

Симдянкин Иван Владимирович

**ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ В
ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Специальность 01.04.07 –
«Физика конденсированного состояния»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в лаборатории жидких кристаллов Института кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук».

Научный руководитель: **Уманский Борис Александрович**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории жидких кристаллов ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН

Официальные оппоненты: **Пасечник Сергей Вениаминович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой биобибернетических систем и технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет"

Казначеев Анатолий Викторович,

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физической химии полимеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита диссертации состоится «___» _____ 20__ г. в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.114.01 при ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН по адресу: 119333, г. Москва, Ленинский пр. 59, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН по адресу <http://www.kif.ras.ru>.

Автореферат разослан: «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.114.01
кандидат физико-математических наук

К.В. Фролов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. История жидких кристаллов (ЖК) началась с австрийского ученого Рейнитцера [1], который в 1888 году первым наблюдал фазовые переходы холестерилбензоата. Он обнаружил, что это вещество в некотором температурном диапазоне обладает свойствами кристаллов и жидкостей (анизотропия оптических свойств, текучесть) [2]. На том раннем этапе наука о жидких кристаллах двигалась вперед силами немногочисленных исследователей. Важными достижениями в первой половине прошлого столетия стали создание теории жидких кристаллов Озееном (С. W. Oseen) [3], а также экспериментальное открытие В. К. Фредериксом эффекта переориентации молекул ЖК под воздействием внешнего магнитного поля [4]. Интенсивное изучение жидких кристаллов, особенно их оптических и электрооптических свойств, благодаря открывшимся перспективам их применения для оптического отображения информации, началось в 70-е годы XX столетия и продолжается до настоящего времени. Возможности изменения коэффициента пропускания света за счет таких электрооптических эффектов как динамическое рассеяние света (ДРС), эффект гость-хозяин и твист-эффект [5] легли в основу первых жидкокристаллических устройств отображения информации.

Сегодня ЖК-дисплеи (ЖКД) относятся к наиболее распространенным устройствам отображения информации. Мировые тенденции развития дисплейных технологий направлены на существенное повышение их быстродействия, что связано, в свою очередь, с уменьшением времени электрооптического отклика. В частности, быстрое электрооптическое переключение ЖК в используемых эффектах является ключевым требованием для ЖКД, в которых применяется технология последовательного отображения цветов, стереоскопических (3D), голографических дисплеев и т.д. Это открывает широкие возможности для улучшения энергоэффективности, увеличения разрешения и расширения цветовой гаммы информационных дисплеев.

Характерные времена электрооптического отклика современных ЖКД составляют несколько миллисекунд. Оценки показывают, что при частоте кадров 240 Гц, которая принята в качестве нового стандарта для 3D-дисплеев, существенного ухудшения качества изображения можно избежать лишь при субмиллисекундных временах переключения. Это обуславливает необходимость поиска новых жидкокристаллических материалов и электрооптических эффектов,

обеспечивающих столь короткие времена. Таким образом, тематика, выбранная для данной диссертационной работы, и её актуальность как раз и лежат в русле современных требований, предъявляемых к быстродействующим модуляторам света.

Цели и задачи работы. Диссертационная работа посвящена исследованию оптических и электрооптических свойств жидких кристаллов в пространственно-периодических полях, создаваемых при помощи систем встречно-штыревых электродов (ВШЭ). Особенное внимание уделено изучению динамики электрооптического переключения ЖК в пространственно-периодических полях в зависимости от распределения электрического поля, надмолекулярной структуры и знака диэлектрической анизотропии ЖК.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- Экспериментальное исследование и моделирование режимов электрооптического переключения в нематических ЖК с положительной анизотропией при уменьшении периода ВШЭ и толщины слоя ЖК.
- Изучение динамики переключения гомеотропно-ориентированного нематического ЖК с положительной диэлектрической анизотропией, в условиях управления направлением электрического поля в слое ЖК, с использованием двух пар ВШЭ, расположенных на противоположных подложках ЖК-ячейки.
- Экспериментальное исследование и моделирование электрооптики гомеотропно-ориентированных нематических ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией в геометрии ЖК-ячейки с ВШЭ на одной из её подложек.
- Изучение эффекта возникновения и спектрального расщепления зон селективного отражения высших порядков в хиральных жидких кристаллах (ХЖК) при изменении направления распространения света по отношению к оси геликоида ХЖК.
- Изучение эффекта генерации и спектрального расщепления зон селективного отражения высших порядков в планарно-ориентированных слоях ХЖК при приложении пространственно периодических электрических полей перпендикулярно оси спирали геликоида ХЖК.
- Экспериментальное исследование электрооптического эффекта в планарно-ориентированных ХЖК с шагом геликоида, превышающим длину

волны зондирующего излучения, в электрическом поле, перпендикулярном оси геликоида ХЖК.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

1. Впервые обнаружена и подробно исследована быстрая поверхностная мода в электрооптическом отклике нематических ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. Этот эффект наблюдается при гомеотропных граничных условиях в пространственно периодических электрических полях, создаваемых ВШЭ, когда толщина ЖК слоя превышает период встречно-штыревых электродов.

2. Экспериментально получены субмиллисекундные времена переключения нематического ЖК с положительной диэлектрической анизотропией и изучены оптимальные условия их реализации.

3. В условиях, когда пространственный период деформации поля директора не превышает толщины ЖК слоя, впервые обнаружены две быстрые оптически различимые моды при переключении нематического жидкого кристалла с отрицательной диэлектрической анизотропией.

4. Впервые в ХЖК индуцированы структурированные полосы высших порядков селективного отражения света в неоднородном пространственно-периодическом электрическом поле, создаваемом с помощью ВШЭ.

Практическая ценность:

- Исследованные в данной работе электрооптические эффекты в пространственно-периодических электрических полях, как в гомеотропно-ориентированных нематических ЖК, так и в планарно-ориентированных хиральных ЖК, характеризуются повышенным быстродействием. Разработка электрооптических ЖК устройств на их основе открывает новые возможности для существенного увеличения скорости модуляции светового потока и, как следствие, повышения энергетической эффективности и разрешения ЖК устройств. Это может быть достигнуто, например, с использованием последовательного отображения цветового контента отображаемой информации.

- Смещение полос селективного отражения света в планарно-ориентированном слое ХЖК при изменении угла падения света, а также индуцирование полос высших порядков селективного отражения света под

воздействием электрического поля, могут найти применение при создании управляемых узкополосных фильтров светового потока в видимом, ближнем ИК и УФ диапазонах длин волн.

Положения, выносимые на защиту.

1. При воздействии электрического поля на гомеотропно-ориентированные слои нематического ЖК с положительной диэлектрической анизотропией при уменьшении периода пространственно-периодического электрического поля возникает периодическая локализация деформации директора в тонком приповерхностном слое ЖК. В результате, электрооптический отклик ЖК ячейки проявляется в виде двух мод, быстрой и медленной мод, с существенным отличием их времен релаксации. При этом полное время переключения для быстрой моды достигает 300 мкс.

2. В электрооптическом эффекте в гомеотропно-ориентированном слое ЖК, управляемом в режиме переключения направления пространственно-периодического электрического поля, исключается медленная стадия свободной релаксации директора нематического ЖК. При этом полное время электрооптического переключения сокращается в десятки раз и достигает сотни микросекунд.

3. В тонких гомеотропно ориентированных слоях нематического ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией в пространственно-периодическом поле реализуется быстрый электрооптический режим переключения, обусловленный локализацией деформации директора вследствие образования линий дисклинаций и доменных стенок.

4. При воздействии импульсного пространственно-периодического поля, направленного перпендикулярно оси геликоида планарно-ориентированного хирального нематического ЖК возникают спектрально-структурированные полосы высших порядков селективного отражения света.

5. Основной вклад в электрооптический отклик планарно-ориентированного хирального нематического ЖК при воздействии импульсного пространственно-периодического поля, направленного перпендикулярно оси геликоида, обусловлен взаимодействием электрического поля с диэлектрической анизотропией ЖК.

Степень достоверности и апробация работы. Результаты, изложенные в диссертации, прошли широкую апробацию. Они докладывались на 26-й Международной конференции по жидким кристаллам (ILCC 2016, Кент, США), на 1-ом Российском кристаллографическом конгрессе (РКК 2016, Москва, Россия), на 14-ой Европейской конференции по жидким кристаллам (ECLC 2017, Москва, Россия), на 22-ой Конференции по жидким кристаллам (CLC 2018, Ястребиная Гора, Польша), на 15-ой Европейской конференции по жидким кристаллам (ECLC 2019, Вроцлав, Польша), на конференциях «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, наноэлектронных приборов и экологичных технологий» (МГОУ, Москва, 2017, 2018, 2019). Работа была представлена на конкурсах научных работ ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, а также на семинарах лаборатории жидких кристаллов.

Публикации и личный вклад автора. По материалам диссертации опубликованы 6 печатных работ в отечественных и международных научных журналах, входящих в рекомендованный список ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 6 статей попали в базы данных Scopus и Сеть науки, сделаны 11 докладов на международных и российских научных конференциях.

Личный вклад автора заключается в непосредственном проведении экспериментальной работы, включая приготовление и измерение параметров ЖК композиций, создание и модификация экспериментальных установок, изготовление ЖК-ячеек, проведение экспериментальных измерений, обработка экспериментальных данных и численное моделирование. Автор активно участвовал в анализе и обобщении полученных результатов, построении научных выводов, а так же в подготовке публикаций в научных журналах и докладов на отечественных и международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы. В диссертации 134 страницы, 73 рисунка, 8 таблиц. Список литературы содержит 108 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко описана структура работы.

Первая глава представляет собой обзор литературы по электрооптическим режимам переключения ЖК и существующим вариантам повышения их быстродействия.

Вторая глава включает в себя пять разделов.

В первом разделе описаны способы приготовления жидкокристаллических материалов различного типа: нематических (НЖК), хиральных нематических (ХЖК) и хиральных смектических (СЖК). Приводится список ЖК материалов с их основными параметрами.

Во втором разделе главы описаны методы измерения параметров жидких кристаллов, включая их диэлектрические, оптические и вязкоупругие свойства.

В третьем разделе описаны конструкции ЖК ячеек, которые использовались в данной работе. Были изготовлены ячейки с плоскими стеклами, со стеклами в виде прямоугольных призм, с электродами и без электродов. Электроды наносились на внутренние поверхности стекол, и были прозрачные, либо непрозрачные, сплошные либо встречно-штыревые.

В четвертом разделе описана аппаратура и экспериментальные методики. Были созданы следующие экспериментальные измерительные установки: 1) для измерения угловых зависимостей спектров пропускания; 2) для определения коэффициентов упругости; 3) установка для исследования электрооптических эффектов на основе поляризационного микроскопа.

Пятый раздел посвящен описанию принципов численного моделирования электрооптических эффектов с помощью программы *LCD TDK* [6].

Третья глава включает в себя три раздела и посвящена исследованию переключения нематических ЖК.

В первом разделе главы описаны экспериментально обнаруженные поверхностная и объемная моды электрооптического переключения нематического ЖК в ячейках с одной (рис. 1) и двумя системами ВШЭ (рис. 3).

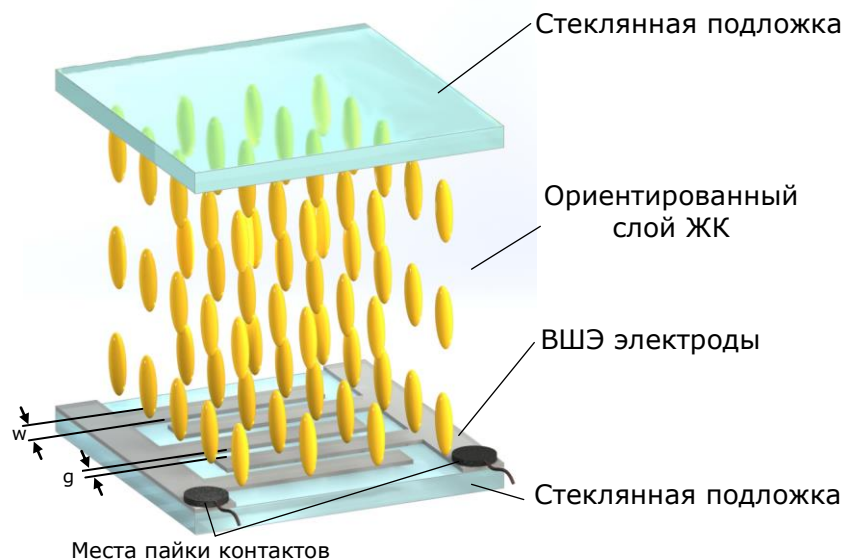


Рисунок 1 – Схематическое изображение жидкокристаллической ячейки с одной системой ВШЭ. Здесь w – ширина электрода, g – зазор между электродами.

Ранее в работе [7] посредством численного моделирования показано, что в ячейке с гомеотропно-ориентированным нематическим ЖК и ВШЭ в электрооптическом отклике возможно проявление двух мод, которые условно можно назвать поверхностной и объемной. В этой главе экспериментально доказано, что при малых периодах ВШЭ ($p < 3$ мкм), соизмеримых с толщиной слоя ЖК, эти моды действительно наблюдаются. Поверхностная мода (рис. 2, уровень 1) связана с особенностями пространственного распределения электрического поля и директора ЖК вблизи поверхности электродов. В условиях пространственно-периодического электрического поля на половине периода электродных структур возникают участки, в которых сохраняется гомеотропная ориентация ЖК. Справа и слева от этих направлений ориентация директора отклоняется от гомеотропной на значительные углы, что приводит в итоге к планарной ориентации. Таким образом, участки с гомеотропной ориентацией играют роль доменной стенки, разделяющей различные ориентационные состояния. Эти стенки удваивают пространственную частоту упругой деформации, и, в случае малого пространственного периода, обеспечивают очень быстрые времена включения и релаксации директора. Медленная мода (рис. 2, уровень 2) вызвана распространением деформации в объеме ЖК с одновременным разрушением гомеотропной стенки. Время релаксации в этом случае зависит от глубины проникновения деформации, которая может регулироваться длительностью импульса и толщиной самого слоя ЖК.

При одинаковых значениях амплитуды электрического напряжения ~ 10 В, скорость переключения поверхностной моды на порядок выше, чем объемной моды. Для поверхностного режима достигнуто рекордное для нематических ЖК полное время переключения, которое составило 300 мкс (рис. 2). В то время как для объемной моды суммарное время переключения превышает 3 мс.

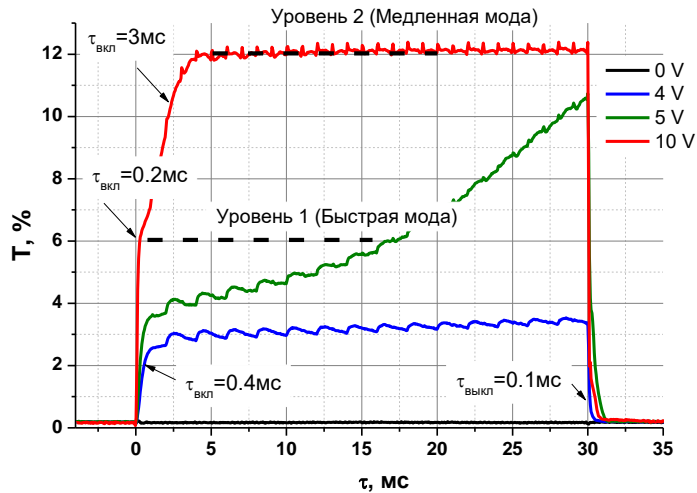


Рисунок 2 – Электрооптический отклик ЖК ячейки ($w=g=0.9$ мкм) с ЖК смесью ($\Delta n=0.12$, $\Delta \varepsilon=+4.5$, $d_{\text{ЖК}}=2$ мкм) при различных значениях амплитуды управляющего электрического напряжения

Во *втором разделе* главы описан метод, позволяющий переключаться между темным и светлым состояниями путем переключения направления электрического поля, перпендикулярно плоскости ячейки (“нормальное” поле $U_{\text{н}}$) и вдоль плоскости ячейки (“планарное” поле $U_{\text{п}}$). Суть метода состоит в том, что как для включения ($U_{\text{п}}$), так и для выключения ($U_{\text{н}}$) оптического состояния используется электрическое поле. В основе лежит использование четырехэлектродной схемы, в которой две системы ВШЭ расположены по обе стороны ЖК слоя (рис. 3).

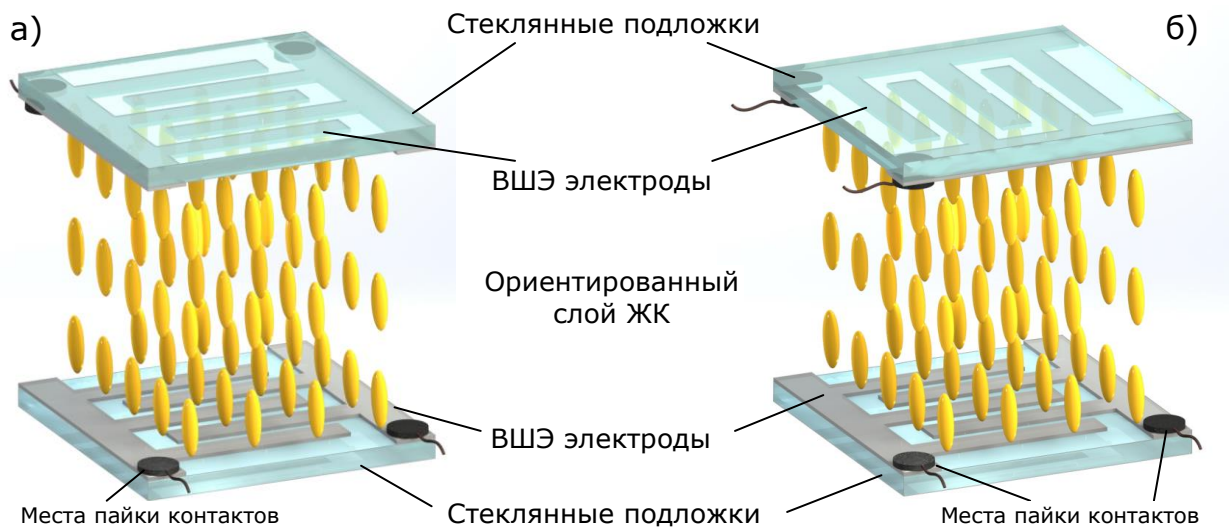


Рисунок 3 – Схема совмещения электродов в ЖК ячейках с параллельными (а) скрещенными (б) системами.

Поскольку электрическое поле используется как для включения, так и для выключения светлого состояния (свет проходит через слой ЖК), то скорость переключения в данной электрооптической ячейке значительно выше по сравнению с ЖК модуляторами, работающими в традиционных режимах, где исходная ориентация восстанавливается в результате свободной релаксации поля директора ЖК (рис. 4).

В данном разделе приведены результаты измерений скоростей переключения ЖК в зависимости от параметров электродов и толщин слоев ЖК для двух геометрий взаимной ориентации ВШЭ на двух подложках – параллельно и перпендикулярно друг другу (рис. 3 а, б).

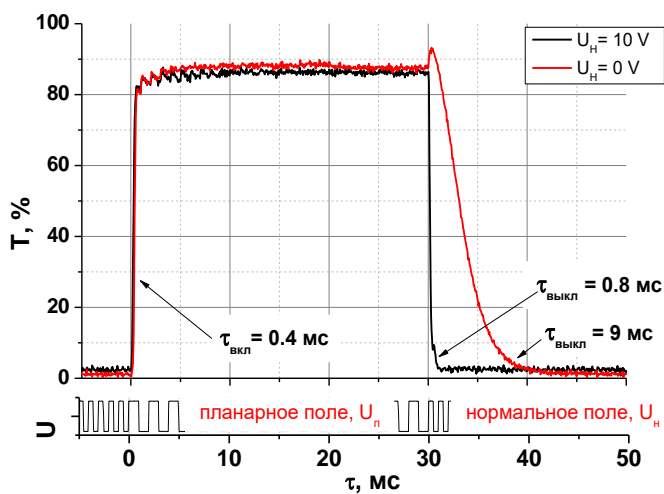


Рисунок 4 – Осциллограммы электрооптического отклика для ячейки с периодом ВШЭ $p=6$ мкм ($w=2$ мкм, $g=4$ мкм) при использовании дополнительного электрического поля на стадии выключения светлого состояния (электрическое напряжение $U_H = 10$ В) и в режиме свободной релаксации ЖК (при $U_H = 0$ В).

В *третьем разделе* приводятся результаты исследования электрооптического эффекта в гомеотропно-ориентированном ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией ($\Delta n = 0.09$ $\Delta \epsilon = -4.2$). ЖК переориентируется пространственно-периодическим электрическим полем, создаваемым с помощью ВШЭ (рис. 1). Были обнаружены две электрооптические моды, которые характеризуются различными временами переключения. Каждая из мод становится оптически различимой при определенных ориентациях осей пропускания скрещенных поляризаторов: 1 – ось пропускания поляризатора параллельна волновому вектору решетки ВШЭ G (геометрия P_0), 2 – ось пропускания поляризатора ориентирована под углом 45° к G (геометрия P_{45}), (рис. 5).

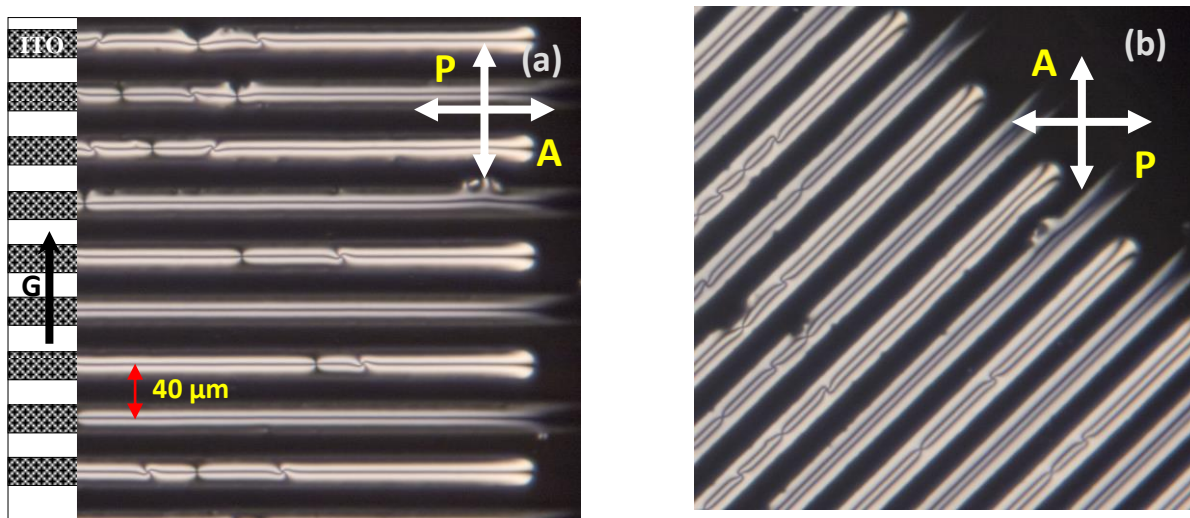


Рисунок 5 – Микрофотографии ЖК ячейки в поляризованном свете в геометрии P_0 (а) и P_{45} (б). Толщина слоя ЖК $d=3.7$ мкм. Параметры ВШЭ: период $p=40$ мкм, ширина электрода $w=20$ мкм. Амплитуда управляющего напряжения $U_0=40$ В. Здесь P и A – оси пропускания поляризатора и анализатора, соответственно. На фотографии (а) слева схематично показано расположение полупрозрачных ITO электродов.

В случае, когда период электродов сопоставим или меньше толщины слоя ЖК, в электрооптическом отклике проявляются две быстрых оптически различимых электрооптических моды. Эта моды обусловлены локализацией деформации поля директора между двумя топологическими стенками: e -стенкой (electrode wall) и g -стенкой (gap wall), расположенными периодически на половине периода решетки электродов (рис. 6). Директор ЖК ориентируется планарно внутри e -стенки практически по всей толщине слоя. Эта стенка разделяет ориентации директора в плоскостях xu и uz , отличающиеся направлением наклона молекул. Именно поэтому, в геометрии P_{45} наблюдается светлое состояние в области e -стенки, которая сменяется на темное в геометрии P_0 . Наличие угла наклона директора делает возможным наблюдение электрооптического отклика в геометрии P_0 . В отличие от e -стенки, в g -стенке сохраняется гомеотропная ориентация директора. Эта стенка расположена в межэлектродном пространстве, она разделяет ориентационные состояния с отклонением директора в разные стороны в плоскостях xz и uz . G - и e -стенки характерны для ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией и устойчивы в электрическом поле. Время переключения для быстрых мод может быть меньше одной миллисекунды, поэтому этот режим перспективен для быстродействующих ЖК модуляторов света.

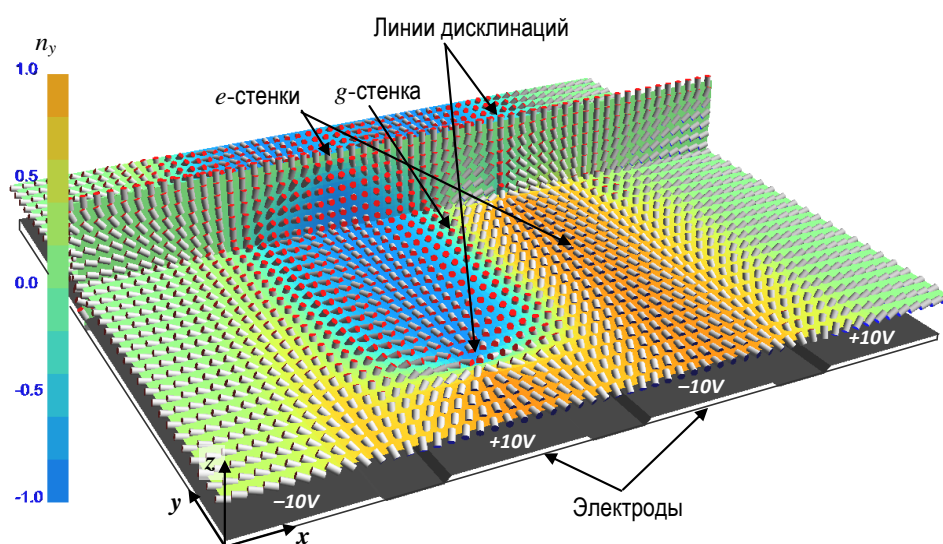


Рисунок 6 – Рассчитанное распределение директора в электрическом поле для пространственного домена, включающего четыре полосы электродов. Ширина электродов $w=2$ мкм и расстояние между ними $g=1$ мкм. Толщина слоя ЖК составляет 2 мкм. Цвет обозначает y -компоненту директора ЖК. Поскольку рассчитанная пространственная область включает в себя всего 4 электрода, для исключения краевых эффектов, рассматривается только ее центральная часть.

В четвертой главе представлены результаты исследования оптических и электрооптических свойств хиральных ЖК.

В первом разделе приведены исследования спектров пропускания хиральных нематических ЖК и хиральных смектических S^* ЖК в широком интервале углов распространения света по отношению к направлению оси спиральной структуры. Показано, что полосы селективного отражения света в спектрах пропускания ХЖК и СЖК при наклонном падении света сдвигаются в коротковолновую часть спектра при увеличении угла наклона (рис. 7). Это согласуется с общей теорией прохождения света через слой ХЖК [8]. СЖК по сравнению с ХЖК обладают дополнительной полосой селективного отражения света, соответствующей полному шагу спирали. При наклонном падении света возникают полосы отражения высших порядков на частотах кратных частоте основной полосы отражения. При этом наблюдается возникновение трех поляризационно чувствительных зон в наведенной полосе отражения. С увеличением угла наклона возрастают как интенсивность, так и ширина полос отражения.

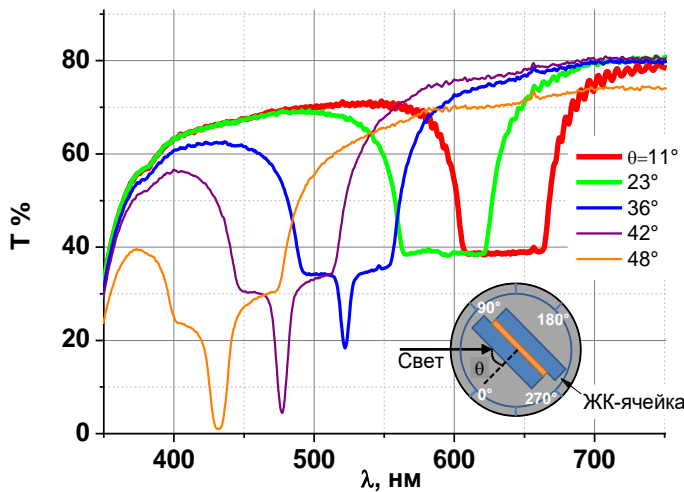


Рисунок 7 – Спектры пропускания ХЖК ($\Delta n=0.175$). Толщина ЖК слоя $d = 26.3$ мкм, шаг спирали $P_0 = 0.4$ мкм. Спектры пропускания неполяризованного света, распространяющегося под различными углами по отношению к оси спирали: 11° , 23° , 36° , 42° , 48° .

Во *втором разделе* показано, что возникновение высших порядков селективного отражения возможно при деформации холестерической спирали электрическим полем, направленным перпендикулярно оси геликоида, как это было описано ранее в работе [9]. При кратковременном приложении поля высокой амплитуды спиральная структура ХЖК не раскручивается, а переходит в деформированное состояние. При этом в спектре пропускания возникают полосы селективного отражения высших порядков, в которых с увеличением поля проявляются три характерные зоны.

При приложении электрического напряжения к системе ВШЭ (рис 3а), происходит деформация гранжановской структуры ХЖК. На длине волны в два раза меньшей длины волны центра основной полосы селективного отражения возникает полоса отражения второго порядка (рис 8). Интенсивность этой полосы быстро возрастает с увеличением напряжения и при напряженностях электрического поля $E=6.25$ В/мкм становится заметна трехзонная структура.

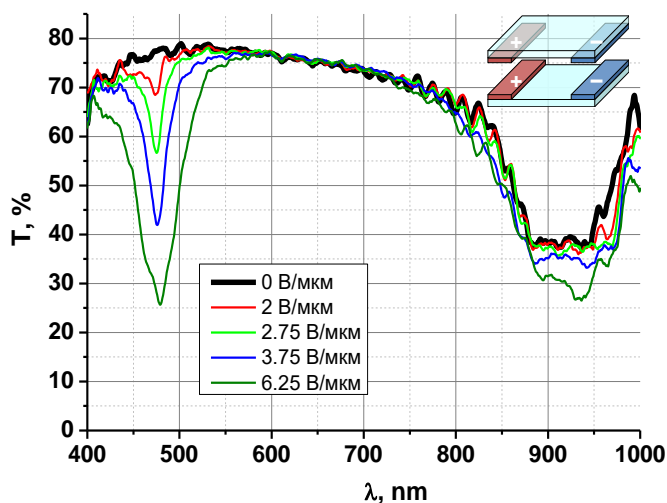


Рисунок 8 – Спектры пропускания ХЖК с шагом спирали $P_0=0.56$ мкм при периоде электродных структур $p=45$ мкм ($w=5$ мкм), зарегистрированные в течение 1.5 мс после приложения поля. Напряженность электрического поля $E = 0, 3.75, 5, 6.25$ В/мкм, соответственно.

Численное моделирование исчерпывающе воспроизводит возникновение полос селективного отражения высших порядков и их трехзонную структуру. Так же, как и в эксперименте, модель предсказывает, что даже при полях в несколько раз превышающих критическое поле E_c шаг спирали ХЖК сохраняется, как это было показано в работе [9]. Вместо раскручивания происходит сильная деформация геликоида. В то же время в области над электродами спираль полностью разрушается, директор в этой области ориентирован практически гомеотропно.

Расчетные спектры пропускания ХЖК с шагом спирали $P=0.57$ мкм представлены на рисунке 9. По мере увеличения электрического поля все индуцированные зоны проявляют трехзонную структуру. При этом тройная структура полосы максимально выражена во втором порядке. Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования в целом показывает небольшое расхождение, объясняемое большей дефектностью слоя в реальной ячейке.

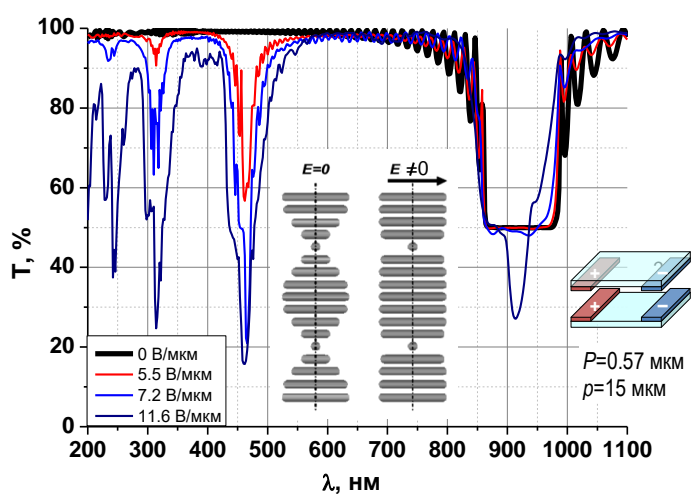


Рисунок 9 – Рассчитанные спектры пропускания ХЖК с шагом $P_0=0.57$ мкм, $d=10$ мкм. Период ВШЭ $p=15$ мкм. Спектры рассчитаны для области между электродами. В центре на рисунке схематично показана деформация спирали ХЖК в электрическом поле.

Третий раздел главы посвящен исследованию электрооптического эффекта в планарно-ориентированных ХЖК с шагом геликоида, превышающим длину волны падающего на него света. Ось спирали направлена перпендикулярно поверхностям подложек, а управляющее электрическое поле лежит в плоскости подложек и направлено перпендикулярно оси спирали. Ранее эта геометрия исследовалась в работах [10, 11].

Целью работы в этой части диссертации было выяснение механизма деформации холестерической спирали, в частности, определение флексоэлектрического вклада в электрооптический эффект в данной геометрии

ЖК ячейки. Для этой цели данный электрооптический эффект исследовался для ХЖК с различной диэлектрической анизотропией, но с одинаковыми другими параметрами ЖК.

Для исследования влияния величины диэлектрической анизотропии на характер электрооптического отклика исследовались три состава ХЖК с различной диэлектрической анизотропией – как положительной, так и отрицательной. Результаты работы показали сильную зависимость величины электрооптического отклика от абсолютной величины анизотропии диэлектрической проницаемости ХЖК.

Основные результаты и выводы

- В условиях, когда пространственный период электрического поля в планарной геометрии меньше, чем толщина слоя ЖК, экспериментально обнаружены быстрая и медленная моды в электрооптическом отклике ЖК ячеек с положительной диэлектрической анизотропией. Методом численного моделирования установлено, что быстрая мода связана с поверхностной локализацией, как управляющего электрического поля, так и деформации поля директора. Такая поверхностная мода переключается на порядок быстрее объемной [А4].
- Проведены детальные экспериментальные исследования и численное моделирование электрооптического эффекта в ячейках с нематическим ЖК, управляемых пространственно-периодическим электрическим полем, создаваемым с помощью двух систем ВШЭ электродов, расположенных на противоположных поверхностях подложек ячейки. Экспериментально достигнуты рекордные для нематических ЖК времена электрооптического переключения (200–100 мкс) [А3].
- Проведены подробные исследования и численное моделирование режима переключения ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией при начальной гомеотропной ориентации директора. Были обнаружены два, характерных только для ЖК с отрицательной анизотропией, режима переключения, которые возникают вследствие локализации деформации директора между двумя топологическими стенками, располагающимися на половине периода электродных структур. Деформация директора в случае этих двух режимов происходит в различных плоскостях, что позволяет разделить их оптически [А6].

- Экспериментально изучены угловые зависимости спектров пропускания хиральных ЖК в широком диапазоне углов распространения света по отношению к оси холестерической спирали. Доказано, что полосы селективного отражения в спектрах пропускания ХЖК при наклонном падении света сдвигаются в коротковолновую часть спектра при увеличении угла наклона. При наклонном прохождении света возникают полосы отражения высших порядков на частотах, кратных частоте основной полосы отражения. При этом в полосе отражения наблюдаются три поляризационно-зависимые субполосы [A1].

- Изучены особенности индуцирования зон селективного отражения высших порядков в ХЖК, в ячейках со встречно-штыревыми электродами, расположенными как на одной из подложек, так и на и двух подложках одновременно. Несмотря на высокую неоднородность электрического поля, в индуцированных зонах наблюдается возникновение трех подзон. Экспериментальные результаты подтверждены численным моделированием [A5].

- Изучены особенности деформации спирали (в ХЖК с различной величиной и знаком диэлектрической анизотропии) электрическим полем, направленным перпендикулярно оси геликоида. Показано, что электрооптический эффект, возникающий вследствие деформации спирали ХЖК, обусловлен взаимодействием электрического поля с диэлектрической анизотропией ЖК. Роль флексоэлектрического эффекта в данной геометрии пренебрежимо мала [A2].

Цитируемая литература

1. Reinitzer F. Beiträge zur kenntniss des cholesterins // *Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften*. – 1888. – Т. 9. – №. 1. – С. 421-441.
2. Lehmann O. Flüssige Kristalle: sowie Plastizität von Kristallen im allgemeinen, molekulare Umlagerungen und Aggregatzustandsänderungen. – *Verlag von Wilhelm Engelmann*, 1904.
3. Oseen C. W. The theory of liquid crystals // *Transactions of the Faraday Society*. – 1933. Т. 29. – №. 140. – С. 883-899.
4. Fréedericksz V., Zolina V. Forces causing the orientation of an anisotropic liquid // *Transactions of the Faraday Society*. – 1933. – Т. 29. – №. 140. – С. 919-930.
5. Kawamoto H. The history of liquid-crystal displays // *Proceedings of the IEEE*. – 2002. – Т. 90. – №. 4. – С. 460-500.
6. Палто С. П. О моделировании динамики и электрооптических эффектов в сегнето электрических жидких кристаллах // *Кристаллография*. – 2003. – Т. 48. – №. 1. – С. 130-147.
7. Geivandov A. R. et al. Study of the vertically aligned in-plane switching liquid crystal mode in microscale periodic electric fields // *Beilstein journal of nanotechnology*. – 2018. – Т. 9. – №. 1. – С. 11-19.
8. Беляков В.А. Дифракционная оптика периодических сред сложной структуры. М.: Наука, 1988. 256 с.
9. Palto S. P. et al. Spectral and polarization structure of field-induced photonic bands in cholesteric liquid crystals // *Physical Review E*. – 2015. – Т. 92. – №. 3. – С. 032502.
10. Палто С. П. и др. Быстрая ангармоническая мода в электрооптическом переключении жидкокристаллических структур на основе хиральных нематиков // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2010. – Т. 138. – №. 3. – С. 544-556.
11. Palto S. P. et al. Field Induced Helix Anharmonicity and Fast In-Plane Electrooptic Switching of Chiral Liquid Crystals // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2011. – Т. 544. – №. 1. – С. 119/[1107]-135/[1123].

Список публикаций по теме диссертации

A1. Уманский Б. А., Симдянкин И. В. Угловые зависимости спектров пропускания хиральных жидких кристаллов // *Кристаллография*. – 2017. – Т. 62. – №. 3. – С. 452-458.

A2. Симдянкин И. В., Уманский Б. А. Первый российский кристаллографический конгресс. IPS-переключение хиральных нематических жидких кристаллов с различной диэлектрической анизотропией // *Кристаллография*. – 2018. – Т. 63. – №. 2. – С. 241-247.

A3. Гейвандов А. Р., Барник М. И., Палто В. С., Симдянкин И. В., Палто С. П.. Субмиллисекундный электрооптический отклик нематического жидкого кристалла в режиме двунаправленного переключения поля // *Кристаллография*. – 2018. – Т. 63. – №. 6. – С. 928-934.

A4. Гейвандов А. Р., Симдянкин И. В., Барник М. И., Палто В. С., Палто С. П.. Быстрая мода в электрооптическом переключении жидкокристаллической ячейки при уменьшении периода электродных решеток // *Кристаллография*. – 2019. – Т. 64. – №. 3. – С. 416-420.

A5. Симдянкин И. В., Гейвандов А. Р., Барник М. И., Палто В. С., Палто С. П.. Зоны селективного отражения холестерических ЖК индуцированные в неоднородном пространственно-периодическом электрическом поле // *Жидк. крист. и их практич. исп.* – 2019 – Т. 19. – №. 2. – С. 48-56.

A6. Barnik M. I., Simdyankin I. V., Geivandov A. R., Umanskii B. A., & Palto S. P. Fast spatially localized electrooptical mode in vertically aligned nematic LCs with negative dielectric anisotropy // *Liquid Crystals*. – 2019. – С. 1-11.