максимум.

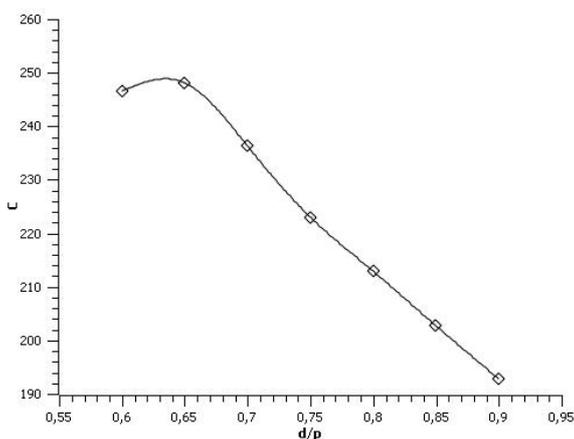


Рис. 55 Зависимость контраста твист – ячейки с углом закрутки структуры  $270^{\circ}$  от отношения толщины ЖК к шагу спирали структуры  $d/p$ .

### 3.8 Оптические характеристики модуляторов, работающих на основе управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ячейках малой толщины

В настоящее время жидкокристаллических (ЖК) панели нашли свое применение как в области устройств отображения информации (ЖК – мониторы), так и в области устройств преобразования (например, стерео очки для 3D приложений). Если для дисплейных приложений наибольшее распространение получили TN (twist nematic) -, IPS (In-Plane Switching) - и MVA (Multi-Domain Vertical Alignment) -матрицы, то для применения в качестве модуляторов светового излучения чаще используются панели на основе  $\pi$ - ячеек. При этом TN – ячейки (или твист – ячейки) так же используются в 3D приложениях, но имеют несколько худшие динамические характеристики. Так как в последнее время очень большое внимание уделяется 3D – приложениям, то мы остановимся на ЖК затворах, применяемых для этих целей. Одним из самых распространенных ЖК устройств модуляции оптического излучения для 3D - приложений является ЖК затвор, состоящий из одной или двух одинаковых  $\pi$ - ячеек с взаимно перпендикулярным расположением молекул ЖК на смежных поверхностях и помещенных между двумя скрещенными поляризаторами. Такая конструкция позволяет получить за счет управления равные времена реакции и релаксации, величина которых определяется только временами реакции составляющих устройство ячеек. В этом случае используется эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в планарных или закрученных структурах ЖК в ячейках с антисимметричной ориентацией молекул ЖК на граничных поверхностях. Менее распространенными является ЖК – затворы, выполненные стандартных TN – ячейках. Основным недостатком всех конструкций таких устройств является относительно большое время срабатывания ( $\approx 4$  мс), что ограничивает использование этих затворов в более быстродействующих модуляторах. Поэтому до сих пор актуальной задачей является поиск конструкции ЖК – затвора, которая бы имела быстродействие в субмиллисекундном диапазоне. Хотя в настоящее время известны несколько таких конструкций, однако в промышленном масштабе они не получили распространение. Настоящая статья посвящена поиску простой и одновременно обладающей повышенным быстродействием конструкции ЖК затвора. С этой целью нами выполнено компьютерное моделирование характеристик различных конструкций ЖК затвора для 3D - приложений и выяснены основные факторы, ограничивающие максимально достижимые значения контраста, пропускания, ахроматичности изображения и быстродействие этих устройств. Основное число работ в этой области посвящено рассмотрению ЖК – затворов на основе  $\pi$  -ячеек или TN – ячеек и достаточно малое число исследователей использует конструкцию на основе явления управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в различных планарных (с закруткой или без нее) структурах ЖК. Ниже приведены результаты теоретического исследования оптических и динамических характеристик различных ЖК устройств, которые основаны на эффекте интерференции поляризованных лучей управляемой

электрическим полем в закрученных и незакрученных планарных структурах ЖК с симметричными граничными условиями.

Существует большое число конструктивно-технологических и физических параметров ЖК затвора, которые определяют его оптические характеристики. В качестве эффекта, на основе которого работает ЖК затвор, нами выбрано явление управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в планарных структурах с различным углом закрутки. В данной работе рассмотрено влияние угла закрутки структуры ЖК ( $\Phi_T$ ) и толщина рабочего зазора в ячейке  $d$  затвора на его оптические и динамические (времена переключения из состояния «выключено» в состояние «включено») характеристики.

При моделировании электрооптических характеристик ЖК затвора использовались данные для ЖК вещества типа ZLI 4792 фирмы Merck, Германия. В случае использования в затворе ЖК с большой оптической анизотропией в качестве модельного вещества выбирался материал E7 фирмы Merck с  $\Delta n(550 \text{ нм}) = 0.223$ . Во всех расчетах эти физические параметры ЖК оставались постоянными. В качестве поляризатора использовалась пленка NPF – F 1205 DU. Угол ориентации входного поляризатора составлял  $45^\circ$  с направлением натирания на первой подложке ЖК ячейки, а для выходного поляризатора угол ориентации равнялся  $-45^\circ$  с тем же направлением. При моделировании значения остальных конструктивных параметров ЖК затвора считались равными средним технологическим величинам. С целью исключения влияния значения управляющего напряжения на характеристики ЖК затвора были выбраны одинаковыми для всех углов закрутки структур ЖК, при этом  $U_{\text{выкл}} = 0 \text{ В}$ , а  $U_{\text{вкл}} = 12 \text{ В}$ . То есть  $U_{\text{выкл}} < U_{\text{Fred}}, U_{\text{вкл}} \gg U_{\text{Fred}}$ , где  $U_{\text{Fred}}$  – напряжение порога эффекта Фредерикса в структуре ЖК.

На рис. 56 представлены зависимости среднего по спектру пропускания ( $T$ ) ЖК затвора на основе управляемого полем явления двойного лучепреломления от управляющего напряжения для различных углов ориентации ЖК ( $\Phi_T$ ). Из рисунка видно, что пороговое значение напряжения перехода Фредерикса растет с увеличением значения угла  $\Phi_T$ , а значения среднего по спектру пропускания в состоянии «выключено»  $T_{\text{off}}(U_{\text{выкл}} = 0 \text{ В})$  и в состоянии «включено»  $T_{\text{on}}(U_{\text{вкл}} = 12 \text{ В})$  осциллируют. При этом крутизна зависимости  $T = T(U)$  растет при изменении  $\Phi_T$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , затем падает, когда  $\Phi_T$  меняется в пределах от  $90^\circ$  до  $225^\circ$ , а затем опять растет с ростом угла закрутки. Стоит заметить, что, так как для управления затвором используются только два значения управляющего напряжения ( $U_{\text{выкл}}$  и  $U_{\text{вкл}}$ ), то такая характеристика как крутизна зависимости  $T = T(U)$  для анализа и выбора оптимальной конструкции устройства не важна. Для этой цели стоит использовать минимально необходимый набор оптических характеристик: среднее по спектру пропускание в состоянии «выключено»  $T_{\text{off}}$ , средний по спектру контраст между состоянием «включено» и «выключено»  $K$  и ахроматичность для состояния «выключено»  $H_{\text{off}}$ . С точки зрения минимально необходимого набора оптических характеристик ЖК затвора, оптимальной конструкцией устройства считается такая, которая одновременно имеет максимально возможные значения  $T_{\text{off}}$ ,  $K$  и минимально возможное значение  $H_{\text{off}}$ . При этом считается, что ЖК затвор удовлетворяет требованиям ахроматичности, если  $H_{\text{off}} < 0.05$ . На рис. 57 представлены зависимости  $T_{\text{off}} = T_{\text{off}}(\Phi_T)$ ,  $K = K(\Phi_T)$  и  $H_{\text{off}} = H_{\text{off}}(\Phi_T)$  для ЖК затвора на основе управляемого полем двойного лучепреломления в различных планарных структурах ЖК. Из этого рисунка видно, что с точки зрения минимально необходимого набора оптических характеристик конкурируют между собой три структуры с углом закрутки  $\Phi_T = 0^\circ, 90^\circ$  и  $270^\circ$ . При этом ЖК затворы на основе структуры с  $\Phi_T = 90^\circ$  и  $270^\circ$  имеют максимальные значения  $T_{\text{off}}$  и  $K$ , но  $H_{\text{off}} > 0.05$ . Однако стоит отметить, что окраска этих устройств в состоянии «выключено» слабая, и если не предъявлять жестких требований к ахроматичности, то такие затворы вне конкуренции. С другой стороны устройство, выполненное на основе планарной ячейки  $\Phi_T = 0^\circ$ , составляет достойную конкуренцию предыдущим затворам, проигрывая по контрасту и пропусканию в состоянии «выключено», но выигрывая по

ахроматичности при минимально возможном значении  $\Delta n \cdot d \approx 0.2$  мкм (это существенно сказывается на быстродействии устройства, см. следующий раздел).

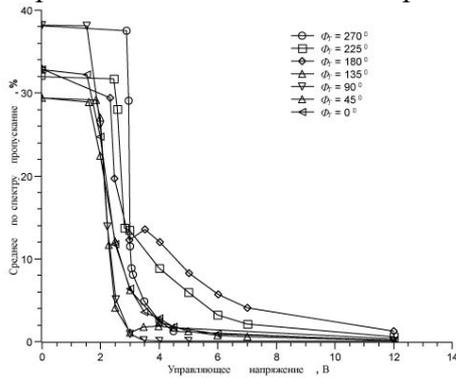


Рис. 56. Зависимость среднего по спектру пропускания ЖК затвора, работающего на основе управляемого электрическим полем явления интерференции поляризованных лучей, от управляющего напряжения для различных углов закрутки структуры ЖК

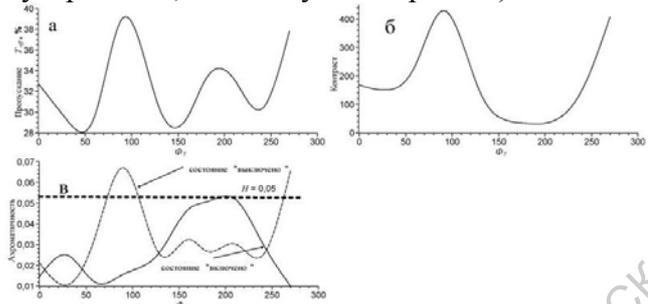


Рис. 57 Зависимость минимально необходимого набора оптических характеристик ЖК – модулятора от угла закрутки структуры  
а – пропускание устройства в состоянии «выключено»  $T_{off}$ , б – контраст устройства между состояниями «включено» и «выключено»  $K$ ; в – ахроматичность устройства для состояний «выключено»  $H_{off}$  и «включено»  $H_{on}$

На рис. 58 показана зависимость оптической толщины ЖК затвора  $\Delta n \cdot L$ , имеющего оптимальный минимальный набор оптических характеристик, от угла закрутки структуры ЖК  $\Phi_T$ . Видно, что эта зависимость монотонно возрастающая и хорошо аппроксимируется линейной функцией вида  $y = ax + b$ . Относительная ошибка в определении параметров  $a$  и  $b$  прямой не превышает 12.5 % ( $a = 0.0016 \pm 0.0002$ ;  $b = 0.261 \pm 0.032$ ). Заметим, что отклонение  $\Delta n \cdot L$  от оптимальных значений не особо критично сказывается на оптических характеристиках (см. рис. 59). Наоборот, можно сказать, что для ЖК затвора на основе структуры с  $\Phi_T = 90^\circ$  и  $270^\circ$  небольшой уход от значений  $\Delta n \cdot L$ , обеспечивающих максимальные  $T_{off}$  и  $C$ , позволяют достичь значений ахроматичности  $H_{off}$ , соответствующих требованию полноцветного изображения ( $H_{off} < 0.05$ ). Например, для ЖК затвора с  $\Phi_T = 90^\circ$ , максимальные значения  $T_{off}$  и  $C$  достигаются при  $\Delta n \cdot L \approx 0.48$  ( $H_{off} > 0.05$ ), но если выбрать  $\Delta n \cdot L \approx 0.46$ , то  $H_{off} < 0.05$ , а значения  $T_{off}$  и  $K$  уменьшатся не более чем на 10% от максимальных.

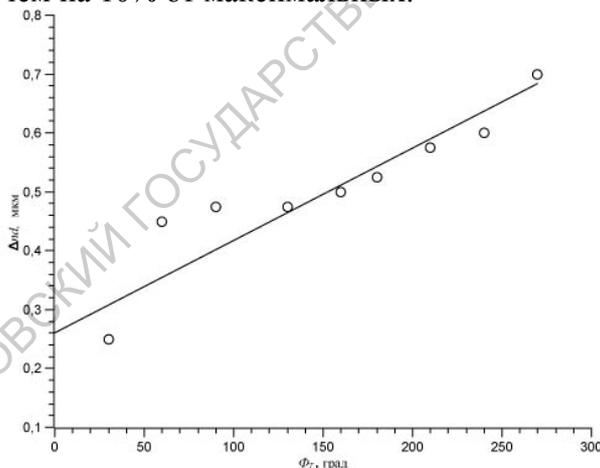


Рис. 58 Зависимость оптической толщины ЖК ячейки, имеющей оптимальный набор оптических характеристик ( $T_{off}$ ,  $K$ ,  $H_{off}$ ), от угла закрутки структуры ЖК

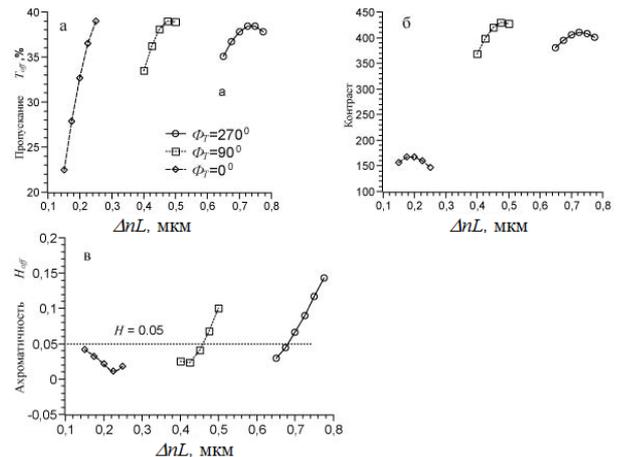


Рис. 59 Зависимость оптических характеристик ЖК модулятора (а -  $T_{off}$ , б -  $K$ , в -  $H_{off}$ ) от оптической толщины слоя ЖК для угла закрутки структуры  $\Phi_T = 0^\circ, 90^\circ, 270^\circ$

Для более полного анализа оптических характеристик ЖК затвора на основе явления управляемого электрическим полем двойного лучепреломления приведем рассчитанные углы обзора устройства для структур с  $\Phi_T = 0^\circ, 90^\circ$  и  $270^\circ$  (табл. 15). В

нашем случае углом обзора ЖК устройства называется угол между двумя азимутальными направлениями плоскости падения света при фиксированном угле падения света, для которых контраст изображения  $C$  не ниже определенного уровня. Из этого анализа следует, что при углах падения света на устройство до  $30^\circ$  устройства с  $\Phi_T = 0^\circ$  и  $90^\circ$  имеют почти круговые углы обзора. С увеличением угла падения индикатрисы контраста становятся более направленными, причем для больших углов закрутки структуры ЖК ( $\Phi_T = 90^\circ$  и  $270^\circ$ ) индикатрисы более узкие, чем для структуры с  $\Phi_T = 0^\circ$ . При больших углах падения (более  $50^\circ$ ) индикатрисы контраста для всех ЖК затворов узконаправленные.

Таблица 15.

Угол обзора ЖК модулятора на основе эффекта управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в различных структурах ЖК при контрасте изображения 30 : 1

Угол падения	$\Phi_T = 0^\circ$		$\Phi_T = 90^\circ$		$\Phi_T = 270^\circ$	
	$\Delta n=0.1$	$\Delta n=0.2$	$\Delta n=0.1$	$\Delta n=0.2$	$\Delta n=0.1$	$\Delta n=0.2$
$30^\circ$	$150^\circ \pm 150^\circ$	$180^\circ \pm 180^\circ$	$150^\circ \pm 150^\circ$	$180^\circ \pm 180^\circ$	$310^\circ \pm 90^\circ$	$310^\circ \pm 90^\circ$
$40^\circ$	$90^\circ \pm 60^\circ$ $280^\circ \pm 60^\circ$	$90^\circ \pm 60^\circ$ $280^\circ \pm 60^\circ$	$45^\circ \pm 15^\circ$ $225^\circ \pm 5^\circ$	$45^\circ \pm 15^\circ$ $225^\circ \pm 5^\circ$	$310^\circ \pm 90^\circ$	$310^\circ \pm 90^\circ$
$50^\circ$	$45^\circ \pm 15^\circ$ $235^\circ \pm 15^\circ$	$45^\circ \pm 15^\circ$ $235^\circ \pm 15^\circ$	$45^\circ \pm 5^\circ$	$45^\circ \pm 5^\circ$	$315^\circ \pm 5^\circ$	$315^\circ \pm 5^\circ$
$60^\circ$	$45^\circ \pm 15^\circ$ $235^\circ \pm 15^\circ$	$45^\circ \pm 15^\circ$ $235^\circ \pm 15^\circ$	$45^\circ \pm 5^\circ$	$45^\circ \pm 5^\circ$	-	-

Таблица 16.

Минимально необходимые оптические характеристики ЖК модуляторов на основе различных электрооптических эффектов в различных ориентационных структурах ЖК

Электрооптический эффект и ЖК – структура	$T_{off}, \%$	$C$	$H_{off}$	$\Delta n \cdot d_{opt},$ мкм
Классический твист – эффект	39.7	438	0.035	0.45
Твист – эффект в ЖК – структуре углом закрутки $270^\circ$	38	371	0.023	0.7
Эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ЖК – структуре с углом закрутки $0^\circ$	35.8	169	0.011	0.22
Эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ЖК – структуре с углом закрутки $90^\circ$	38.2	420	0.035	0.45
Эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ЖК – структуре с углом закрутки $270^\circ$	38.4	415	0.1	0.75
Эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в $\pi$ - ячейке с углом закрутки $180^\circ$ [11]	35	300	0.12	0.6

В заключение этого раздела приведем таблицу сравнения оптических характеристик различных ЖК затворов (табл. 16). Анализ этой таблицы показывает, что вне конкуренции, по оптическим характеристикам оказывается ЖК затвор на основе структуры с углом закрутки  $\Phi_T = 90^\circ$ , работающие как на твист - эффекте, так и на эффекте управляемого электрическим полем двойного лучепреломления. С другой стороны, применение обычных планарных ячеек с углом закрутки структуры  $\Phi_T = 0^\circ$  и явления интерференции поляризованных лучей, управляемой электрическим полем, позволяет использовать более тонкие слои ЖК, что положительным образом должно сказаться на быстродействии затвора в целом. Поэтому в следующем разделе проанализированы динамические характеристики различных ЖК затворов.

#### Глава 4. Исследование динамических характеристик эффекта двойного лучепреломления в различных структурах ЖК

Одной из важных проблем, которую приходится решать при разработке устройств отображения информации на ЖК, является достижение приемлемого уровня времени отклика оптического сигнала. В настоящий момент времени быстрота срабатывания ЖК – устройств находится на уровне нескольких миллисекунд и зависит от большого числа физических параметров ЖК – материала и конструктивных параметров индикатора. Основным методом, позволяющим достичь требуемых на практике характеристик устройства, является метод компьютерного моделирования, два этапа (расчет статического поля директора в зависимости от управляющего напряжения и расчет соответствующего этому напряжению оптическому отклику) которого были описаны в главе 2. В этой главе книги рассмотрены вопросы моделирования динамики оптического отклика ЖК – устройства и представлены основные результаты моделирования.

##### 4.1 Динамика оптического отклика жидкокристаллического индикатора при средних управляющих напряжениях

Одна из наиболее важных проблем, которую приходится решать в системах отображения информации на основе эффекта двойного лучепреломления в ЖК - структуре, связана с быстродействием этого эффекта. Известно большое количество работ, в которых проводится исследование влияния параметров ЖК и ЖК - ячейки на быстродействие этого эффекта. Однако во всех предыдущих исследованиях временные характеристики рассматривались в отрыве от крутизны вольт - контрастной кривой эффекта. В то же время, как известно, для устройств отображения информации на основе двулучепреломления в STN- структурах одновременно важными являются как крутизна вольт - контрастной кривой, так и времена переключения между двумя "рабочими" состояниями. В этой связи нами выполнено исследование зависимости быстродействия и крутизны вольт - контрастной кривой эффекта двойного лучепреломления в STN- структурах от параметров ЖК и ЖК- ячейки.

Для характеристики динамики переключения эффекта нами использовались времена реакции  $\tau_p$  и релаксации  $\tau_{рл}$ . Методика вычисления динамических характеристик эффекта двойного лучепреломления в STN - структуре содержит:

1. Вычисление в статическом режиме зависимости среднего пропускания STN ЖК- ячейки от управляющего напряжения ( $Y=Y(U)$ ). Далее по характеристике  $Y=Y(U)$  вычислялись напряжения для состояний включено  $U_{10}$  и выключено  $U_{90}$  и определялась крутизна вольт - контрастной характеристики  $S$ . Крутизна вольт – контрастной кривой или степень мультиплексирования ЖК – индикатора определяется известным выражением:

$$S = \left( \frac{U_{вкл}^2 + U_{выкл}^2}{U_{вкл}^2 - U_{выкл}^2} \right)^2. \quad (49)$$

2. Расчет времени реакции  $\tau_p$  и релаксации  $\tau_{рл}$  в диапазонах напряжений  $U_0 \rightarrow U_{10}$ ;  $U_0 \rightarrow U_{90}$ ;  $U_{90} \rightarrow U_{10}$  ( $U_0$  - пороговое напряжение) и наоборот. Времена реакции и релаксации нами определялись как времена, необходимые для достижения максимального угла наклона молекул в центре слоя ЖК, соответствующего указанному напряжению.

В качестве ЖК – вещества использовалась смесь MCL – 6845 с углом закрутки структуры  $210^\circ$  и симметричными жесткими граничными условиями ( $\Theta_0 = \Theta_L$ ). На основании проведенных расчетов предусматривалось исследование:

- зависимостей  $\tau_p = \tau_p(U)$  и  $\tau_{рл} = \tau_{рл}(U)$ ;
- зависимостей  $\tau_p$ ,  $\tau_{рл}$ ,  $U_{10}$ ,  $S = f(\Phi_T, L, p_0, \Theta_0)$ .

Первое на что следует обратить внимание, это существенное отличие характеристик быстродействия, полученных по результатам деформации ЖК- структуры электрическим полем и по электрооптическому отклику. Временному диапазону

значительного изменения углов  $\Theta_m$  соответствует участок, на котором оптическое пропускание практически не меняется, что связано с особенностями деформации ЖК-структуры по всей толщине слоя ЖК. Тем не менее, выбирая в качестве оценки для  $\tau_p$  и  $\tau_{рл}$  времена установления равновесия на уровне максимального угла наклона в центре ЖК-слоя при заданном напряжении  $U$ , можно ограничиться определением  $\tau_p$  и  $\tau_{рл}$  по зависимости  $\Theta_m = \Theta_m(t)$ .

Типичные зависимости  $\tau_p = \tau_p(U)$  и  $\tau_{рл} = \tau_{рл}(U)$ ; для двух типов ЖК, обеспечивающих высокое и низкое значение крутизны вольт-контрастной характеристики (табл. 16), приведены на рис. 60. Для них при малых напряжениях характерен участок роста  $\tau_p$  с ростом управляющего напряжения, параметры которого зависят от параметров ЖК и ЖК-структуры. Такое поведение зависимости  $\tau_p = \tau_p(U)$  является следствием ненулевого угла преднаклона молекул ЖК на подложках. Как показывают расчеты при нулевом угле преднаклона молекул ЖК на подложках  $\Theta_0 = 0$  максимум в зависимости  $\tau_p = \tau_p(U)$  исчезает и при стремлении управляющего напряжения  $U$  к пороговому  $U_0$   $\tau_p \rightarrow \infty$ . Действительно, при  $\Theta_0 > 0$  понятия порога деформации ЖК-структуры исчезает, так как она деформирована изначально граничными поверхностями и любое малое электрическое напряжение деформирует ЖК-структуру еще больше. Поэтому понятие порогового напряжения можно ввести, вообще говоря, только для оптических характеристик.

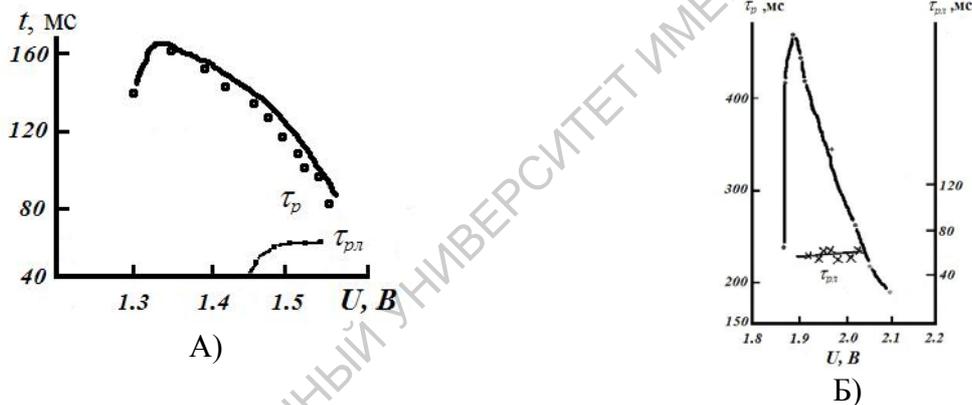


Рис. 60 Зависимость времени реакции и релаксации от управляющего напряжения в STN – структуре для различных параметров ЖК: А – ЖК типа I; Б – ЖК типа II

Таблица 16.  
Влияние параметров ЖК на крутизну вольт – контрастной кривой и быстродействие ЖК - ячейки

Тип ЖК	Параметры ЖК и ЖК – структуры					Характеристики ЖК - ячейки			
	$K_{33}/K_{11}$	$K_{22}/K_{11}$	$\Delta\epsilon/\epsilon_{\perp}$	$\Delta n$	$\Phi_T$	$U_{90}, B$	$S$	$\tau_{рл}, мс$	$\tau_{рл}, мс$
I	1.64	3	1.85	0.12	210	2	313	280	45
II	1.1	1.5	3.6	0.12	210	1.55	41	90	40

Крутизна вольт - контрастной кривой (см. (49)) однозначно определяется двумя управляющими напряжениями  $U_{вкл}$  и  $U_{выкл}$  для состояний включено и выключено соответственно. Поэтому исследовалась также зависимость  $\tau_p$  и  $\tau_{рл}$  от выбора "рабочих" точек на характеристиках  $\tau_p = \tau_p(U)$  и  $\tau_{рл} = \tau_{рл}(U)$ . Результаты расчетов представлены в табл. 17, откуда следует, что  $\tau_p$  обратно пропорционально разнице напряжений  $U_{вкл}$  и  $U_{выкл}$ . При этом в диапазоне  $U - U_0$  время реакции

$$\tau_p \approx \frac{1}{U^n - U_0^n}, \quad (50)$$

где  $n$  близко к 2 и при  $n = 2$  совпадает с известной формулой для  $\tau_p$ , верной для малых деформаций. Поэтому для оценки времени реакции в зависимости от  $U_{вкл} - U_{выкл}$  можно использовать выражение для  $\tau_p \approx 1/(U_{вкл}^2 - U_{выкл}^2)$ . При этом следует заметить, что

аналитическое выражение (47) для времени реакции слоя ЖК было получено для деформационного отклика, а не для оптического. При этом оптический отклик естественно отличается от деформационного, но, тем не менее, время реакции оптического отклика подчиняется той же самой аналитической зависимости от разницы управляющих напряжений в состояниях включено и выключено. Этот факт является критерием выбора значений управляющих напряжений для случая не только малых управляющих напряжений вблизи порога Фредерикса, но и для напряжений существенно превышающих этот порог.

Из полученных результатов расчета влияния на времена реакции и релаксации различных по крутизне вольт - контрастной кривой типов ЖК (табл. 16) и анализа уравнений (49) и (50) следует, что требования к реализации больших значений крутизны  $S$  при выборе указанных параметров ЖК приводят к существенному увеличению времени реакции.

В табл. 18 представлены результаты теоретического исследования влияния на крутизну вольт- контрастной кривой и параметры быстрогодействия эффекта двойного лучепреломления в STN- структуре угла закручивания ЖК- структуры  $\Phi_T$ . Как видно из таблицы, этот параметр приводит к противоположным изменениям времени реакции и крутизны вольт- контрастной кривой.

Таблица 17.  
Влияние выбора «рабочих» напряжений на быстродействие ЖК - ячейки

Диапазон напряжений, В	$\tau_p$ , мс
$U_0 \rightarrow U_{10}$ (1.43 $\rightarrow$ 1.72)	360
$U_0 \rightarrow U_{90}$ (1.43 $\rightarrow$ 1.87)	200
$U_{10} \rightarrow U_{50}$ (1.72 $\rightarrow$ 1.75)	172
$U_{10} \rightarrow U_{90}$ (1.72 $\rightarrow$ 1.87)	120

Таблица 18.  
Влияние угла закрутки ЖК – структуры на характеристики ЖК - ячейки

Характеристики STN - ячейки	$\Phi_T$ , град			
	180	210	225	240
$U_{90}$ , В	1.89	2.06	2.14	2.2
S	106	203	300	464
$\tau_p$ , мс	195	195	250	300
$\tau_{pl}$ , мс	30	29	65	28

Зависимость времени реакции от толщины слоя ЖК точно согласуется с известным аналитическим выражением, и в соответствии с ним уменьшение  $L$  способствует реализации малых значений времени реакции. Следует добавить, что это верно только при определенных сочетаниях  $L$  и  $p_0$  и при  $\Phi_T \leq 240^\circ$ . Однако при уменьшении  $L$  для сохранения оптимальных значений оптического параметра  $\Delta nL$  необходимо использовать ЖК с более высоким значением  $\Delta n$ , что также в свою очередь ограничивает возможности вариации толщины ЖК слоя.

Отметим, что при умеренных значениях  $\Phi_T$  зависимость  $\tau_p = f(\Theta_0)$  практически не прослеживается, хотя имеет слабо выраженный максимум вблизи углов  $\Theta_0 = 4^\circ - 5^\circ$ .

Используя различные наборы диэлектрических и упругих постоянных ЖК, можно существенно уменьшить время реакции и релаксации (см. табл. 16) для эффекта двойного лучепреломления в STN - структурах. Однако при таком ("групповом") подходе с уменьшением  $\tau_p$  и  $\tau_{pl}$  в значительно большей мере уменьшается крутизна вольт-контрастной кривой. Следовательно можно констатировать, что варьированием рассмотренных параметров ЖК и ЖК- структуры при сохранении высоких значений крутизны вольт- контрастной характеристики сложно реализовать уменьшение времени реакции до значений, необходимых для создания ТВ - экрана на ЖК, но вполне реально для использования в качестве экрана персональной ЭВМ. Наиболее действенным для этой

цели является выбор соответствующих значений  $L$  и  $p_0$  с учетом указанных выше ограничений. Следовательно, главным фактором, определяющим реализацию высоких значений крутизны вольт- контрастной характеристики и малого времени реакции (совместно), остается снижение вязкости ЖК.

#### **4.2 Динамика оптического отклика жидкокристаллического индикатора при высоких управляющих напряжениях**

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных исследованию динамики оптического отклика различных жидкокристаллических (ЖК) дисплеев, работающих в мультиплексном режиме, когда действующее эффективное напряжение на слой ЖК мало. Однако существуют ЖК – устройства типа оптических затворов, которые управляются напряжениями, превышающими порог деформации в десятки или сотни раз, для которых данные по динамике оптического отклика отсутствуют. В данном разделе представлены результаты компьютерного моделирования динамики оптического отклика ЖК–индикатора, использующего различные закрученный структуры ЖК, на управляющие электроды которых подаются напряжения, превышающие порог деформации в десятки раз.

##### **4.2.1 Результаты компьютерного моделирования**

Для описания динамики оптического отклика любого устройства отображения информации на ЖК, включая самые простые, используются система нелинейных дифференциальных уравнений, которые имеют аналитическое решение только для самых простых практически незначимых случаев. С другой стороны число физических и конструктивных параметров ЖК - дисплея, которые оказывают сильное влияние на динамику его оптического отклика, даже для самого простого устройства колеблется около двадцати. Поэтому наиболее действенным методом исследования различных электрооптических характеристик ЖК– индикаторов является компьютерное моделирование.

Для полного описания ЖК-дисплея большой набор оптических и эргономических, а также динамических характеристик, который включает в себя среднее по спектру пропускание, цветовые координаты, их зависимость от управляющего напряжения, угла падения света на устройство и времени. В качестве основных характеристик этого устройства нами рассматривались следующие:

- зависимость среднего по спектру пропускания устройства  $Y$  от управляющего напряжения;
- среднее по спектру пропускание  $Y_{off}$  для состояния “выключено”, при котором напряжение на управляющих электродах рабочей ячейки равно нулю;
- средний контраст  $K = Y_{off}/Y_{on}$ , где  $Y_{on}$  - среднее по спектру пропускание для состояния “включено”, при котором напряжение на управляющих электродах составляет 5 – 20 значений порогового напряжения для перехода Фредерикса);
- время включения или время реакции  $\tau_p$  ЖК – дисплея (время необходимое для перехода ЖК из состояния «выключено» с пропусканием  $Y_{off}$  в состояние «включено» с пропусканием  $Y_{on}$ );
- время выключения или время релаксации  $\tau_{pl}$  ЖК – дисплея (время необходимое для перехода ЖК из состояния «включено» в состояние «выключено»).

В настоящей работе нами исследуются зависимости только времен реакции и релаксации ЖК - дисплея от различных физических параметров и управляющего напряжения. Для исследования влияния различных параметров ЖК - индикатора, работающего на основе эффекта управляемого электрическим полем двулучепреломления в различных структурах ЖК на его характеристики использовалась система компьютерного моделирования “MOUSE-LCD”.

Проверка адекватности компьютерного описания динамики оптического отклика была проведена путем сравнения теоретически полученной и экспериментально измеренной зависимости времени реакции от управляющего напряжения для ЖК–

дисплея, работающего на основе интерференции оптических мод в ЖК структуре с углом закрутки  $180^{\circ}$ . Сравнение экспериментальных и расчетных данных проводилось для времени реакции по причине того, что эта характеристика ЖК - дисплея зависит от большего числа параметров, чем время релаксации. Параметры ЖК -индикатора, которые использовались в эксперименте и в расчетах, следующие: ЖК - вещество, которым заполнена ячейка, MCL – 6845; толщина ЖК- слоя  $L = 6.3$  мкм; шаг спирали хиральной добавки  $p_0 = 24.3$  мкм; угол преднаклона молекул ЖК на ориентирующих подложках  $\Theta_0 = 2^{\circ}$ . Эти зависимости показаны на рис. 61.

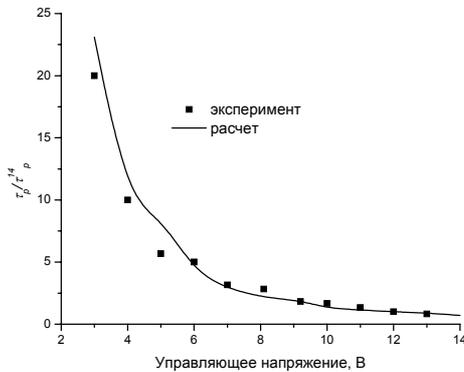


Рис. 61 Сравнение экспериментальных и расчетных данных  
 $\tau_p$  - текущее время реакции ЖК – дисплея;  $\tau_p^{14}$  - время реакции ЖК – дисплея при управляющем напряжении 14 Вольт

Отметим, что в приведенных пределах изменения управляющего напряжения экспериментальная и рассчитанная зависимости времени реакции от управляющего напряжения хорошо описываются формулой

$$\tau_p = \frac{\Omega}{U^2 - \Xi^2}, \quad (51)$$

где  $U$  – величина управляющего напряжения, для экспериментальной кривой  $\Omega = 420$  и  $\Xi = 2$ , а для теоретической зависимости  $\Omega = 650$  и  $\Xi = 3.6$ . В этом выражении размерность параметра  $\Omega$  (Вольт×милсек), а размерность параметра  $\Xi$  – Вольт. Физический смысл параметра  $\Xi$  - это пороговое напряжение для перехода Фредерикса. Параметр  $\Omega$  является сложной комбинацией следующих физических постоянных ЖК: коэффициенты вязкости; постоянные упругости; диэлектрические постоянные; толщина ЖК - слоя. Различие в постоянных  $\Omega$  и  $\Xi$  для теоретической и экспериментальной кривых обусловлено в первую очередь неточным заданием основных физических параметров ЖК MCL 6548, приведенных в каталоге, поэтому на рисунке по оси абсцисс приведено нормированное время реакции. Тем не менее, можно сказать, что сравнение экспериментальных и рассчитанных зависимостей показывает их вполне удовлетворительное количественное согласие. Поэтому можно сделать вывод о том, что система компьютерного моделирования «MOUSE-LCD» количественно верно описывает динамику переключения ЖК–дисплея из состояния «выключено» в состояние «включено» и обратно. Точность расчетов при этом будет определяться точностью задания физических и конструктивных параметров индикатора.

Следующий существенный вывод из сравнения экспериментальных и рассчитанных зависимостей времени реакции от управляющего напряжения заключается в том, что даже при очень высоких значениях рабочего напряжения время реакции подчиняется аналитической зависимости, которая была получена в предположении малости деформационных искажений, т.е.:

$$\tau_p \approx \frac{\Omega}{U_{вкл}^2 - U_{выкл}^2}. \quad (52)$$

Точно такой же вывод был сделан в предыдущем разделе при исследовании динамики ЖК – структур в случае малых и средних управляющих напряжений. Поэтому можно сделать

вывод, что эта аналитическая зависимость (50) для расчета времени реакции оптического отклика ЖК - структуры имеет место для случая значений управляющих напряжений.

#### 4.2.2 Динамика оптического отклика ЖК–дисплея, работающего на основе структур с различными углами закрутки

Как показывают наши расчеты, динамика оптического отклика при включении мало зависит от угла закрутки ЖК - структуры  $\Phi_T$  и включение индикатора для различных  $\Phi_T$  происходит за одно и тоже время. Этот факт скорее всего объясняется тем, что при очень высоких управляющих напряжениях деформация структуры ЖК зависит только от постоянных упругости для поперечного и продольного изгибов и слабо зависит от угла закрутки. Однако динамика оптического отклика ЖК–дисплея при переключении управляющего напряжения от 15 Вольт до нуля, которая показана на рис. 62, различна для разных углов закрутки ЖК структуры. Для углов закрутки, показанных на рисунке, быстрее всех в состояние с исходным значением оптического отклика возвращается структура с углом закрутки  $90^\circ$ , а медленнее всех – с  $\Phi_T = 180^\circ$ . Кроме этого существенным моментом в оптическом отклике структуры с  $\Phi_T = 180^\circ$  является временная задержка оптического отклика относительно деформационного, когда деформация ЖК уже начала меняться, а оптический отклик устройства не изменился, но затем все изменения происходят очень быстро (рис. 63). Таким образом, можно говорить, что в этом случае структура с углом закрутки  $180^\circ$  обладает кратковременной памятью, что отличает ее от структур с любыми другими углами закрутки. На рис. 63 это время кратковременной памяти обозначено как  $T_{мет}$  и по своей величине оно составляет около половины от времени релаксации. Отметим, что наличие кратковременной памяти в таком ЖК–дисплее не связано с обратным потоком, который присутствует в любой структуре ЖК и возникает при выключении управляющего напряжения. В пользу этого говорит тот факт, что расчет динамики оптического отклика этого устройства в случае, когда обратный поток не учитывается, показывает наличие кратковременной памяти в дисплее и в этом случае. Наличие кратковременной памяти в ЖК–дисплее, который использует эффект интерференции оптических мод в структуре ЖК с углом закрутки  $180^\circ$ , связано только с особенностями динамики оптического отклика, и не связано с динамикой деформации ЖК при выключении управляющего напряжения. Отметим, что кратковременная память может сыграть существенную роль в создании высокоинформативных систем отображения информации, использующих мультиплексное управление.

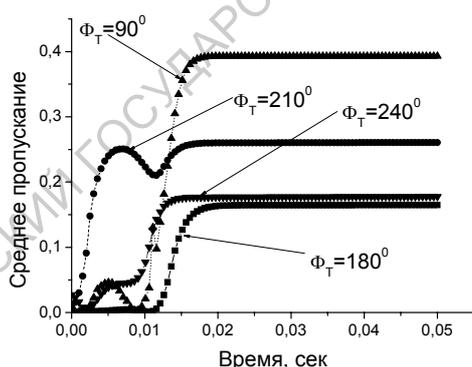


Рис. 62 Временная зависимость оптического отклика ЖК-дисплея с различными углами закрутки структуры ( $\Phi_T$ ) при выключении

В связи со сказанным дальнейшие наши исследования посвящены исследованию влияния физических и конструктивных параметров ЖК–дисплея, использующего интерференцию оптических мод в структурах с углом закрутки  $180^\circ$ , на время памяти и время релаксации оптического отклика такого индикатора.

В первую очередь рассмотрим как изменяются время релаксации  $\tau_{рл}$  и время памяти  $T_{мет}$  в зависимости от управляющего напряжения  $U$ . Как показали наши, расчеты время памяти зависит от управляющего напряжения во всем диапазоне изменения

последнего. Как показали наши расчеты, характер зависимости времени задержки от величины управляющего напряжения повторяет аналогичную зависимость для времени выключения дисплея

$$\tau_{пл} \approx \mu (U - U_0)^\alpha. \quad (53)$$

Величины параметров  $\mu$  и  $\alpha$  определяются физическими постоянными ЖК – вещества, используемого в дисплее.

Далее заметим, что основными конструктивными параметрами дисплея, которые существенным образом влияют на времена включения и выключения, являются толщина ЖК слоя  $L$  и отношение толщины ЖК - слоя к шагу спирали закрученной структуры  $p_0$  ( $L/p_0$ ). В соответствии с известными аналитическими зависимостями  $\tau_p$  и  $\tau_{пл}$  возрастают с ростом толщины ЖК – ячейки

$$\tau_p, \tau_{пл} \approx GL^2, \quad (54)$$

где  $G$  – постоянная, которая для данного управляющего напряжения зависит только от физических постоянных ЖК - вещества.

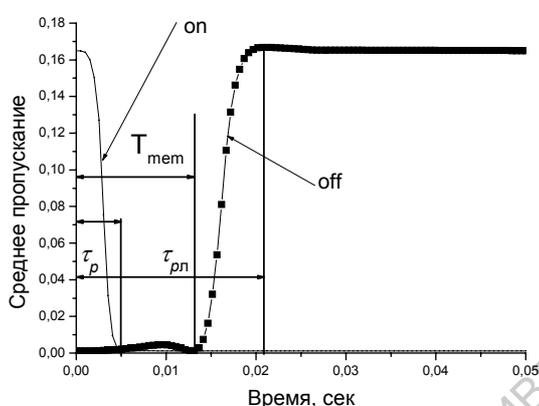


Рис. 63 Динамика оптического отклика ЖК-индикатора, работающего на эффекте интерференции поляризованных лучей в структуре с углом закрутки  $180^\circ$ , при переходе из состояния «включено» в состояние «выключено»

Однако время памяти  $T_{mem}$ , как показали наши вычисления, с изменением  $L$  ведет себя иначе. На рис. 64 представлены зависимости  $T_{mem}$  от  $L$  для различных значений оптической анизотропии ЖК  $\Delta n$ . Как видно из этого рисунка зависимости  $T_{mem}$  от  $L$  не повторяют аналогичные зависимости для  $\tau_p$  и  $\tau_{пл}$ , а имеют выраженные минимумы. Последнее говорит о существовании некоторого оптимального значения толщины ЖК - слоя, для которого время задержки оптического сигнала имеет минимальное значение. Значение оптимальной толщины ЖК - слоя зависит от оптической анизотропии ЖК, так как оптический отклик такого дисплея оптимален для величины  $(\Delta n \cdot L) = (0.52 \pm 0.05)$  мкм и выход за указанные пределы влечет за собой исчезновения оптического эффекта. Существование оптимальной толщины ЖК – слоя, для которой время задержки оптического сигнала относительно деформационного минимально, может играть большую роль для реализации высокоинформативного режима в ЖК–дисплее.

Следующим важным фактором, который оказывает сильное влияние на времена включения, задержки и выключения, является отношение толщины рабочей ЖК - ячейки к шагу спирали закрученной структуры ЖК ( $L/p_0$ ). Следует отметить, что влияние величины  $L/p_0$  на  $\tau_{on}$  и  $\tau_{off}$  для ЖК - дисплеев, использующих структуры ЖК с другими углами закрутки, достаточно подробно исследованы и показано, что для уменьшения времен включения и выключения индикатора необходимо, чтобы значение параметра  $L/p_0$  находилось на левом крае для данной зоны Гранжана. Для структуры с углом закрутки  $180^\circ$  в этом случае  $L/p_0 = 0.25$ , что и показали наши расчеты. Зависимость времени задержки оптического отклика от этого параметра ведет себя противоположным образом, то есть для получения максимального значения  $T_{mem}$  в нашем случае параметр  $L/p_0$  должен быть так же равен 0.25 (рис. 65). Таким образом, можно сделать вывод о существовании некоторого оптимального значения параметра  $L/p_0$  при котором одновременно

реализуются малые времена включения, выключения и максимальной оптической задержки. Конкретная величина этого параметра определяется требованиями, предъявляемыми к режиму управления реализуемому на данном типе ЖК – дисплея.

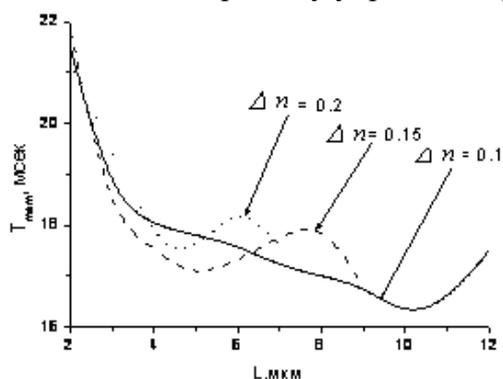


Рис. 64 Зависимость времени памяти от толщины ЖК-слоя для различных значений анизотропии показателя преломления ЖК

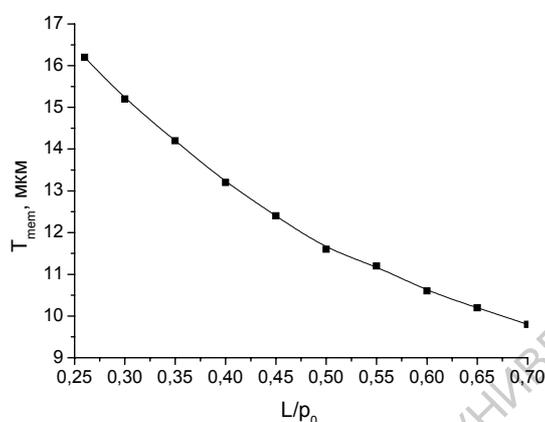


Рис. 65 Зависимость времени памяти от отношения толщины ЖК слоя (L) к шагу спирали ЖК ( $p_0$ )

Методом компьютерного моделирования проведено исследование динамики оптического отклика ЖК-индикатора при высоких управляющих напряжениях в зависимости от конструктивных параметров устройства. Показано, что при высоких управляющих напряжениях динамика оптического отклика при переключении управляющего напряжения из состояния «включено» в состояние «выключено» сильно зависит от угла закрутки ЖК - структуры. Установлено, что при высоких управляющих напряжениях у ЖК – дисплея, использующего эффект интерференции поляризованных лучей в ЖК - структуре с углом закрутки  $180^0$ , оптический отклик характеризуется временем задержки относительно деформационного отклика. С точки зрения оптического отклика эту временную задержку можно трактовать как кратковременную память. Выяснено влияние конструктивных параметров дисплея на величину кратковременной памяти. Установлено, что изменяя основные конструктивные параметры ЖК - дисплея (толщина, шаг спирали хиральной добавки) можно изменять не только времена реакции и релаксации такого устройства, но и влиять на величину времени памяти. На основе эффекта кратковременной памяти в ЖК – структуре с углом закрутки  $180^0$  предложен новый способ управления пассивным ЖК – дисплеем.

#### 4.2.3 Влияние параметров ЖК- вещества на время памяти экрана, работающего на основе эффекта двулучепреломления в ЖК -структуре с углом закрутки $180^0$

Существенное влияние на динамику переключения ЖК- дисплея из одного рабочего состояния в другое оказывает такой конструктивный параметр устройства, как угол предварительного наклона молекул ЖК на ориентирующих поверхностях  $\theta_0$ . Увеличение угла преднаклона при одном и том же значении управляющего напряжения

приводит к снижению времени реакции  $\tau_p$ , что объясняется уменьшением порогового значения перехода Фредерикса, и в свою очередь в соответствии с выражением (51) приводит к уменьшению времени реакции, которое можно переписать в следующем виде:

$$\tau_p \approx \varpi / (U_{\text{вкл}}^2 - U_{\text{выкл}}^2), \quad (55)$$

где  $\varpi$  - постоянная, зависящая от физических параметров ЖК и конструктивных параметров дисплея.

С другой стороны, время релаксации  $\tau_{рл}$  в соответствии с выражением (53) возрастает. Подобным образом ведет себя и зависимость времени памяти от угла преднаклона, которая монотонно возрастает с ростом  $\Theta_0$ . Однако, в пределах изменения  $\Theta_0$  от  $0^0$  до  $4^0$ , обеспечиваемых стандартной ориентационной технологией, время памяти не изменяется. Заметим, что в данном ЖК - дисплее углы преднаклона превышающие  $12^0$  использовать не практично в виду резкого ухудшения оптических характеристик устройства.

Рассмотрим влияние физических параметров ЖК на динамику переключения ЖК – дисплея с углом закрутки структуры  $180^0$  из одного состояния в другое. Величина диэлектрической анизотропии ЖК  $\Delta\varepsilon$ , влияет только на время реакции и не оказывает влияние на время релаксации. При этом обратная пропорциональность времени реакции диэлектрической анизотропии ( $\tau_p \cong 1/\Delta\varepsilon$ ) сохраняется во всем диапазоне изменения управляющих напряжений. Аналогично зависимость мы получили и для величины времени кратковременной памяти от диэлектрической анизотропии.

Далее необходимо выяснить влияние постоянных упругости ЖК на динамику переключения дисплея из одного состояния в другое. Следует отметить, что всегда на времена включения и выключения дисплея все три постоянные упругости ЖК ( $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{33}$ ) оказывают сильное влияние, поэтому на первом шаге мы выяснили, как при высоких управляющих напряжениях на времена реакции, релаксации и кратковременной памяти влияют абсолютные величины коэффициентов упругости. В этом случае расчет динамики оптического отклика проводился при постоянных отношениях коэффициентов упругости, а синхронно менялась их абсолютная величина. Как и для случая обычного мультиплексного управления при малых значениях напряжения времена реакции и релаксации убывают с ростом величины коэффициента упругости, что хорошо объясняется известной аналитической зависимостью. При этом подобное поведение показывает время памяти  $T_{\text{mem}}$ .

Более интересные функциональные зависимости проявляются для реальных случаев влияния комбинации всех трех постоянных упругости ЖК на динамику оптического отклика. Для высокоинформативных ЖК-дисплеев, использующих мультиплексную схему управления при малых управляющих напряжениях, основное влияние на времена реакции и релаксации оказывают отношения постоянных упругости ЖК  $k_{33}/k_{11}$  и  $k_{33}/k_{22}$ , поэтому за основу мы приняли этот подход. Как и в случае высокоинформативных ЖК-дисплеев с мультиплексным управлением, у данного индикатора, который использует эффект интерференции оптических мод в структуре ЖК с углом закрутки  $180^0$  при высоких управляющих напряжениях, увеличение как отношения  $k_{33}/k_{11}$ , так и отношения  $k_{33}/k_{22}$  приводит к увеличению времени реакции устройства  $\tau_p$ . Однако в зависимостях времени релаксации и кратковременной памяти для подобных ЖК-дисплеев от  $k_{33}/k_{11}$  и  $k_{33}/k_{22}$  поведение несколько иное. На рис. 66 показана динамика изменения среднего по спектру пропускания ЖК - индикатора из состояния «включено» в состояние «выключено» при различных отношениях постоянных упругости  $k_{33}/k_{11}$ . На этом рисунке обращает на себя внимание тот факт, что при увеличении отношения  $k_{33}/k_{11}$  зависимость пропускания индикатора от времени не изменяет своего наклона, почти параллельно сдвигается по оси времени вправо. Это говорит о том, что с изменением этого отношения время релаксации и время памяти ведут себя одинаково. Зависимость величины времени памяти такого индикатора от отношения постоянных

упругости  $k_{33}/k_{11}$  показана на рис. 67. Из этого рисунка видно, что как и в случае мультиплексного управления, увеличение отношения  $k_{33}/k_{11}$  приводит к росту времени релаксации устройства, однако отметим, что зависимость  $\tau_{релак} = F(k_{33}/k_{11})$  хорошо аппроксимируется параболой. Коэффициенты в параболическом представлении зависят от остальных физических постоянных ЖК и управляющего напряжения. Несколько иная ситуация при изменении параметра  $k_{33}/k_{22}$ .

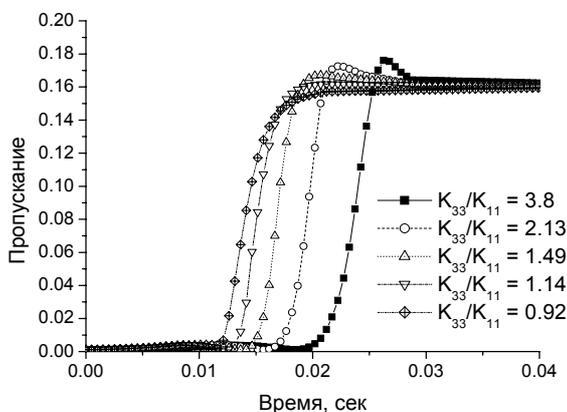


Рис. 66 Динамика оптического отклика ЖК-индикатора, работающего на эффекте интерференции поляризованных лучей в структуре с углом закрутки  $180^{\circ}$ , при переходе из состояния «включено» в состояние «выключено» для различных отношений постоянных упругости ЖК  $k_{33}/k_{11}$

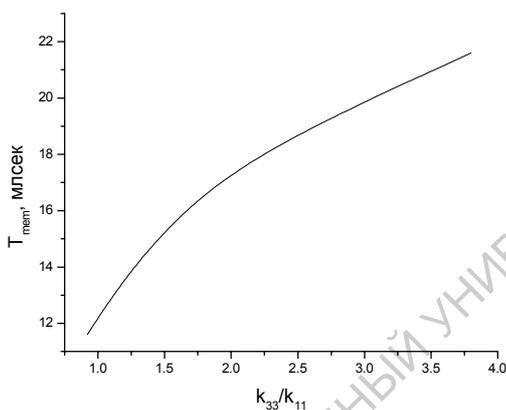


Рис. 67 Зависимость времени памяти от отношения постоянных упругости ЖК  $k_{33}/k_{11}$

На рис. 68 показаны зависимости пропускания ЖК-дисплея, который использует интерференцию оптических мод в структуре с закруткой  $180^{\circ}$  при высоких управляющих напряжениях, от времени, при выключении индикатора для различных значения отношения постоянных упругости  $k_{33}/k_{22}$ . Как видно из этого рисунка зависимость пропускания от времени имеет различный наклон, при чем время выключения для разных значений  $k_{33}/k_{22}$  отличается менее сильно, чем время памяти. Из этого можно сделать вывод, что зависимости времени выключения и времени памяти от отношения постоянных упругости  $k_{33}/k_{22}$  носит различный характер (рис. 69). Как видно из результатов расчетов, представленных на рис. 68 и 69, при очень высоком отношении постоянных упругости  $k_{33}/k_{22}$  время памяти становится сравнимым по своей величине со временем релаксации индикатора. Последнее обстоятельство говорит о том, что наличие эффекта кратковременной памяти в данном устройстве связано с особенностями оптического отклика при переориентации данной ЖК-структуры из состояния «включено» с высоким значением управляющего напряжения в состояние «выключено» при нулевом напряжении. То есть при снятии управляющего напряжения сначала происходит только изменение в углах наклона молекул ЖК по всей толщине ячейки, и только после некоторого момента начинают изменяться азимутальные углы ориентации молекул ЖК в ячейке. Таким образом, подбирая соотношение между постоянными упругости ЖК, можно изменять не только времена реакции и релаксации данного дисплея, уменьшая их до требуемых величин, но варьировать в некоторых пределах

величиной времени памяти ЖК- дисплея, работающего в режиме интерференции оптических мод в структуре с углом закрутки  $180^0$  при высоких значениях управляющего напряжения.

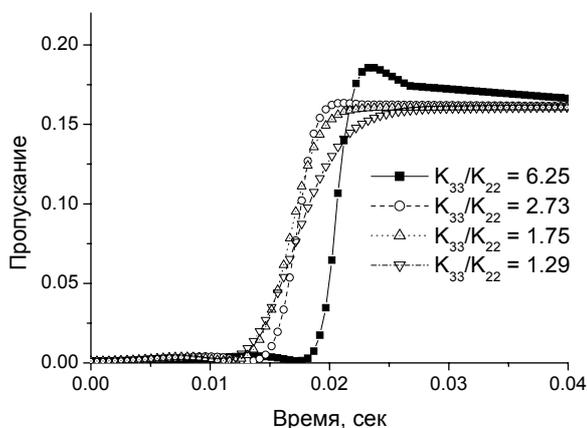


Рис. 68 Динамика оптического отклика ЖК-индикатора, работающего на эффекте интерференции поляризованных лучей в структуре с углом закрутки  $180^0$ , при переходе из состояния «включено» в состояние «выключено» для различных соотношений постоянных упругости ЖК  $k_{33}/k_{22}$

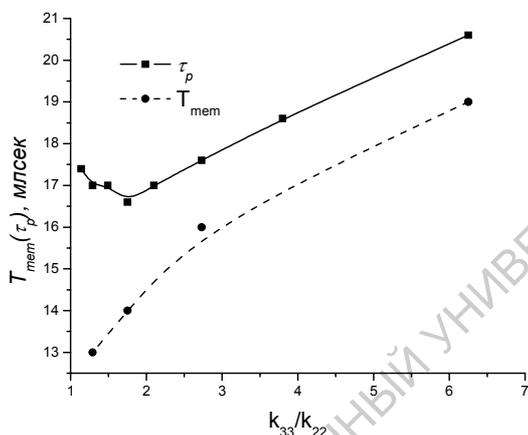


Рис.69 Зависимость времени релаксации и кратковременной памяти от отношения постоянных упругости ЖК  $k_{33}/k_{22}$

На времена реакции и релаксации, а, следовательно, и на время памяти, оказывают влияние одновременно все три постоянных упругости ЖК. Наши расчеты показали, что величина времени памяти такого ЖК – дисплея хорошо коррелирует с величиной напряжения порога деформации Фредерикса для данной ЖК- структуры. На рис. 70 показана зависимость времени памяти от значения напряжения порога Фредерикса для различных ЖК - веществ, данные для которых были взяты из каталога компании Merck. Отметим, что эта зависимость была получена при одном и том же управляющем напряжении в состоянии «включено» для различных ЖК – веществ и как видно из рис. 70, аналитически эту зависимость достаточно точно можно описать полиномом третьей степени

$$T_{mem} = a_0 + a_1 U_0 + a_2 U_0^2 + a_3 U_0^3 \quad (56)$$

Величина коэффициентов ( $a_i$ ) этого разложения зависят от величины управляющего напряжения для состояния «включено». Из этого можно сделать вывод, что требуемые времена выключения и время памяти такого ЖК – экрана можно выбирать, исходя из значения напряжения для деформационного порога перехода Фредерикса.

Методом компьютерного моделирования проведено исследование динамики оптического отклика ЖК–индикатора при высоких управляющих напряжениях в зависимости от конструктивных параметров устройства. Выяснено влияние конструктивных параметров дисплея на величину кратковременной памяти. Показано, что основными физическими параметрами, которые существенным образом влияют на

времена включения, выключения и памяти, являются отношения постоянных упругости ЖК  $k_{33}/k_{22}$  и  $k_{33}/k_{11}$ . Требуемые величины времен выключения и памяти для ЖК – экрана использующего интерференцию поляризованных лучей в ЖК – структуре с углом закрутки  $180^0$  можно выбирать, исходя из значений для напряжения деформационного порога Фредерикса.

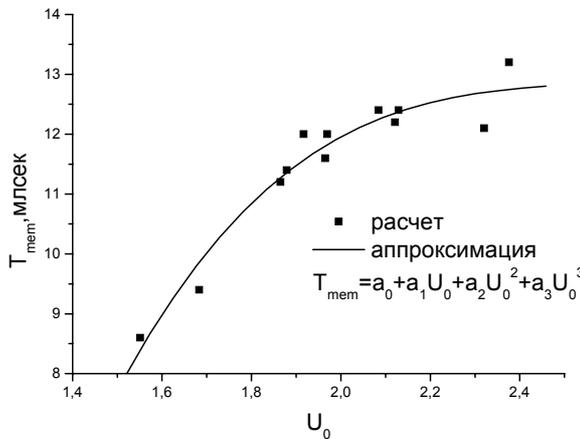


Рис. 70 Зависимость величины кратковременной памяти от значения напряжения порога деформации Фредерикса  $U_0$

#### 4.3 Быстродействие пассивных ЖК – устройств отображения информации с высоким уровнем мультиплексирования

Основной проблемой, которую приходится решать в пассивно – матричных устройствах отображения информации это получение одновременно высоких значений уровня мультиплексирования и достаточно малых времен срабатывания. Ранее методом компьютерного моделирования показано, что такие устройства при малых временах отклика имеют малые значения степени мультиплексирования. В предыдущем параграфе показано, что время реакции ЖК – индикатора связано с рабочими напряжениями простым аналитическим выражением (52), и уровень мультиплексирования (или крутизна вольт – контрастной кривой) также однозначно связан с этими же напряжениями в соответствии с формулой (49). Исходя из этих двух выражения для  $\tau_p$  и для  $S$  можно записать следующее простое выражение, которое дает однозначную связь между этими двумя характеристиками пассивного ЖК – индикатора в следующем виде:

$$S = \tau_p^2 \frac{(U_{вкл}^2 + U_{выкл}^2)^2}{\sigma}.$$

Учтем тот факт, что при высоких уровнях мультиплексирования

$$U_{вкл} \approx U_{выкл} \approx U_0 \quad (57)$$

где  $U_0$  – пороговое напряжение перехода Фредерикса.

Поэтому предыдущее выражение можно записать более просто:

$$\tau_p = \sigma_1 \frac{\sqrt{S}}{U_0^2}. \quad (58)$$

Отметим, что постоянная  $\sigma_1$  в выражении (57) зависит сложным образом не только от коэффициентов вязкости ЖК, диэлектрической анизотропии ЖК и постоянных упругости ЖК, но и от **оптической анизотропии** ЖК, так как эта формула дает однозначную связь между разрешением ЖК – экрана и временем **оптического** отклика устройства. Поэтому согласно этому выражению **крутизна вольт – контрастной** характеристики (или степень мультиплексирования) прямо пропорциональна квадрату времени реакции ЖК – устройства и четвертой степени порогового напряжения перехода Фредерикса. Аналогичное выражение, но связывающее время реакции упругой деформации ЖК – дисплея и степени мультиплексирования, было получено в 70 – х годах. Основываясь на этой простой формуле можно сделать однозначный вывод о том, что в пассивно – матричном ЖК - устройстве отображения информации принципиально невозможно

достичь одновременно высоких уровней мультиплексирования и малых времен реакции для таких индикаторов. Следует особо уделить внимание тому факту, что выражения (50) и (58) описывают зависимости времени реакции дисплея для **оптического** отклика, а не для деформационного отклика, для которого получены аналогичные выражения в приближении малых деформационных искажений. С точки зрения временных характеристик ЖК – дисплея важно не только не только время реакции, но и время релаксации ЖК – дисплея, так как время срабатывания  $\tau$  одного элемента изображения является суммой времени реакции и времени релаксации. Поэтому рассмотрим, как связано время релаксации  $\tau_{pl}$  с крутизной вольт – контрастной характеристики  $S$ . С этой целью используем выражения (49), (53) и условие (57). В результате несложных преобразований получаем следующее выражение:

$$\tau_{pl} = \mu_1 \frac{U_0^{2\alpha}}{S}, \quad (59)$$

где постоянные  $\mu_1$  и  $\alpha$  зависят от физических постоянных ЖК (включая оптическую анизотропию). Анализ выражений (58) и (59) показывает, что увеличение крутизны вольт – контрастной характеристики приводит к уменьшению времени релаксации и одновременно увеличивает время реакции оптического отклика ЖК – дисплея. Аналогичное влияние на эти времена оказывает значение порогового напряжения эффекта Фредерикса. Действительно, увеличение  $U_0$  приводит одновременно к уменьшению  $\tau_p$  и к увеличению  $\tau_{pl}$ . По этой причине найдем суммарное время оптического отклика ЖК – дисплея  $\tau$  при переключении управляющего напряжения от  $U_{выкл}$  до  $U_{вкл}$  и обратно, которое можно записать в виде

$$\tau = \tau_p + \tau_{pl} = \sigma_1 \frac{\sqrt{S}}{U_0^2} + \mu_1 \frac{U_0^{2\alpha}}{S}. \quad (60)$$

Из выражения (60) следует, что зависимость  $\tau = \tau(S)$  для конкретных физических параметров ЖК и ЖК – дисплея имеют минимум, что говорит о наличие оптимального значения крутизны вольт – контрастной, для которой суммарное время оптического отклика ЖК – дисплея минимально. Однако следует отметить тот факт, что минимум зависимости  $\tau = \tau(S)$  находится в области малых значений крутизны, а при высоких значениях  $S$  суммарное время оптического отклика будет практически совпадать со временем реакции. Заметим, что в зависимости  $\tau = \tau(U_0)$  так же существует оптимальное значение напряжения порогового напряжения эффекта Фредерикса, а это значит, что выбором ЖК - материала можно для одного и того же значения крутизны вольт – контрастной кривой достичь минимального значения суммарного времени оптического отклика.

Особый интерес представляет ЖК – экраны, в которых используется эффект интерференции поляризованных лучей в ЖК – структуре с углом закрутки равным  $180^\circ$ , так как только в этом случае наблюдается эффект временной задержки оптического отклика относительно деформационного  $T_{mem}$  при переключении рабочего напряжения из состояния «включено» в состояние «выключено». Поэтому суммарное время оптического отклика такого ЖК – дисплея будет иметь следующий вид:

$$\tau = \tau_p + \tau_{pl} + T_{mem}.$$

Таким образом, для этого устройства суммарное время оптического отклика больше, чем у других дисплеев, в которых используются другие ориентационные структуры ЖК. Поэтому стандартный матричный способ управления для этих ЖК – дисплеев малоприменим и для них в работе [130] предложен свой способ управления экраном. При этом в отличие от времени реакции и релаксации «время памяти», как показали наши результаты, является степенной функцией напряжения порога Фредерикса (см. формулу(53)).

#### 4.4 Быстродействие модуляторов, работающих на основе управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в ячейках малой толщины

Одним из самых распространенных ЖК устройств модуляции оптического излучения для 3D - приложений является ЖК затвор, состоящий из одной или двух одинаковых  $\pi$ - ячеек с взаимно перпендикулярным расположением молекул ЖК на смежных поверхностях и помещенных между двумя скрещенными поляризаторами. Такая конструкция позволяет получить за счет управления равные времена реакции и релаксации, величина которых определяется только временами реакции составляющих устройство ячеек. В этом случае используется эффект управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в планарных или закрученных структурах ЖК в ячейках с антисимметричной ориентацией молекул ЖК на граничных поверхностях. Менее распространенными является ЖК – затворы, выполненные стандартных TN – ячейках. Основным недостатком всех конструкций таких устройств является относительно большое время срабатывания ( $\approx 4$  мс), что ограничивает использование этих затворов в более быстродействующих модуляторах. Поэтому до сих пор актуальной задачей является поиск конструкции ЖК – затвора, которая бы имела быстродействие в субмиллисекундном диапазоне. Хотя в настоящее время известны несколько таких конструкций, однако в промышленном масштабе они не получили распространение. Настоящая статья посвящена поиску простой и одновременно обладающей повышенным быстродействием конструкции ЖК затвора. С этой целью нами выполнено компьютерное моделирование характеристик различных конструкций ЖК затвора для 3D - приложений и выяснены основные факторы, ограничивающие максимально достижимые значения контраста, пропускания, ахроматичности изображения и быстродействие этих устройств. Основное число работ в этой области посвящено рассмотрению ЖК – затворов на основе  $\pi$  -ячеек или TN – ячеек и достаточно малое число исследователей использует конструкцию на основе явления управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в различных планарных (с закруткой или без нее) структурах ЖК. Ниже приведены результаты теоретического исследования оптических и динамических характеристик различных ЖК устройств, которые основаны на эффекте интерференции поляризованных лучей управляемой электрическим полем в закрученных и незакрученных планарных структурах ЖК с симметричными граничными условиями.

Влияние физических параметров ЖК вещества на время отклика затвора хорошо описываются следующими аналитическими соотношениями

$$\tau_p \propto \gamma / \Delta \epsilon, \tau_{pl} \propto \gamma / k ,$$

где  $\gamma$  - коэффициент вязкости,  $k$  – средний коэффициент упругости ЖК вещества.

Поэтому для получения малых времен оптического отклика необходимо иметь ЖК вещество с малой вязкостью и большим значением диэлектрической анизотропии и коэффициентов упругости.

Основными конструктивными параметрами, которые существенным образом влияют на быстродействие ЖК затвора ( $\tau$ ) являются следующие: управляющие напряжения  $U_{выкл}$  и  $U_{вкл}$ , толщина ЖК зазора в ячейке  $L$  и угол закрутки структуры ЖК  $\Phi_T$ . ЖК затвор, как правило, работает при значениях  $U_{выкл}$  ниже порога Фредерикса, а величина  $U_{вкл}$  достигает десятков пороговых значений Фредерикса. Времена переключения между состояниями «выключено» и «включено» и в этом случае хорошо описываются известными аналитическими выражениями:

$$\tau_p \propto \frac{1}{(U_{вкл}^2 - U_{выкл}^2)}, \tau_{pl} \propto (U_{вкл} - U_{выкл})^\alpha ,$$

где значение коэффициента  $\alpha$  определяются физическими постоянными ЖК вещества. Поэтому, если значения управляющих напряжений одинаковы для различных ЖК структур, то время быстродействия должно зависеть только физических и конструктивных параметров ЖК затвора. Следовательно, если использовать в различных

конструкциях затвора одно и тоже ЖК вещество, то быстродействие этих устройств должно определяться только толщиной ЖК слоя  $L$  и его углом закрутки структуры ЖК  $\Phi_T$ .

Ранее было выяснено влияние угла закрутки  $\Phi_T$  на быстродействие ЖК устройства отображения информации при переключении управляющего напряжения из состояния с пропусканием соответствующему 90% ( $T_{90}$  и соответствующее управляющее напряжение  $U_{\text{выкл}} = U_{90}$ ) от пропускания при 0В в состояние с пропусканием соответствующему 10% ( $T_{10}$  и соответствующее управляющее напряжение  $U_{\text{вкл}} = U_{10}$ ) пропускания при 0 В (рис.71). При фиксации значений управляющих для состояний «включено» ( $U_{\text{он}} = 12\text{В}$ ) и «выключено» ( $U_{\text{выкл}} = 0\text{В}$ ) быстродействие ЖК затвора почти не зависит от угла закрутки структуры ЖК.

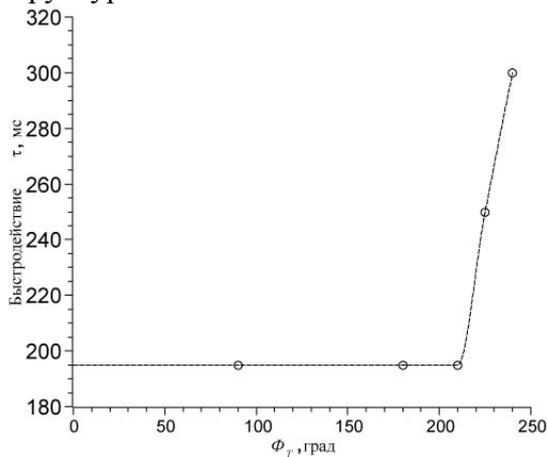


Рис.71 Качественная зависимость времени отклика ЖК затвора угла  $\Phi_T$  закрутки ЖК структуры при переключении управляющего напряжения из  $U_{90}$  в  $U_{10}$  и обратно.

Таким образом, основным конструктивным параметром ЖК затвора, который существенным образом влияет на времена включения  $\tau_p$  и выключения  $\tau_{pl}$ , является толщина ЖК слоя  $L$ . В соответствии с известными аналитическими зависимостями  $\tau_p$  и  $\tau_{pl}$  возрастают с ростом толщины  $L$

$$\tau_p, \tau_{pl} \propto G \cdot L^2,$$

где  $G$  – постоянная, которая для заданной величины управляющего напряжения зависит только от физических постоянных ЖК вещества.

В силу этого ЖК затвор с микронной толщиной ЖК слоя при прочих равных условиях быстрее устройства с  $\sigma$ -микронной толщиной ЖК слоя в  $\sigma^2$  раз. Поэтому затвор на основе управляемого электрическим полем двойным лучепреломлением в планарной ячейке с углом закрутки структуры  $0^\circ$  быстрее любого другого затвора, работающего на основе этого же эффекта, но в ЖК ячейке с большим углом закрутки структуры ЖК. При этом быстродействие такого затвора будет  $\sigma^2$  раз меньше ( $\sigma = L_\phi/L_0$ , где  $L_\phi$  – толщина ЖК ячейки с углом закрутки  $\Phi_T \neq 0^\circ$ ,  $L_0$  – толщина планарной ячейки с нулевым углом закрутки структур ЖК). С этой точки зрения быстродействующий ЖК затвор, работающий на основе  $\pi$ -ячейки с  $\Phi_T = 180^\circ$  и имеющий оптимальные оптические характеристики при  $\Delta n \cdot L \approx 0.5$  мкм, будет медленнее ЖК затвора, работающего на основе эффекта управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в обычной планарной ячейке с  $\Phi_T = 0^\circ$  примерно в 6.25 раз, так как для последней оптимальное значение  $\Delta n \cdot L \approx 0.2$  мкм. Кроме этого если рассматривать «классическую» одинарную  $\pi$ -ячейку, то она будет хуже стандартной планарной ячейки не только по оптическим характеристикам, но и по быстродействию, так как ее оптимальное значение  $\Delta n \cdot L$  больше чем у первой. Заметим, что недавно был представлен быстродействующий затвор на базе структуры с углом закрутки  $270^\circ$ , который имеет быстродействие  $\approx 2$  мс при этом у него оптимальное значение  $\Delta n \cdot L \approx 0.6$  мкм. Конструкция ЖК затвора на основе эффекта управляемого электрическим полем двойного лучепреломления в обычной планарной ячейке с  $\Phi_T = 0^\circ$  имеет, как отмечалось выше, оптимальное значение  $\Delta n \cdot L \approx 0.2$  мкм.

Учитывая, что все физические и конструктивные (кроме толщины ЖК ячейки и угла закрутки структуры одинаковы) параметры затвора у всех конструкций одинаковы, следует ожидать быстроедействие этого устройства на уровне 220 – 230 мкс.

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО

## Рекомендуемая литература

### Учебные пособия и монографии

1. Сухариер А.С. Ждкокристаллические индикаторы. М.: Радио и связь. 1991. - 258 с
2. Chigrinov V.G. Liquid crystal devices. Physics and applications// Artech House. Boston-London. 1999. 359 p.
3. Blinov L.M., Chigrinov V.G. Electro - Optic Effects in Liquid Crystal Materials Springer - Verlag 1994
4. Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах М.: Наука, 1981
5. Азам Р., Башара Н. Эллипсомерия и поляризованный свет М.: Мир, 1983
6. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир. 1987. 616 с.
7. Дисплеи: Пер. с англ./ Под ред. Ж. Панкова. – М.: Мир, 1982. 320 с.
8. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1974. 400 с.
9. Сонин А.С. Введение в физику жидких кристаллов. М.: Наука, 1983. 320 с.
10. Беляков В.А., Сонин А.С. Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука, 1982. 360с.
11. Lueder E. Liquid Crystal Displays: Addressing Schemes and Electro-Optical Effects. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 516p.
12. Deng-Ke Fundamentals of Liquid Crystal Devices / Deng-Ke, Yang Shin-Tson Wu – Chichester: John Wiley & Sons, 2014. - 592 p.
13. TN Panel Information <http://www.tnpanel.com/>
14. Калитиевский Н.И. Волновая оптика. М.: Наука, 1971. 376с.
15. Гуревич М.М. Цвет и его измерение. // М.: Из – во АН СССР, 1950. 268с.
16. Шашлов А.Б., Уварова Р.М., Чуркин А.В. Основы светотехники: Учебник для вузов М.: Из – во МГУП, 2002. 280 с.
17. Артюшин Л. Ф. Основы воспроизведения цвета в фотографии, кино и полиграфии. М. : Искусство, 1970. 548с.
18. Ivashchenko, A. V. Dichroic Dyes for Liquid Crystal Displays / A.V. Ivashchenko - Boca Raton: CRC Press, 1994. - 236 p.

### Оригинальные статьи

1. Мухин И. А. Развитие жидкокристаллических мониторов // Телевидение и радиовещание: 1 часть — 2005. № 2(46) С. 55-56; 2 часть — 2005. № 4(48). С. 71-73
2. Матешев И., Туркин А. Обзор современных технологий производства ЖК-матриц // Современная электроника. 2014. № 8. С. 16 – 19.
3. Пахомов С. Современные ЖК-мониторы. КомпьютерПресс. 2004. № 12. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://compress.ru/article.aspx?id=12688>.
4. Вялков Д. Сравнение типов матриц ЖК (LCD-, TFT-) мониторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pc-someworld.ru/hardware/235/sravnenie-tipov-matric-zhk-lcd-tft-monitorov/>
5. Berreman D.W. Numerical Modelling of Twisted Nematic Devices //Phil. Trans. R. Soc. 1983. V. A309. P. 203
6. Berreman D. W. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4-matrix formulation // J. Opt. Soc. Am. 1972. V. 62. P.502-510.
7. Van Doorn G.Z. Dynamic behavior of twisted nematic liquid crystal layers in switched fields // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. No 9. P.3738
8. Deuling H.J. Deformation pattern of twisted nematic liquid crystal laeyers in an electric field // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1974. V. 27. P.81
9. Becker M. E.; Nehring J.; Scheffer T.J. Theory of twisted nematic layers with weak boundary coupling // J. Appli. Phys. 1985. V. 57. № 10. pp.4539-4542

10. Цой В.И. Методика расчета оптических свойств жидкокристаллических индикаторов, работающих на основе двулучепреломления закрученных структур // Тез. Докл. 5-й конф. Социалистических стран по жидким кристаллам, Одесса, 10 – 15 октября 1983 г., 1983. – Т. 1. – Ч.2. – С. 84.
11. Wohler G., Haas H., Fritsch M. et all Faster  $4 \times 4$  matrix method for uniaxial inhomogeneous media // J. Opt. Soc. Amer. 1988. V. A5. No 9. P.1554 - 1557
12. Палто С.П. Алгоритм решения оптической задачи для слоистых анизотропных // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. № 4. С. 638 – 684.
13. Яковлев Д.А. Метод расчета матриц Мюллера отражения и пропускания квазимонохроматического света планарной структурой состоящей из «тонких» и «толстых» слоев // Опт. и спектр. 1988. Т.64. №3. С. 51 - 60
14. Lien A. J. The general and simplified Jones matrix representations for the high pretilt twisted nematic cell // Appl. Phys. 1990. V. 67. No 6. P 2853
15. Gharadjedaghi F. Computer simulation of a nematic guest – host display // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. No 9. P.4989
16. Ong Hiap Liew Elimination of Fabry-Perot effect in  $4 \times 4$  propagation matrix method and its application to liquid crystal displays // Jap. J. Appl. Phys. Pt.1 1994. V. 33. № 2. P.1085 - 1087
17. Яковлев Д. А. Эффективный метод расчета поляризационно – оптических свойств нематических слоев с одномерной деформацией поля директора // Опт. и спектр. 1991. Т. 71. № 5. С. 788.
18. Сухариер А.С., Линькова И.С., Цой В.И., Симоненко Г.В. Особенности параметров быстродействия и их зависимость от параметров ЖК и ЖК – структуры в ЖК – ячейках на супертвисте // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1991. Вып. 4(135). С. 59 – 64
19. Chigrinov V., Hoi Sing Kwok, Yakovlev D., Simonenko G.V., Tsoi V. LCD optimization and modeling // J. Soc. Inf. Display, 2004, Vol. 12. P. 183-187
20. Финкель А.Г., Цой В.И., Симоненко Г.В., Яковлев Д.А. Проектирование ЖК – устройств отображения информации // Электронная промышленность 2000. № 2. С. 11 – 16
21. Сухариер А.С., Линькова И.С., Цой В.И., Симоненко Г.В. Особенности параметров быстродействия и их зависимость от параметров ЖК и ЖК – структуры в ЖК – ячейках на супертвисте // Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1991. Вып. 4(135). С. 59 – 64
22. Сухариер А.С., Линькова И.С., Цой В.И., Симоненко Г.В. Особенности динамических характеристик ЖК-ячеек на STN - структуре // Эл. тех. Сер. 4 1992. В. 4. С. 9 - 11.
23. Симоненко Г.В., Татаринов С.И., Финкель А.Г., Яковлев Д.А. Электрооптические характеристики жидкокристаллических индикаторов, работающих на основе эффекта «гость - хозяин» // Эл. техн. Сер.4. 1988. В.1. С.43-47.
24. Симоненко Г.В., Яковлев Д.А., Цой В.И., Финкель А.Г., Мельникова Г.И. Моделирование жидкокристаллических индикаторов на основе матриц когерентности и Джонса // Эл. техн. Сер.4. 1988. В.2. С.36-41.
25. Г.В. Симоненко, В.И. Цой, Д.А. Яковлев Метод вычисления углов ориентации оптической оси жидкого кристалла, находящегося во внешнем электрическом поле // Компьютерная оптика, 2001. Вып. 21. С. 88 – 99
26. Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Tsoi V.I., Chigrinov V.G., Khokhlov N.A., Podjachev Yu.V Computer modeling of liquid crystal electrooptics by universal system (MOUSE – LCD) // SPIE. 1994. Vol. 2372. P.312 – 316
27. Яковлев Д.А., Симоненко Г.В., Цой В.И. и др. Универсальный комплекс ЭВМ программ для оптимизации проектирования жидкокристаллических дисплеев //

- Информат. Сер. Средства отображения информации /ВНИИ межотрасл. инф. 1993. No 2. С. 90.
28. Chigrinov V.G., Simonenko G.V., Yakovlev D.A., Podjachev Yu.B The optimization of LCD electrooptical behavior using MOUSE – LCD software// Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2000. Vol. 351. P. 17 – 25
  29. Yakovlev D.A., Tsoy V.I., Chigrinov V.G. Advanced Tools for Modeling of 2D – Optics for LCDs // SID Digest. 2005. P. 59 – 61.
  30. Chigrinov V.G., Yakovlev D.A. Optimization and Modeling of Liquid Crystal Displays // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2006. Vol. 453. P. 107 - 121
  31. DIMOS, Autotronic-Melchers GmbH, 2005
  32. Chigrinov V., Hoi Sing Kwok, Yakovlev D., Tsoi V., Simonenko G. LCD Optimization and Modeling // SID Symposium Digest. 2004. Vol. 35. P. 982
  33. Montgomery P. J. Optical properties of a liquid crystal image transducer at normal incident: State on // J. Opt. Soc. Amer. 1980. V. 70. No 3. P. 287 - 300
  34. Сардыко В.И. Матричное преобразование плоских волн в однородных анизотропных средах // Оптика и спектр. 1984. Т. 56. № 2. С. 303 - 309
  35. Симоненко Г.В. Моделирование электрооптических эффектов в жидких кристаллах // Проблемы оптической физики. Из - во СГУ. Саратов. 1997. С. 91 – 96