

СОЛОМАТИН Алексей Сергеевич

**ОПТИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНЫЕ НЕОДНОРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ
ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

01.04.05 Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Москва-2018

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Государственного образовательного учреждения высшего образования Московской области Московский государственный областной университет (МГОУ)

Научный консультант: Беляев Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области Московский государственный областной университет (МГОУ).

Официальные оппоненты:

Грейсух Григорий Исаевич, доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, заведующий кафедрой физики и химии.

Каманина Наталия Владимировна доктор физико-математических наук, профессор, ФГУП «Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова», заведующий кафедрой физики и химии, начальник сектора «Фотофизика фуллеренсодержащих сред».

Симоненко Георгий Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, профессор кафедры оптики и биофотоники.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО)

Защита состоится _____ 2018 года в _____ час. в _____ ауд.

на заседании диссертационного совета Д 308.006.01 при ФГУП «Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Оптико-Физических Измерений» по адресу: 119361, г.Москва, ул.Озерная, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИОФИ» (www.vniiofi.ru/disser.html)

Автореферат разослан _____ 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Москалюк Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Разработка оптически анизотропных неоднородных структур на основе нематических жидких кристаллов и содержащих их композитов, а также конструктивных решений для управляемого распределения световых потоков приборов отображения и обработки информации, позволяющих улучшить их характеристики и функциональные возможности.

Актуальность

Видное место среди современных оптических и оптоэлектронных приборов занимают устройства отображения и обработки информации: дисплеи и проекторы. В широком ряде разнообразных ситуаций использования коллективных экранов вполне очевидным образом проявились и их недостатки. Прежде всего, пользователи (зрители) могут нуждаться, вследствие разницы их интересов и выполняемой деятельности, в индивидуально ориентированной информации. В таком случае эффективность коллективного экрана может быть невысока. Актуальна разработка как многопользовательского дисплея, так и проекционного экрана, с индивидуальным видеоизображением для каждого зрителя. Он может найти применение от семейного (но в то же время индивидуального) телевизора (проектора), и до информационных панелей кабины самолета.

Отображение информации на проекционных экранах главным образом предназначено для коллективного просмотра. Практически не нашли себе применения проекционные экраны для индивидуального пользования. Актуальна разработка энергоэкономного (аккумуляторного) проектора, встроенного например в телефон, с пониженными конструктивными потерями светового потока, который можно было бы использовать для кратковременной коллективной обработки отображаемой информации вне оборудованных электроснабжением мест, в том числе в чрезвычайных ситуациях (МЧС, военные) на проекционном экране, сопоставимом с экраном ноутбука по размерам.

Известны методы формирования ориентирующих жидкие кристаллы (ЖК) пленок, в том числе кремнийорганических, обладающих стойкостью к неблагоприятным условиям эксплуатации. Для вышеупомянутых и иных ЖК устройств актуально продолжение исследований кремнийорганических ориентирующих материалов для приборов отображения и обработки информации.

Известно много различных конструктивных решений управляемых полем жидкокристаллических линз, в том числе и с матричной структурой. Актуально исследовать возможность управлять фокусным расстоянием статического линзового раstra за счет изменения граничных условий в ЖК элементе.

Особый успех достигнут в разработке большим рядом научных организаций средств управления пространственным распределением интенсивности светового потока различного назначения – для офтальмологии, астрономии, космической связи, отображения информации и других применений, в том числе манипулировании ультрамелкими объектами лучом света. Актуальна разработка ЖК-композитных материалов для матричных средств управления пространственным распределением светового потока.

Цель диссертационной работы Разработка оптически анизотропных неоднородных структур на основе нематических жидких кристаллов и содержащих их композитов, а также конструктивных решений для управляемого распределения световых потоков приборов отображения и обработки информации, позволяющих улучшить их характеристики и функциональные возможности.

В соответствии с поставленной целью, были определены задачи:

1. Разработать конструкцию элемента (пикселя) дисплея принципиально нового типа, реализующего для каждого из индивидуально пространственно расположенных зрителей его индивидуальный визуальный информационный поток (изображение на экране), отличающееся от изображений, видимых остальными зрителями, и проекционную систему с такими же возможностями.

2. Разработать конструкцию элемента (пикселя) энергоэкономного (аккумуляторного) проектора принципиально нового типа, обеспечивающего увеличение освещения проекционного экрана (при средней 50% яркости) в два раза при том же энергопотреблении.

3. Разработать конструкцию нового типа энергонезависимых нематических жидкокристаллических линз для матричных фокусирующих устройств.

4. Разработать новый ЖК-композит и конструкцию нового матричного устройства на его основе, задающего поляризацию и регулирующего интенсивность пропускаемого светового потока.

5. Разработать новый ЖК-композит и новую конструкцию дифракционных структур на его основе, которая позволяет получать суперпозицию дифракционных картин для различных длин волн при различной их поляризации.

Для решения поставленных задач необходимо:

1. Исследовать структуру и свойства ЖК материалов, предназначенных для создания оптических и электрооптических приборов, и в частности:

- ориентационных и электрооптических свойств ЖК слоев нового типа, с произвольными параметрами ориентации, оптической и диэлектрической анизотропии;

- оптических свойств нового типа жидкокристаллических линз;

- оптических свойств новых матричных ЖК-композитных систем;

- диэлектрических свойств ЖК слоя с произвольными приповерхностными углами и различными типами распределения директора, с произвольным знаком диэлектрической анизотропии.

2. Разработать новые измерительные методы, которые могут быть использованы для совершенствования оптических и оптико-электронных приборов. В том числе методы:

- определения характеристик взаимодействия с ориентирующей поверхностью слоев ЖК с однородной и неоднородной структурой;

- определения ориентационных и оптических характеристик доменов и слоев ЖК с однородной и неоднородной структурой.

3. Разработать новые материалы, обеспечивающие широкий диапазон параметров поверхностного взаимодействия жидкого кристалла с ориентирующей поверхностью (угла наклона и энергии сцепления):

- ориентирующие покрытия для ЖК-ячеек;

- ЖК-композиты для матричных структур.

Методы исследования

Экспериментальные исследования оптических, электрооптических и диэлектрических эффектов в двулучепреломляющих ЖК средах, ЖК-композитах и оптически анизотропных полимерных пленках с микрорельефом с применением известных и вновь разработанных методов измерения, а также компьютерное моделирование структуры сред и основных эффектов, наблюдаемых в них.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Регулирование распределения по толщине ячейки угла наклона директора ЖК позволяет значительному числу зрителей индивидуально просматривать одновременно различный видеоряд на одном и том же экране.

2. Регулирование распределения по толщине ячейки угла наклона директора ЖК позволяет увеличить в два раза освещение проекционного экрана при сохранении энергопотребления, при средней 50% яркости экрана.

3. Предложены ЖК микролинзы, фокусное расстояние которых задается приповерхностным углом наклона, упругими свойствами ЖК и размером линзы, пригодные для применения в матричных фокусирующих системах.

4. ЖК-композит на основе поликапролактона обеспечивает реализацию электроуправляемого регулятора поляризации и интенсивности пропускания света, что позволяет применить его для матричной системы управления распределением интенсивности света.

5. ЖК-композит на основе борсилоксана обеспечивает реализацию регулятора пропускания света для матричной системы управления распределением интенсивности света и при освещении матричной структуры на его основе формирование суперпозиции дифракционных картин с разными длинами волн.

Обоснованность научных результатов диссертационной работы базируется на использовании известных научных положений, методов математического моделирования и вычислительной математики, аттестованных методов экспериментальных исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждается проверкой адекватности компьютерных моделей, практической применимостью созданного методического обеспечения, включающего процедуры и алгоритмы для решения разнообразных задач компьютерного моделирования оптических и электрооптических свойств, а также соответствием полученных данных независимым и достоверным экспериментальным данным, аттестацией методик государственными органами (ФГУП «Стандартинформ» и ВНИИМС).

Новые научные результаты, лично полученные автором

Предложены новые конструктивные решения:

статических линз ЖК;

матричных систем ЖК-композитов, регулирующих и преобразующих световой поток;

оптических элементов для приборов отображения информации – дисплеев и проекторов.

Компьютерное моделирование:

ориентационно-оптических свойств ЖК слоев и дисперсных структур;

ЖК линз, эквивалентных по своим оптическим свойствам сферическим или асферическим линзам;

диэлектрических свойств ЖК слоя с различными типами ориентации в широком диапазоне варьируемых параметров;

Комплекс измерительного оборудования, программного обеспечения и измерительных методик. С их использованием осуществлялись все измерения и компьютерные моделирующие расчеты в данной работе.

Разработаны новые материалы, обеспечивающие изготовление ЖК ячеек с параметрами поверхностного взаимодействия в широком диапазоне. Новизна данных материалов и методик подтверждена публикациями в высокорейтинговых журналах, патентами РФ и аттестованными методиками Государственной службой стандартных справочных данных (ГСССД).

Научная значимость работы

Впервые предложено формировать индивидуальный визуальный информационный поток дисплея (проектора) и показана практическая возможность его реализации на основе жидкокристаллической элементной базы.

Впервые предложено формировать световой поток проектора без потерь на поглощающих свет элементах и показана практическая возможность его реализации на основе жидкокристаллической элементной базы

Впервые предложена видеосистема с управляемым перераспределением разрешающей способности в поле зрения и показана практическая возможность его реализации на основе статических линз ЖК.

Впервые предложено использовать ЖК-композиты в матричных регуляторах и преобразователях светового потока. Проведены теоретические и экспериментальные исследования ЖК-композитов на основе поликапролактона и на основе борсилоксана.

Практическая значимость заключается в том, что предложены новые конструкции и материалы, разработанные впервые в данной работе.

Предложены новые конструктивные решения:

- статических линз ЖК;
- матричных системы ЖК-композитов, регулирующих и преобразующих световой поток;

- оптических элементов для приборов отображения информации – дисплеев и проекторов.

Предложены новые материалы:

- кремнийорганические материалы, обеспечивающие широкий диапазон параметров поверхностного взаимодействия (угла преднаклона и энергии сцепления) жидкого кристалла с ориентирующей поверхностью устройства отображения и обработки информации;

- перфторированные материалы;

- ЖК-композитные материалы.

Реализация результатов работы

Получены 3 Патента РФ: «Способ изготовления жидкокристаллической ячейки», патент РФ №2491316 от 27.08.2013; «Способ получения гомеотропно ориентированного слоя жидкого кристалла жидкокристаллического устройства», патент РФ № 2625121 от 11.07.2017; «Способ получения смеси жидкого кристалла с полимером для дисплейной техники и оптоэлектроники», патент РФ № 2607454

Результаты работы, методики и материалы, внедрены в следующих учебных, научных и производственных организациях: Московский Государственный Областной Университет (МГОУ); Государственный Научный Центр Российской Федерации АО Государственный Научно-Исследовательский Институт химии и технологии элементоорганических соединений (ГНЦ РФ АО ГНИИХТЭОС); Военная Академия РВСН им. Петра Великого; Санкт-Петербургский Национальный Исследовательский Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики (НИУ ИТМО СПб); НИИ Наноматериалов Ивановского Государственного Университета; Институт Физики им. Л.В. Киренского Федерального Исследовательского Центра «Красноярский научный центр» Сибирского Отделения РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН); Новосибирский Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; Межрегиональное общественное учреждение Институт Инженерной Физики (МОУ ИИФ, Серпухов); ООО НПП

«Дисплей» (Саратов); Ереванский Государственный Университет (Армения) и др.

Четыре методики (ГСССД МЭ 221 – 2014; МЭ 226 – 2014; МЭ 238 – 2015; МЭ 249 – 2016) аттестованы в рамках Национальной программы стандартизации Государственной службой стандартных справочных данных (ГСССД) Госстандарта РФ и внесены в Федеральный информационный фонд РФ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ».

Результаты диссертационных исследований докладывались на международных и российских научных конференциях:

Симпозиумы Международного дисплейного общества (SID) 2012, 2013, 2014, 2016, 2017; Международные симпозиумы “Передовые дисплейные и световые технологии (Advanced Display Technologies International Symposium) 2010, 2011 и 2013 гг.; Всероссийская Конференция по Жидким Кристаллам (РКЖК) 2012 г.; Международных конференциях по жидким кристаллам (International Liquid Crystal Conference (ILCC)) 2010, 2012, 2014, 2016 гг.; Международной школе по неорганической и органической электролюминесценции (International Workshop on Inorganic and Organic Electroluminescence) 2010 г.; Международной конференции по науке и технологии излучательных дисплеев и освещению (International Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting) 2010 г.; Международных исследовательских конференциях по дисплеям ЕвроДисплей (EuroDisplay) 2011, 2013, 2015 гг.; Международной конференции Китай Дисплей / Азия Дисплей (International Conference China Display / Asia Display) 2011 г.; Конференция «Интеллектуальные системы-2014» РУДН; Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, нанoeлектронных приборов и экологических технологий», МГОУ, Москва, 2013, 2015, 2016, 2017, 2018 гг.

Результаты работы опубликованы в отечественных и зарубежных научных журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science, Scopus, РИНЦ или входящих в список ВАК РФ: Optics Express; Applied Optics;

Molecular Crystals & Liquid Crystals; Journal of the Society for Information Display; Оптический Журнал; Жидкие кристаллы и их практическое применение; Вестник МГОУ. Серия Физика и математика; Вестник РУДН и др.

Значительная часть результатов получена при выполнении исследовательских проектов:

Грант РФФИ №14-47-03608 р_центр_а и договор с Правительством Московской области №96/09-16 по теме «Научные основы создания и моделирования устройств отображения и оптической обработки информации на основе наноструктур с электрооптическими и фотонно-кристаллическими свойствами для инфокоммуникационных систем».

Грант РФФИ №16-57-00089 Бел_а по теме «Технология и свойства наноструктурированных органических и неорганических материалов для перспективных светомодулирующих и электролюминесцентных устройств отображения и преобразования информации». Номер государственной регистрации АААА-А16-116060710052-3.

Грант РФФИ №16-37-50037 мол_нр по теме «Структура и физико-химические свойства тонкопленочных органических наноматериалов на основе замещенных бордипирриновых люминофоров». Номер государственной регистрации АААА-А16-116051610030-0.

Грант РФФИ №10-03-90028-Бел_а по теме «Создание нового типа многослойных полимерных систем на основе оптически изотропных и анизотропных материалов и исследование их взаимодействия с анизотропными жидкостями».

Грант РФФИ №10-07-00385-а по теме «Технология жидкокристаллических средств отображения информации для перспективных информационных систем с использованием кремнийорганических соединений и пленок на их основе».

Госконтракт Минобразования и науки №02.740.11.5218 по ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 гг. Тема «Разработка и исследование кремнийорганических и

фотоанизотропных материалов для жидкокристаллических дисплеев, эксплуатируемых при нормальных и экстремальных условиях, и экологичных технологий их создания».

Грант Президента РФ № НШ-1495.2012.8 (Ведущая научная школа) по теме «Оптоэлектронные и фотонные устройства нового поколения с использованием дисперсных систем на основе жидких кристаллов, полимеров и полупроводниковых материалов».

Публикации Список публикаций содержит 33 статьи, 31 доклад на конференциях, из них 5 докладов на конференциях, вошедших в периодические сборники, индексируемые в Google Scholar, 4 методики ГСССД, 3 патента РФ на изобретение.

Объем и структура диссертации Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 295 страницах. Список использованной литературы включает 169 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность научных исследований и разработки оптически анизотропных материалов с неоднородной структурой и конструкций для оптических и электрооптических приборов отображения и обработки информации. Конкретизируются исследуемые материалы и объекты: слои нематических ЖК с различными ориентирующими покрытиями, оптически анизотропные полимеры с микрорельефом, ЖК-композиты, устройства на основе этих материалов. Формулируется цель диссертационной работы и решаемые в ней задачи, излагаются научная новизна, научная значимость и практическая значимость полученных теоретических результатов.

В первой главе представлен аналитический обзор научных трудов по методам исследований и практическому применению оптически анизотропных систем с неоднородной структурой. На основе аналитического обзора научных исследований сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе описаны материалы и оборудование, конструкция и принципы работы спроектированного и изготовленного для данных исследований экспериментально-измерительного оборудования, принципы программного управления экспериментальным оборудованием. На основе экспериментальных данных излагаются свойства и технология ориентирующих покрытий, в том числе с использованием ряда новых материалов, примененных в данных целях впервые. Приведены опубликованные в литературе и разработанные в данной работе методики изготовления ЖК ячеек, нанесения различных покрытий на поверхности ячеек, изготовления образцов полимера с микрорельефом, данные о новых материалах и методах их применения.

Разработаны новые материалы на основе кремнийорганических соединений, перфторированных веществ и методы нанесения тонких пленок для ориентации директора ЖК с положительной и отрицательной оптической анизотропией. Впервые синтезированы и исследованы соединения с различной молекулярной структурой, в том числе и с молекулярным микрорельефом (изменяются продольные и поперечные размеры молекул КОС), пример такого вещества приведен на рис.2.1.

Полученные данные по ориентации ЖК с использованием разработанных нами оригинальных материалов сравниваются с данными по ориентации на пленках полиимидов (ПАК). Впервые на пленках кремнийорганических соединений различной молекулярной структуры с различными полярными и неполярными функциональными заместителями получены краевые углы ориентации директора от 0° до 90° и значения полярной энергии сцепления, превышающие 10^{-4} Дж/м² и реализованы различные типы распределения директора ЖК по толщине ячейки, что делает их перспективными для использования в электронных средствах отображения информации. Эти данные получены с использованием разработанных нами оригинальных стандартизованных методик ГСССД. На новые кремнийорганические соединения и метод получения ориентирующей пленки получен патент Государственного реестра изобретений РФ и подана международная заявка. На

метод получения ориентирующей пленки с использованием поверхностно активного вещества с перфторированными фрагментами подана заявка на Патент РФ на изобретение. В табл.2.1 приведены структурные формулы для одного из ориентантов, имеющих различную молекулярную структуру.

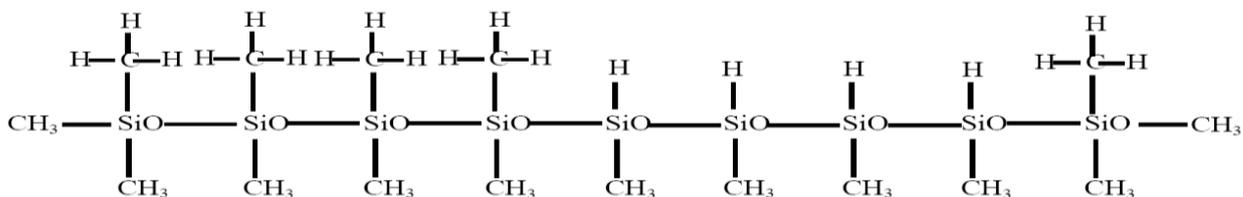
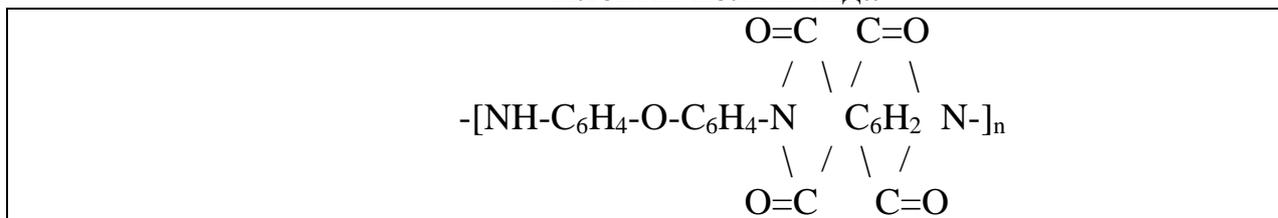


Рис.2.1. Пример развернутой структурной формулы КОС (ω, ω' -дигидроксиолигометилэтилсилуксан), иллюстрирующий молекулярный микрорельеф.

Таблица 2.1.

Пленки полиимида



Другим новым классом ориентирующих соединений являются поверхностно активные вещества с перфторированными фрагментами в молекуле. Для одного из исследованных материалов (полизама) реализована устойчивая гомеотропная ориентация ЖК. Его структурная формула приведена на рис.2.2.

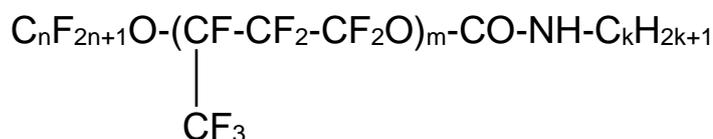


Рис.2.2. Структурная формула полизама, где $n=1 - 8$, $m=3 - 50$, $k = 1 - 8$.

В третьей главе сформулированы основные теоретические положения, положенные в основу последующей части работы. После этого изложены результаты компьютерного моделирования оптических свойств ЖК слоев с произвольными приповерхностными углами и различными типами пространственного распределения директора ЖК.

В первой части третьей главы описана структура типичной жидкокристаллической ячейки с различными видами ориентации ЖК внутри слоя с симметричными и асимметричными граничными условиями (Н или Нуб90 гибридная; S или НубS геометрия поперечного изгиба или «splay»; В или НубВ геометрия продольного изгиба или «bend»), углы могут быть симметричными или несимметричными, приведена на рис.3.1. Гибридная ориентация ЖК ячеек обеспечивается созданием различных краевых углов наклона директора ЖК, путем нанесения различных ориентирующих покрытий и/или различной их поверхностной обработкой. Использовалось одноконстантное приближение (константы упругости Франка для нематических ЖК $K_{11}=K_{33}$). В дальнейших частях работы данная модель сравнивалась с ЖК, имеющими значения K_{33}/K_{11} в диапазоне от 0,5 до 3.

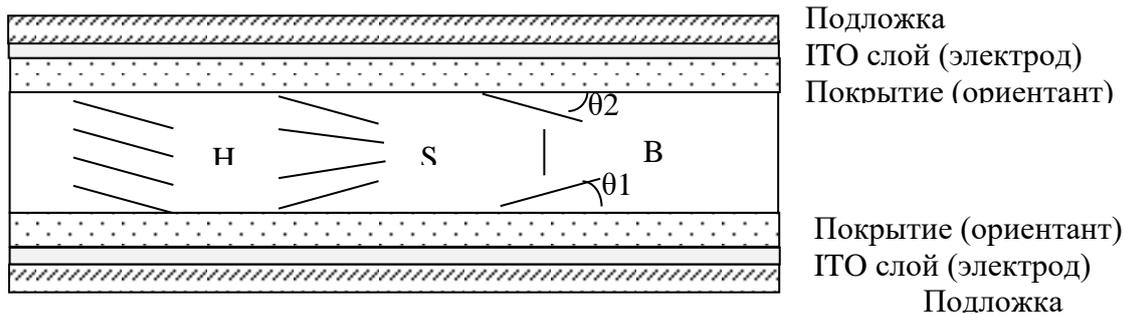


Рис.3.1. Структура частей типичной жидкокристаллической ячейки, состоящей из верхней и нижней подложек с нанесенными на их внутреннюю сторону прозрачных электродов (как правило, материал – окись индия и олова (ITO)) и ориентирующих слоев, задающих ориентацию различных типов (Н, S, В) с приповерхностными углами $\theta_0^{(1)}$ и $\theta_0^{(2)}$.

Во всех случаях, рассмотренных в данной работе, разность фазовых задержек $\Delta\Phi$ определяется выражением (3.1a):

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\int_0^L \frac{n_o n_e dz}{(n_o^2 \cos^2\theta(z) + n_e^2 \sin^2\theta(z))^{1/2}} - n_o L \right] \quad (3.1a)$$

где L толщина ячейки, λ длина волны, n_o и n_e показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей, соответственно, $\theta(z)$ зависимость угла наклона директора от координаты по толщине ячейки. В качестве примера

приведем выражение (3.16) зависимости $\Delta\Phi$ от угла θ_0 для однородного распределения:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n_0 L}{\lambda} \left(\frac{n_e}{(n_0^2 \cos^2 \theta_0 + n_e^2 \sin^2 \theta_0)^{1/2}} - 1 \right) \quad (3.16)$$

Из выражения (3.16) для однородной ячейки следует выражение для зависимости $\theta_0(\Delta\Phi)$.

$$\theta_0 = \arccos \left\{ \frac{n_e^2}{n_e^2 - n_0^2} \left[1 - \left(1 + \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Phi_{\max}} \frac{\Delta n}{n_0} \right)^{-2} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.17)$$

Зависимость $\Delta\Phi$ от угла преднаклона θ_0 была количественно определена для ЖК слоев с различными законами распределения угла наклона по толщине ячейки (Рис.3.2). При симметричных краевых углах на противоположных сторонах, реализуются S- или В-распределения.

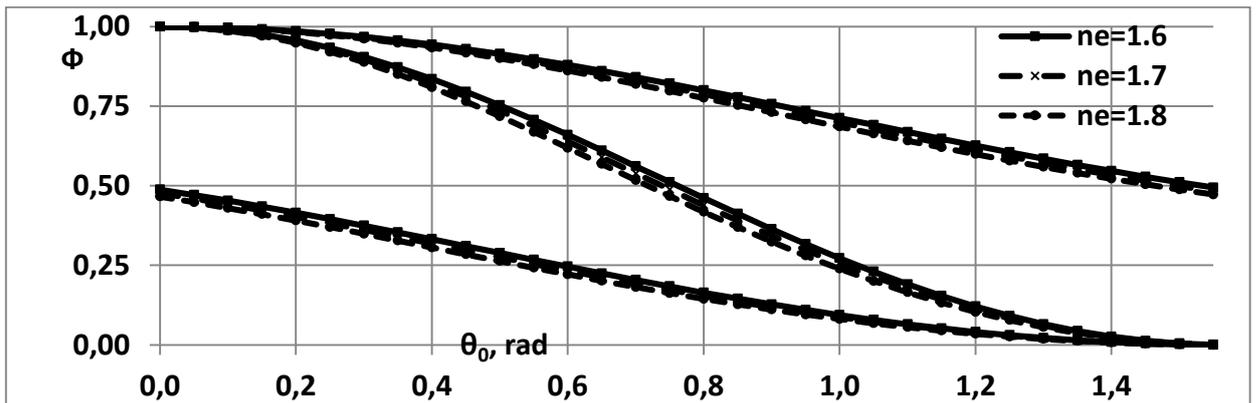


Рис.3.2. Зависимость нормированной разности фазовых задержек Φ от угла преднаклона θ_0 директора ЖК для ячеек с типами распределения: S (верх), однородная Н (посередине) и В (нижняя кривая), $n_0=1,5$, n_e от 1.6 до 1.8.

Для ячеек с произвольным распределением угла наклона в слое ЖК введен такой параметр, как нормированная разность фазовых задержек $\Phi = \Delta\Phi / \Delta\Phi_{\max}$. Величина $\Delta\Phi$ отнесена к ее максимальному значению $\Delta\Phi_{\max} = 2\pi\Delta nL/\lambda$, где $\Delta n = n_e - n_0$ двулучепреломление ЖК. Максимальная величина $\Delta\Phi_{\max}$ практически достижима в ячейках с планарной ориентацией ($\theta_0^{(1)} = \theta_0^{(2)} = 0$).

Ниже (рис.3.3) представлены результаты компьютерного моделирования зависимости нормированной фазовой задержки $\Phi(\theta_0)$ гибридной ЖК ячейки от комбинации углов директора ЖК:

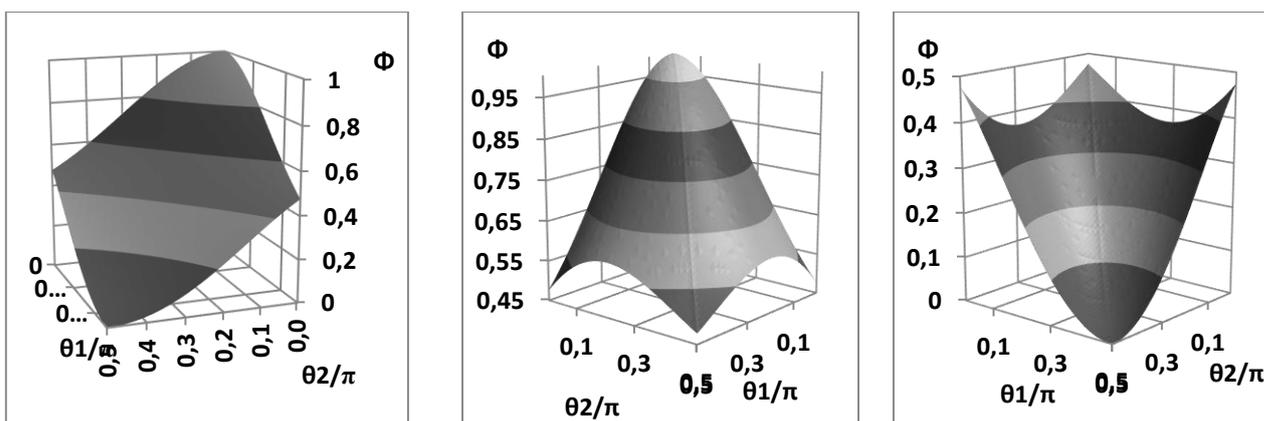


Рис.3.3. Зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ для распределения директора по типу (слева направо) Hyb90°, HybS, HybV.

Во второй части исследован случай наклонного падения поляризованного пучка света (Рис.3.4). Угол падения равен β , плоскость падения $I2$ параллельна плоскости директора ЖК ячейки xz . Тогда вектор электрического поля световой волны перпендикулярен этой плоскости. Эта геометрия эквивалентна геометрии гибридной ячейки с углами наклона $\gamma^{(1)}=\theta_0^{(1)}+\beta$ и $\gamma^{(2)}=\theta_0^{(2)}-\beta$ на противоположных подложках, соответственно.

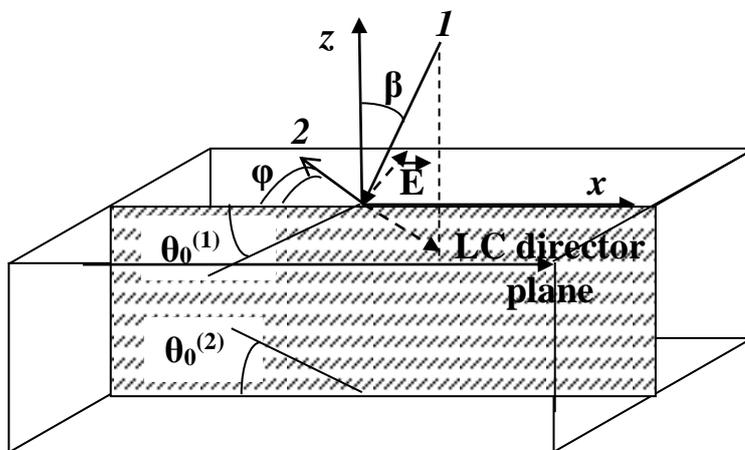


Рис.3.4. Геометрия наклонного падения света на ЖК ячейку с несимметричными граничными условиями. Луч света в плоскости директора.

При этом эквивалентная толщина ячейки увеличивается. Это ведет к увеличению величины нормированной разности фазовых задержек $\Phi=\Delta\Phi/\Delta\Phi_{max}$ по сравнению со случаем нормального падения света. Разность фазовых задержек Φ для случая наклонного падения света рассчитывается (рис.3.5) с учетом возрастающего, с ростом угла падения луча света, пути луча в слое ЖК.

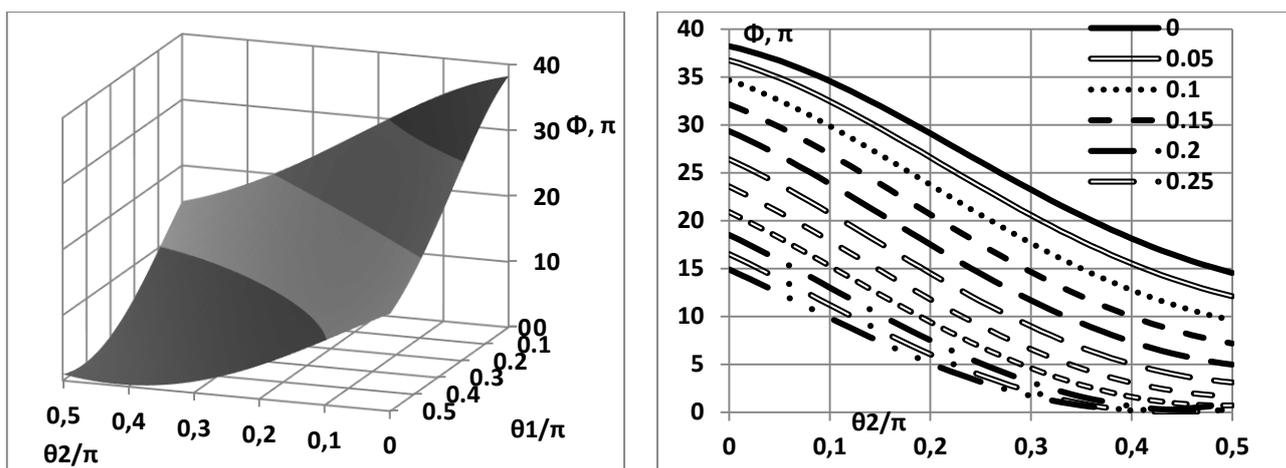


Рис.3.5. Наклонное падение поляризованного пучка света. Угол падения β равен 15° . *Нyb90*.

Для каждого угла падения света вид набора зависимостей $\Phi(\theta_0^{(1)})$ при разных $\theta_0^{(2)}$ мало изменяется при изменении угла φ , однако область значений $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ поднимается вверх и одновременно амплитуда уменьшается. Полученные результаты позволяют разрабатывать ЖК элементы оптоэлектронных систем.

Далее изложены результаты моделирования объемных ЖК доменов в изотропной среде (рис.3.6). Для цилиндрических и сферических доменов смоделированы оптические свойства, в зависимости от размеров и оптических характеристик, доменов (недеформированных, приповерхностных, межповерхностных) в изотропной фазе. При моделировании рассмотрены как домены с центральным телом незначительного радиуса, так и сформировавшиеся вокруг крупного центрального тела.

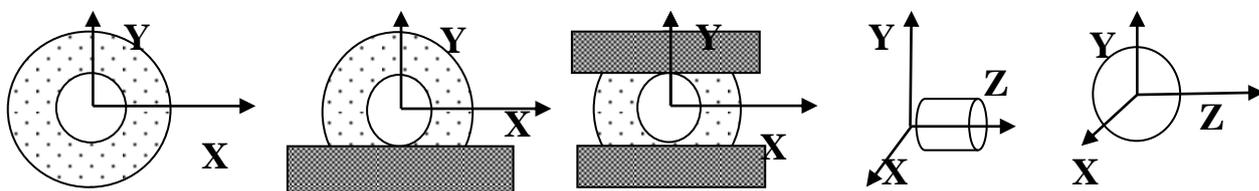


Рис.3.6. Домены ЖК с центральным телом, слева направо типы сечения доменов: недеформированный, приповерхностный, межповерхностный; затем типы симметрии: цилиндрический, сферический.

Предложено по наблюдаемой оптической картине (рис.3.7) определять размеры ЖК доменов и радиус центрального тела в них для ЖК с известными оптическими характеристиками (показателями преломления). Предложено, при

предварительно известном размере ЖК доменов и помещенных в среду доменообразующих (центральных) тел, по наблюдаемой оптической картине определять двулучепреломление ($\Delta n = n_e - n_o$) и, при известном показателе преломления для обыкновенного луча, определять необыкновенный (n_e).

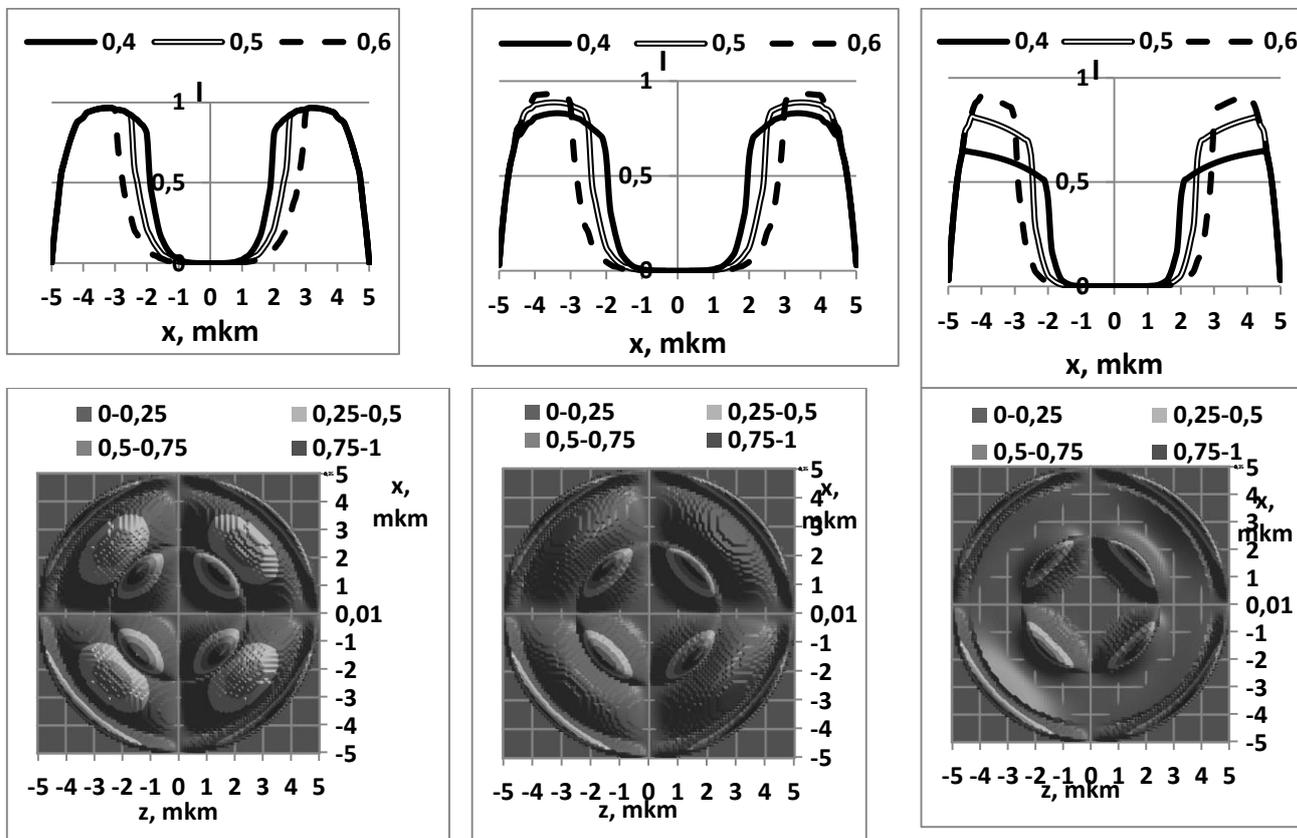


Рис.3.7. Домены ЖК с центральным телом, слева направо: недеформированный, приповерхностный, межповерхностный. Верхний ряд: при диаметре центрального тела от 0,4 до 0,6 от диаметра (L) домена, интенсивность света, прошедшего через цилиндрический домен. $L=10$ микрон, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$. Нижний ряд: сферические, в том же порядке, диаметр центр. тела $0,5L$, $n_e=1.65$.

Показано, что оптические свойства ПДЖК можно рассматривать по аналогии с свойствами сферических и цилиндрических доменов при радиусе внутреннего тела, равном нулю. Предложенные методы определения оптических характеристик и размеров ЖК доменов могут иметь прикладное значение при проектировании и изготовлении ЖК средств отображения и обработки информации с ПДЖК слоями или ЖК слоями, ориентационное распределение которых задано введением тел заданной формы.

Также исследовались сферические домены (рис.3.8) с планарной приповерхностной ориентацией и биполярные (с полюсами-бужумами и ориентацией, несколько отличающейся от чисто планарной). Для них также предложены методы определения оптических характеристик и размеров сферических ЖК доменов.

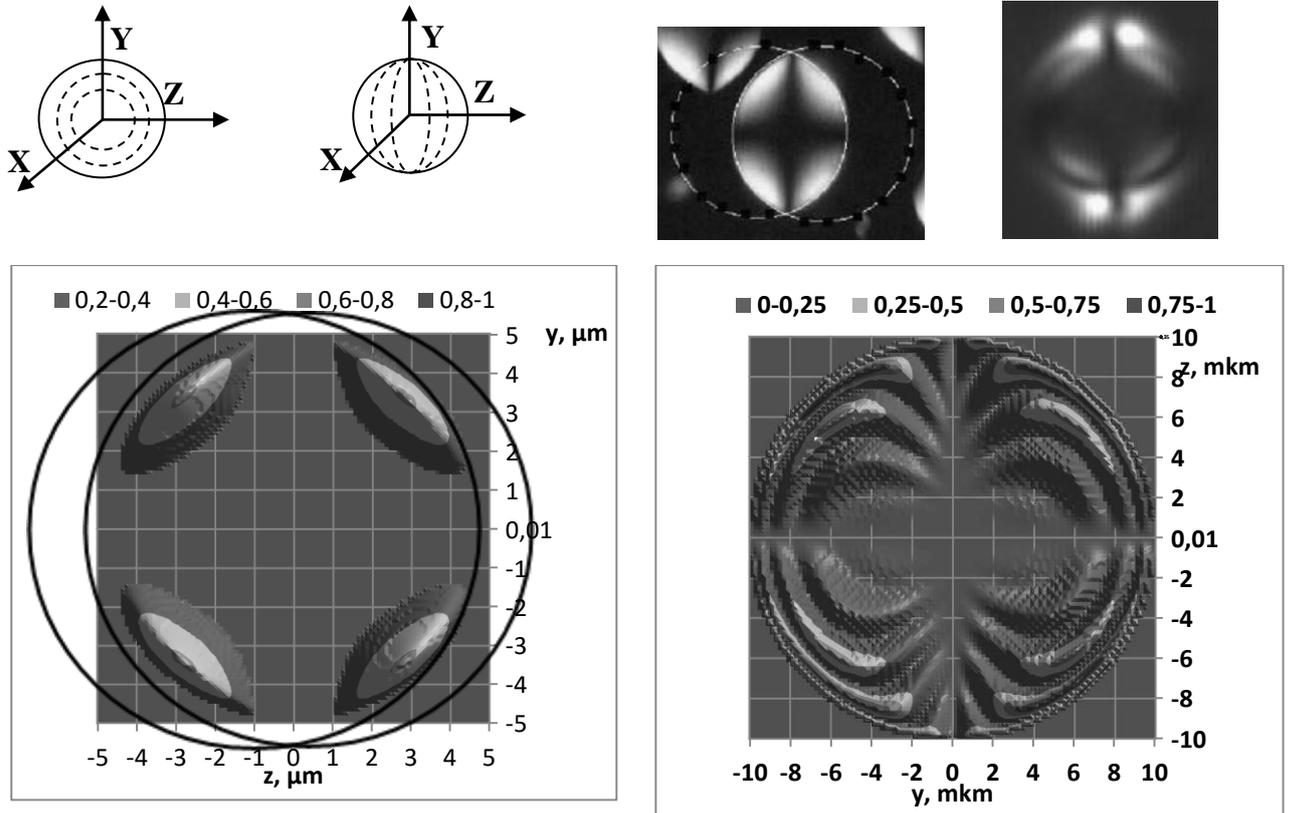


Рис.3.8. Домены ЖК с планарной приповерхностной ориентацией. Внизу вид сбоку для капель разных размеров.

В следующей части рассчитаны зависимости дифракционных свойств дифракционных оптических элементов (ДОЭ) из оптически анизотропных материалов от параметров геометрии ДОЭ и анизотропных свойств материалов как с положительным, так и с отрицательным двулучепреломлением.

В четвертой главе используя модели ориентационных и оптических свойств неоднородного ЖК слоя, упомянутые выше, исследованы линзы (Рис.4.1) из нематического ЖК с неоднородной ориентацией.

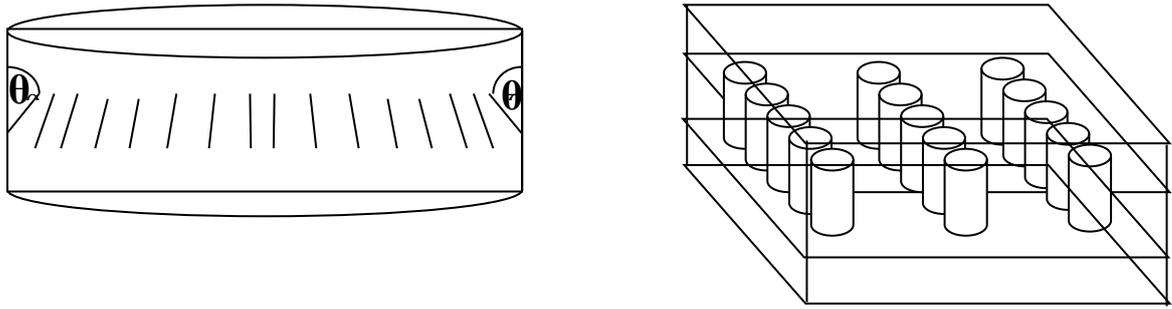


Рис.4.1. Слева: ЖК микролинза, то есть цилиндрическая пора, заполненная ЖК, для случая S распределения, угол посередине равен нулю, то есть ЖК директор параллелен оси цилиндра и, следовательно, линзы. Свет падает сверху вниз. Справа: матрица цилиндрических пор, над и под матрицей прозрачные слои.

Разработаны статические линзы ЖК, аналогичные по своим оптическим свойствам сферическим или асферическим линзам. На основе результатов, изложенных в главе третьей, было определено фокусное расстояние.

Для S рассеивающих фокусное расстояние отрицательное (ниже оно в таблице и на графиках по абсолютной величине) а для V собирающих фокусное расстояние положительное. Величина K_{33}/K_{11} мало влияет на фокусное расстояние (от десятков микрон до сотен миллиметров) у малоугловых $S(15/0/15)$ и $V(75/90/75)$ образцов, и при этом фокусное расстояние очень похожее у рассеивающих и собирающих линз с одинаковыми радиусами и толщиной. Могут быть разработаны растровые устройства на основе этих линз.

Фокусное расстояние определяется радиусом и толщиной линзы. Поскольку ЖК линза (с параболическим профилем зависимости показателя преломления n_e от радиальной координаты) превращает плоский волновой фронт падающей волны в параболический, то имеет место фокусировка прошедшего излучения. Ниже на рис.4.2 показан график зависимости показателя преломления от радиальной координаты и соответствующий ему (при толщине линзы 100 микрон) профиль фронта волны от радиальной координаты.

Фронт волны при выбранных диапазонах углов директора ЖК (отношение коэффициентов упругости $K_{33}/K_{11}=1,5$) может считаться квазисферическим, хотя, в принципе, он параболический. Луч света

неполяризованный (с круговой поляризацией), падающий параллельно оси цилиндрической поры. Наполовину (50 процентов интенсивности) пройдет без преломления (прямолинейно), а другие 50 процентов его интенсивности (составляющая, образованная, условно, необыкновенным лучом), пройдет линзу формируя квазисферический фронт волны. В результате сфокусируется, как и для стеклянной линзы, свет с круговой поляризацией. Квазисферический фронт волны фокусируется в центре сферы. Фокусное расстояние (в мкм) отсчитывается от выхода луча из линзы.

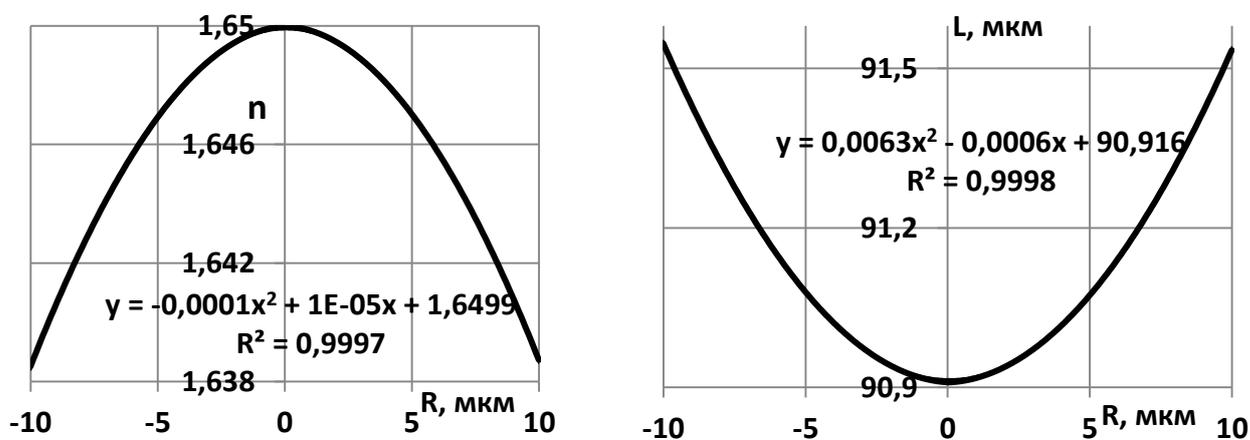


Рис.4.2. Зависимость показателя преломления от радиальной координаты и соответствующий ему (при толщине линзы 100 микрон) профиль фронта волны от радиальной координаты.

Предполагается, что после выхода из линзы луч распространяется в оптически изотропной среде, у которой величина показателя преломления принимается средней между наибольшим и наименьшим значением показателя преломления в линзе (на рис.4.2 наибольшее значение $n=1.509$, наименьшее $n=1.5$, таким образом для расчетов принята величина $n=1.5045$). В воздухе, соответственно, фокусное расстояние в полтора раза меньше.

На основе планарной ориентированной ячейки ЖК предложен светофильтр, который в скрещенных поляризаторе и анализаторе, при плоскости ориентации директора ЖК на 45° к поляризатору, дает распределение интенсивности пропускания нормально падающего луча света от длины волны, приведенное на рис.4.3. Ячейка ЖК с планарной ориентацией, с показателем преломления обыкновенным $n_o=1.5$ и показателем преломления необыкновенным $n_e=1.65$, с толщиной слоя ЖК $L=19.7$ мкм обеспечивает

распределение пропускания от длины волны, соответствующее светофильтру на три RGB цвета. Таким образом, профильтрованный свет может поступать сразу на три фотоприемных элемента, соответствующих цветам RGB. Осталось световой поток разделить по цветам и сфокусировать на фотоприемных элементах.

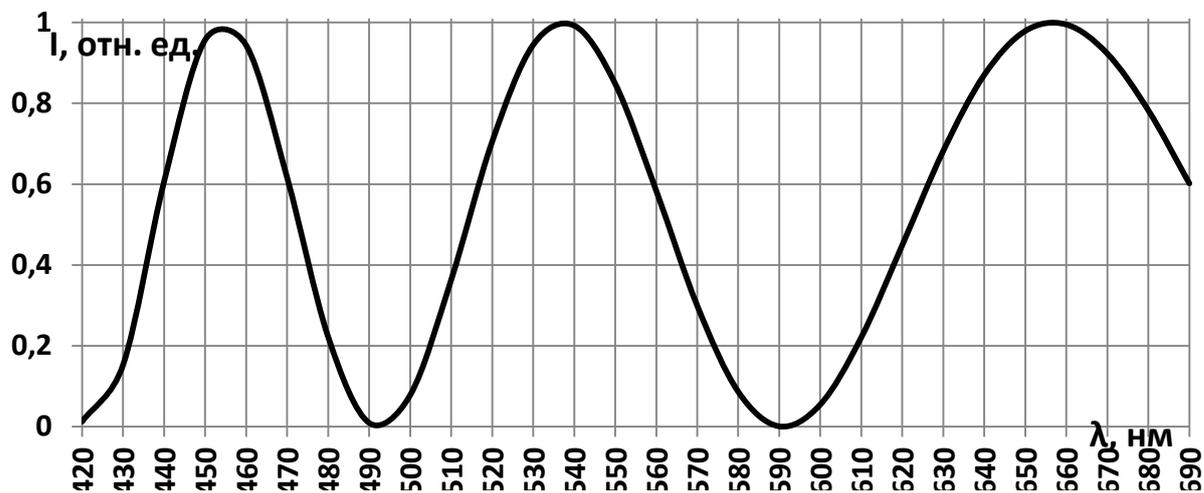


Рис.4.3. Распределение интенсивности пропускания нормально падающего луча света от длины волны. Скрещенные поляроиды. Толщина слоя ЖК 19,7 мкм.

На основе нематической ячейки ЖК с толщиной слоя ЖК $L=21,45$ мкм предложен светофильтр, который в параллельных поляризаторе и анализаторе, при плоскости ориентации директора ЖК на 45° к поляризатору, дает распределение интенсивности пропускания нормально падающего луча света от длины волны, аналогичное приведенному на рис.4.3.

В сочетании с описанными выше светофильтрами удобно использовать линзу ЖК (рис.4.4), предназначенную для поляризованного света. Плоскость директора ЖК в ней ориентирована поперек плоскости поляризации падающего луча света. Линза представляет собой ячейку ЖК прямоугольных очертаний (параллелепипед). Посередине параллелепипеда расположена воображаемая плоскость симметрии линзы, параллельная плоскости поляризации падающего нормально луча света. Поры матрицы должны быть соответствующего сечения.

ЖК линза, если разность показателей преломления возрастает квадратично от плоскости симметрии линзы (имеет форму параболы), то

соответствует цилиндрической рассеивающей линзе. Если разность показателей преломления убывает квадратично от плоскости симметрии линзы (имеет форму параболы), то соответствует цилиндрической собирающей линзе. Для линз ЖК, аналогичных цилиндрическим, актуален тот же рис.4.2, но вместо радиуса линза на горизонтальной оси следует подразумевать полуширину линзы (расстояние от плоскости симметрии линзы).

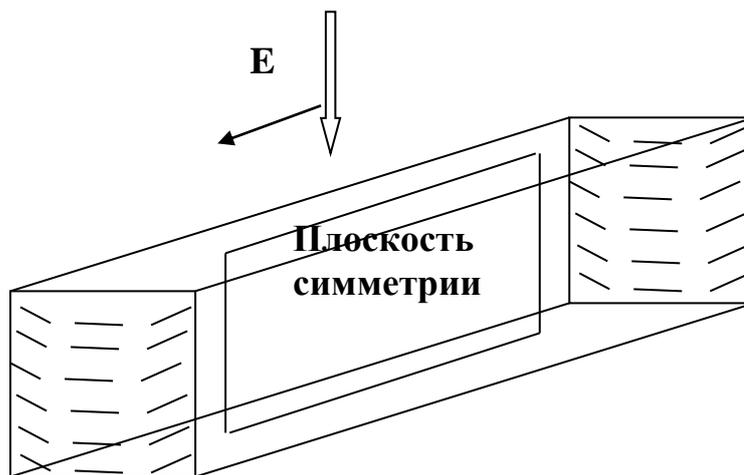


Рис.4.4. Линза ЖК. Оптически аналогична стеклянной цилиндрической линзе с плоскостью симметрии, параллельной плоскости поляризации падающего луча

Луч света падает нормально, поляризован перпендикулярно плоскости директора ЖК, пройдет линзу, сфокусируется, как и для стеклянной цилиндрической линзы. Квазикруговой фронт волны фокусируется в центре окружности. Фотоприемный элемент нитевидный, расположен на фокусном расстоянии, совмещен с осью цилиндрического фронта волны, то есть ориентирован параллельно плоскости поляризации луча света.

Можно принимать сразу три световых луча, соответствующих цветам RGB. Поскольку показатель преломления необыкновенный у нематического ЖК зависит от длины волны света (дисперсия), то фокусные расстояния будут немного различаться для разных RGB лучей (хроматические aberrации). Соответственно, нитевидные фотоприемники можно расположить в соответствующих этим трем цветам фокусах. Таким образом, одна пара матрицы, содержащая светофильтр (ЖК ячейку), линзу (ЖК ячейку) и, на

фокусных расстояниях, три фотоприемника, заменяет сразу три монохромных приемных элемента.

Если сразу позади линзы (слоя ЖК) разместить зеркально отражающую поверхность, то луч света, пройдя сквозь слой нематического ЖК, отразится и пройдет еще раз. Таким образом, фокусное расстояние будет такое же, как у слоя ЖК вдвое большей толщины на сквозное пропускание, как было рассмотрено выше. То есть, например, слой ЖК в 5 мкм в зеркальной линзе даст такое же фокусное расстояние, как слой в 10 мкм в линзе на просвет.

Фотоприемник в таком случае располагается, естественно, перед линзой. Таким образом, диафрагмирующая глубина поры (ограничивающая угол падения луча света на линзу) может быть больше фокусного расстояния.

В следующей части исследованы диэлектрические свойства ЖК ячеек с различными типами распределения директора ЖК по толщине ячейки и различными двумерными распределениями краевых углов по апертуре электрооптического устройства. Структура с двумерным распределением ориентации ЖК по площади устройства и учетом отклонения ориентации от идеальной планарной или гомеотропной приведена на рис.4.5.

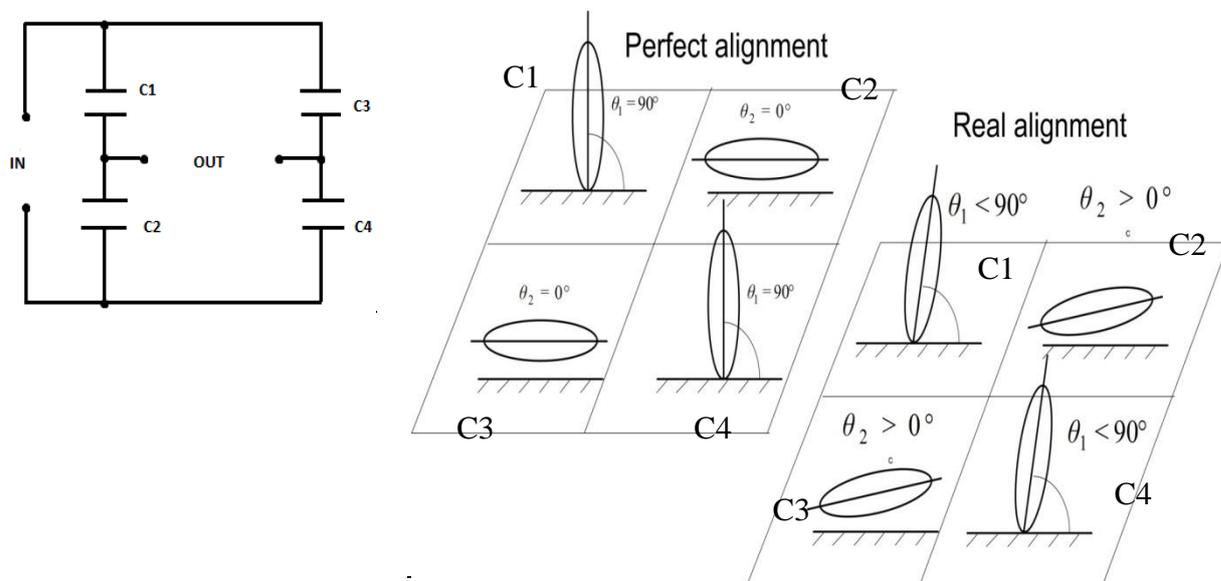


Рис.4.5. Слева: электрическая схема комбинированной ЖК ячейки. Справа: Матричная ячейка с комбинированной ориентацией.

Разработана модель, описывающая диэлектрические характеристики ЖК устройства с пространственно неоднородной ориентацией ЖК и позволяющая

оценить и измерить возникающую из-за этого неоднородность электрического поля. Типичными примерами таких систем являются матричные ЖК устройства отображения и обработки информации, емкостные датчики температуры и другие устройства. Типичная зависимость компонент диэлектрической проницаемости нематического ЖК ε_{\parallel} и ε_{\perp} и ее анизотропии $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ хорошо известна из литературы. Величина ε измеряется мостовым методом. Для ее описания обычно используется теория Майера-Мейера.

Зависимость $\varepsilon^{\text{eff}}(\theta)$ в ЖК ячейке под действием электрического поля или с произвольными граничными условиями (двумерное распределение угла преднаклона ЖК директора θ) имеет вид:

$$\varepsilon^{\text{eff}}(\theta) = \left(\varepsilon_{\perp}^2 \sin^2 \theta + \varepsilon_{\parallel}^2 \cos^2 \theta \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

а зависимость эффективной величины диэлектрической анизотропии $\Delta\varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1, \theta_2)$ имеет вид:

$$\Delta\varepsilon^{\text{eff}} = \varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1) - \varepsilon^{\text{eff}}(\theta_2) \quad (4.2)$$

Введем понятие диэлектрического отклика D_r (dielectric response) в пространственно неоднородной анизотропной среде, пропорционального $\Delta\varepsilon^{\text{eff}}$ и обратно пропорционального сумме компонент диэлектрической проницаемости:

$$D_r = \frac{\varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1) - \varepsilon^{\text{eff}}(\theta_2)}{\varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1) + \varepsilon^{\text{eff}}(\theta_2)} \quad (4.3)$$

Например, для конструкции термоэлектрического датчика, разработанного в данной работе, параметр D_r представляет собой отношение амплитуд выходного и входного сигналов:

$$V_{\text{out}} = \frac{\varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1) - \varepsilon^{\text{eff}}(\theta_2)}{\varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1) + \varepsilon^{\text{eff}}(\theta_2)} V_{\text{in}} \quad (4.4)$$

Упомянутые в формуле (4.2) величины ε^{eff} вычисляются по формуле (4.1), при этом при угле $\theta=0$, $\varepsilon^{\text{eff}}(\theta) = \varepsilon_{\parallel}$, а при угле $\theta=90^\circ$, $\varepsilon^{\text{eff}}(\theta) = \varepsilon_{\perp}$. Таким образом, для пары идеально (гомеотропно и планарно) ориентированных ЖК ячеек $\Delta\varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1, \theta_2) = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ и тогда $\Delta\varepsilon^{\text{eff}} = \Delta\varepsilon$. На рис.4.6 показана зависимость $\Delta\varepsilon^{\text{eff}}$ от краевых углов в ЖК ячейках с однородным распределением директора ЖК.

Исследовано влияние краевых углов в ЖК ячейке на ее диэлектрические свойства. Изложены результаты моделирования ориентационных и ориентационно-диэлектрических свойств ЖК ячеек с произвольными краевыми углами и различными типами распределения директора ЖК для случая нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$. Установлено, что ε^{eff} остается близка к ее значению для случая $K_{33}/K_{11}=1$ для многих смоделированных распределений, например Нуб90 с краевыми углами $\theta_1=15^\circ$ и $\theta_2=0^\circ$, обозначаемые как Н15/0, а также Н30/0, Н30/15, Н45/15, Н45/30, Н60/30, Н60/45, Н75/45, Н75/60, Н90/60, Н90/75, а также для S-распределений S15/0/15, S30/0/30, и для В-распределений В60/90/60, В75/90/75.

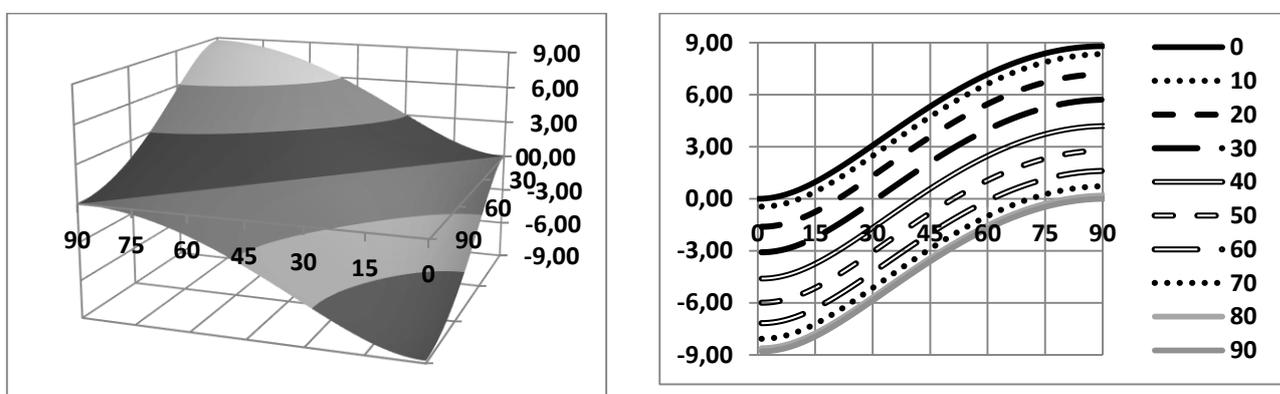


Рис.4.6. $\Delta\varepsilon^{\text{eff}}(\theta_1, \theta_2)$ $\varepsilon_{//}=14,4$, $\varepsilon_{\perp}=5,6$ (ЖК-1289 при 23°C).

В следующей части предложено применить в оптическом устройстве ряд новых ЖК-композитных материалов. Рассмотрены в данной работе ЖК-композиты двух типов: с цилиндрической ЖК нитью и с цепочкой ЖК капель.

Для получения ЖК-композита с цилиндрической ЖК нитью использован поликапролактон в качестве матрицы ЖК-композита. По оригинальной методике были получены ЖК-композиты. Полимерную композитную нить формировали, сочетая одноосные и торсионные деформации. Охлаждением поликапролактона до комнатной температуры фиксировали ЖК-композит. В работе предложен способ изготовления твист-структуры на основании полученных экспериментальных результатов изготовления цилиндрической ЖК нити.

Для получения ЖК-композита с цепочкой капель в качестве ЖК была использована нематическая смесь ЖК-1282 ($T_{CN} = 253,1$ К; $T_{NI} = 335,1$ К), которая состоит из алкоксицианбифенилов (80% массовой доли), эфира Демуса (16%) и эфира Грея (4%), производства ФГУП «НИОПИК» (РФ). Боросилоксан получен по методике, адаптированной для данной задачи из патента РФ. Для формирования микрокапель ЖК в силиконовой матрице применен оригинальный подход.

Предлагаемая в работе ЖК структура, для которой и разработан вышеописанный ЖК-композит, представляет собой матрицу из цилиндрических пор с нитями вышеописанного композита в них.

ЖК-композиты, где в качестве функционального элемента оптического или электрооптического устройства используются капли ЖК известны достаточно давно. В связи с миниатюризацией электронных устройств развитие получили подходы, где рабочим элементом устройства является единичная микрокапля ЖК, заключенная в поддерживающую матрицу. В качестве такой матрицы часто используются силиконовые материалы, благодаря их оптической прозрачности, доступности и технологичности. К новым материалам, где в качестве работающего элемента используется единичная капля относятся микрорезонаторы, работающие на эффекте шепчущей галереи (Whispering-gallery mode (WGM)). Волны шепчущей галереи - физический эффект, состоящий в распространении волн вблизи изогнутых границ раздела двух сред.

Смоделированные оптические свойства ЖК-композитов с цилиндрическими, сферическими, а также с деформированными ЖК структурами, и в том числе с центральным телом в них, приведены ранее. Микроскопические исследования показали, что композиты имеют выраженную двухфазную природу, где ЖК-фаза заключена в каплях размером от единиц до десятков микрон, причем в зависимости от условий приготовления можно обеспечить капли ЖК равного (заданного) размера и расположенные с равными интервалами в одну линию.

Предложена (рис.4.7) дифракционная структура на основе капель ЖК в композите. Для рандомизированного распределения пропускающих свет отверстий с расположенными соосно с ними каплями ЖК в композите, фазы волн нескоррелированы, распределения накладываются аддитивно, имеем усиленную в N раз дифракционную картину от одной структурной единицы.

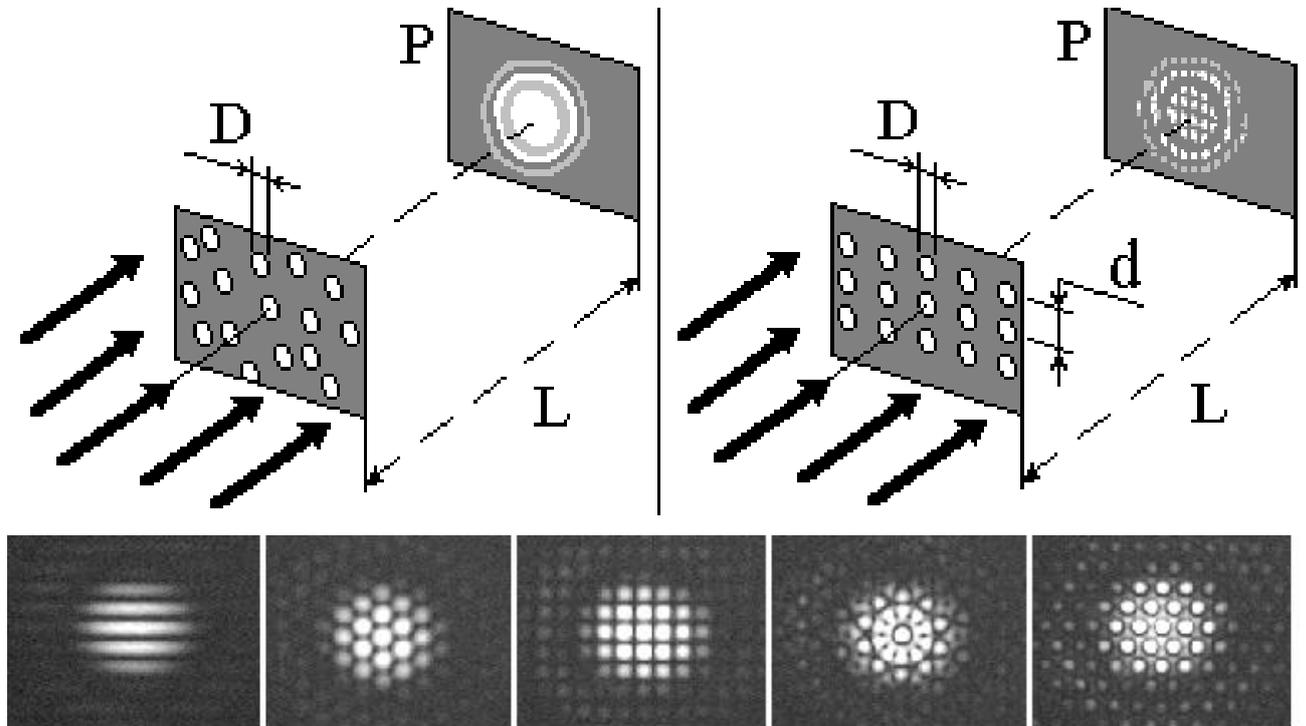


Рис.4.7. Дифракционная картина от системы отверстий.

Для упорядоченной структуры (число отверстий N увеличивается слева направо от 2 до 6, а расположены они, начиная с $N = 3$, в вершинах правильных N -угольников) дифракционная картина показана на рис.4.7 внизу.

Описанное в литературе преобразование той части светового потока, которая падает по касательной к капле ЖК, так называемый Whispering-gallery mode (WGM) эффект, приведет к формированию суперпозиции дифракционных структур, соответствующих различным длинам волн света, обусловленным WGM эффектом. Остальная часть светового потока пройдет через капли ЖК в соответствии с рассмотренным в предыдущей части работы прохождением луча света через сферические структуры ЖК и тоже сформирует соответствующую дифракционную картину. Многолучевая многочастотная система

дифракционных максимумов может быть использована в оптическом манипулировании ультрамелкими частицами.

Регулирование дифракционной картины можно осуществлять, вводя в выходящий из матричной структуры световой поток светофильтры с заданными полосами полного или частичного поглощения и поляризатор под заданным углом к поляризации исходного света.

Затем предложено использовать ЖК-композит поликапролактон-7ЦБ для регулирования интенсивности и поляризации луча света, проходящего через матричное регулирующее устройство. Для регулирования интенсивности и поляризации луча света предложено использовать матричные твист-структуры, цилиндрические поры которых содержат нити ЖК-композита, содержащего по оси нити цилиндрический домен ЖК с постоянным диаметром (рис.4.8) и приповерхностной ориентацией, задаваемой неравномерным вытягиванием нити при изготовлении. Твист-закрутка ЖК обеспечивается перекручиванием нити ЖК-композита на заданный угол при изготовлении. При прохождении луча вдоль ЖК цилиндра будет поворот плоскости поляризации, как в твист-ячейке. Угол наклона директора ЖК отсчитывается от основания ячейки (торца нити) и зависит от удлинения при вытягивании.

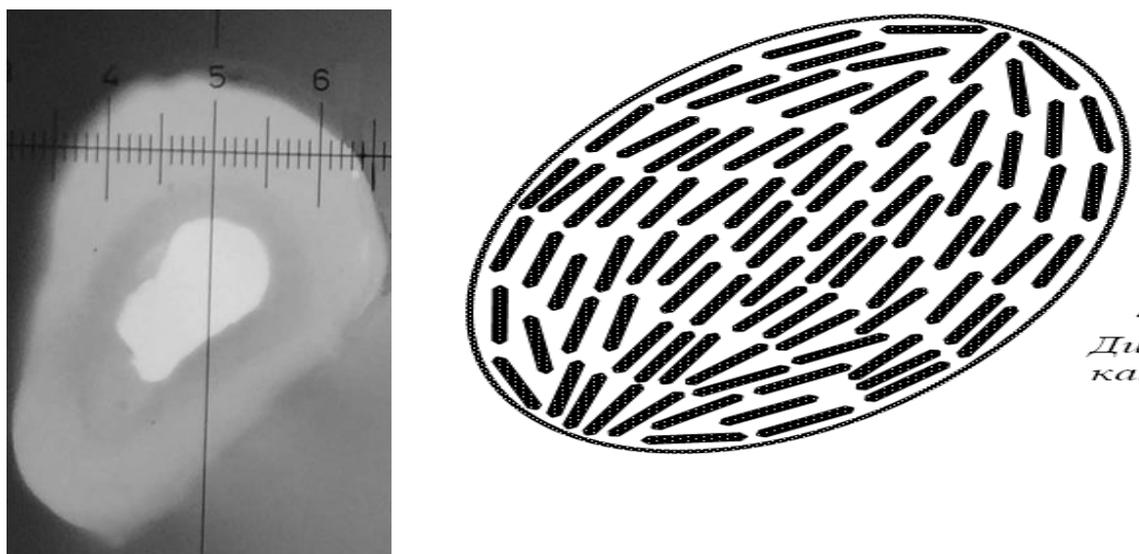


Рис. 4.8. Слева: микроскопические снимки в скрещенных поляризаторах образца ЖК-композита. Поперечное сечение. Цена деления составляет 10 мкм. Справа: Поперечное сечение ЖК цилиндра. Ориентация ЖК.

Если задать градиент относительного удлинения при вытягивании, то есть различные участки композитной нити вытягивать различно, то цилиндрическая ЖК ячейка внутри нити будет по распределению полярного угла наклона директора аналогична рассмотренным выше ячейкам ЖК с неоднородным распределением директора, но при этом иметь линейно изменяющийся по длине нити угол закрутки директора.

На выходных торцах пор с твист-структурами размещаются анализаторы, совпадающие с плоскостью поляризации выходящего света. Прилагая потенциал к прозрачным электродам на торцах, регулируем интенсивность пропускания через твист-ячейки. Тем самым регулируем уровень освещенности элементов дифракционной решетки. Матричные элементы располагаются блоками, один из вариантов на рис.4.9.

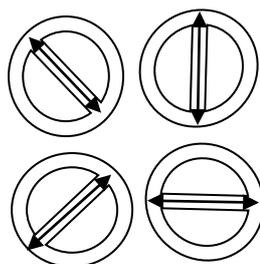


Рис.4.9. Блок из четырех элементов матрицы твист-ячеек с различной поляризацией луча на выходе, благодаря различному углу твист-закрутки.

Таким образом, можно регулировать как интенсивность, так и поляризацию прошедшего света. Выполнены расчеты пропускания для различных значений ряда параметров матричной твист-структуры.

Предложена структура управляемого полем оптического элемента (рис.4.10), состоящего из описанных в Главе 3 ячеек ЖК, одна сторона которых покрыта ориентантом, а другая не обладает заметными ориентирующими свойствами. Фактически, ячейки объединены в слой ЖК с управляемыми ориентационно-оптическими свойствами. Управление осуществляется парными прозрачными электродами, расположенными, как показано на рис.4.10, на верхней и нижней стороне каждого субэлемента. Как показано в Главе 3, необходимы очень малые управляющие поля для обеспечения в слое ЖК разности фаз Φ в пределах до $\pi/2$, практически представляется возможным при

разности фаз Φ в указанных пределах между краями оптического элемента и при различии Φ на смежных субэлементах порядка $\pi \cdot 10^{-2}$ пренебречь разницей в напряженности поля в смежных субэлементах и считать, что они не будут существенно искажать свои оптические характеристики.

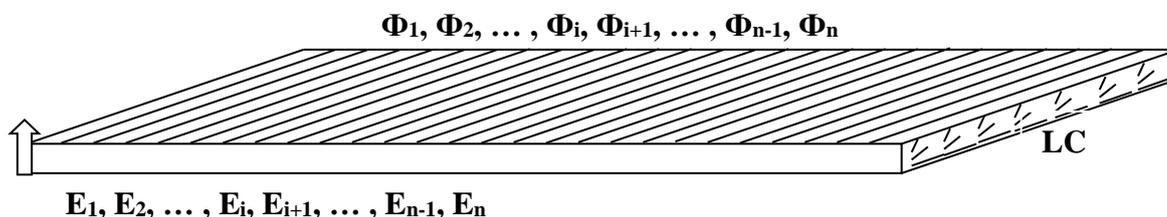


Рис.4.10. Структура оптического элемента, состоящего из вышеописанных ячеек ЖК. Ячейки объединены в слой ЖК. Управление парными прозрачными электродами, расположенными на верхней и нижней стороне каждого субэлемента и создающими в субэлементах напряженность поля $E_1, E_2, \dots, E_i, E_{i+1}, \dots, E_{n-1}, E_n$ для обеспечения разности фаз $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \Phi_{i+1}, \dots, \Phi_{n-1}, \Phi_n$ между краями в пределах до $\pi/2$.

Поэтому предложено, как отмечено выше, объединить субэлементы в слой ЖК в объеме одной достаточно протяженной ячейки.

Для дисплея, индивидуально распределяющего визуальный информационный поток, разработаны необходимые конструктивные решения. Если оснастить зрителя (каждого) небольшим индивидуальным беспроводным маяком, размещаемым не очень далеко от органов зрения, то есть, например, на волосах, на воротнике, и т.д., то можно оснастить дисплей средствами, определяющими расстояние и направление на каждый из значительного числа маяков. Тогда в направлении каждого из зрителей можно направлять световой поток от дисплея так, чтобы в ограниченной по размерам области вокруг маяка, в каждой точке этой области, проходил световой поток от каждого из пикселей дисплея. Тогда зритель будет хорошо видеть изображение на дисплее.

Следовательно, необходимо решить две задачи: расширить углы отклонения луча до 40-60 градусов к нормали экрана, чтобы зрители могли располагаться многочисленно и не загораживать экран друг другу; расширить световой луч, прошедший через элемент дисплея, чтобы зритель одновременно видел лучи с разных краев дисплея, то есть его весь.

Управляемый преломляющий элемент представляет собой изображенный на рис.4.10 односторонне ориентированный слой ЖК, с той лишь разницей, что управляющие электроды не в виде длинных узких полос, а в виде прямоугольников, то есть элемент подобен микродисплею, разбит на маленькие квадратные области с управляемыми полем ориентационно-оптическими свойствами. Фазовая задержка распределена мелкими ступеньками так, что луч света преломляется как на плоской поверхности, склоненной под углом к направлению луча.

На рис.4.11 изображен принцип отклонения луча с использованием управляемого преломляющего элемента. Луч света 1 проходит через односторонне ориентированную ячейку 2, на торцах которой управляющие электроды, поляризатор и анализатор. Она регулирует интенсивность пропускания. Затем отрегулированный по интенсивности луч света поступает на управляемый преломляющий элемент 3. Под влиянием управляющего поля, он отклоняет (преломляет) луч света на заданный угол. Затем луч света, границы которого (он имеет некоторое заметное расширение, так как на разных краях преломляющего элемента преломляется на неодинаковый угол) показаны на рис.4.11 как 4 и 5, распространяется далее и достигает в области нахождения зрителя 6, с учетом расширения луча, ширины 7.

Важнейшее практическое значение имеют количественные оценки. При расстоянии до зрителя 1 м, отклонение луча от нормали (полуширина области наблюдения зрителем данного пикселя) может быть 15 см, и размеры области составят 30 см (сторона квадратной области наблюдения зрителем данного пикселя). При этом его глаза должны находиться в пределах строго определенной области шириной 30 см, чтобы увидеть именно данную область экрана. Частота переключения односторонней ячейки 100 Гц – 1 кГц. При частоте кадров 25 кадров в секунду (как в кинофильмах) можно обслуживать от нескольких до нескольких десятков зрителей, передавая каждому из них индивидуальное изображение. То есть каждый зритель будет иметь свой пульт управления телевизором или клавиатуру компьютера (звук через наушники) и

пользоваться дисплеем как своим, но находящимся на некотором увеличенном расстоянии от него.

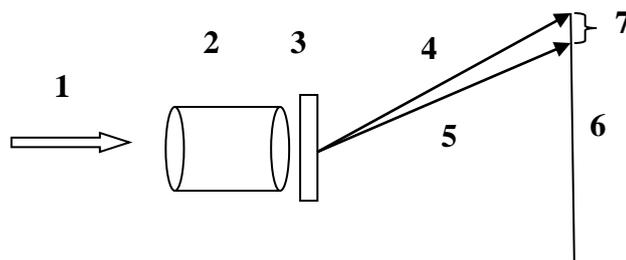


Рис. 4.14. Принцип отклонения луча с использованием управляемого преломляющего элемента. Луч света **1** проходит через односторонне ориентированную ячейку **2**, на торцах которой управляющие электроды, поляризатор и анализатор. Она регулирует интенсивность пропускания. Затем отрегулированный по интенсивности луч света поступает на управляемый преломляющий элемент **3**. Под влиянием управляющего поля, он отклоняет (преломляет) луч света на заданный угол. Затем луч света, границы которого (он имеет некоторое заметное расширение, так как на разных краях преломляющего элемента преломляется на неодинаковый угол) показаны на рисунке как **4** и **5**, достигает зрителя **6**, расширяясь до ширины **7**.

Для увеличения угла расширения луча, а также для увеличения максимальных углов его отклонения, следует использовать линзу ЖК. Рассеивающая линза ЖК расширит световой поток от одного элемента до требуемого угла расхождения крайних его лучей, чтобы осветить им область достаточной ширины вокруг индивидуального маяка зрителя. Линза может регулироваться под необходимые требования. На рис.4.12 изображен дополненный управляемой ЖК линзой элемент дисплея.

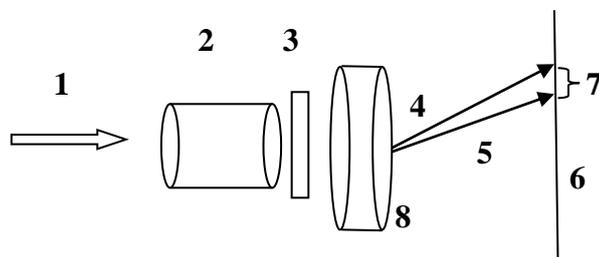


Рис. 4.12. Элемент дисплея с использованием управляемого преломляющего элемента. Луч света **1** проходит через ячейку **2**, на торцах которой управляющие электроды, поляризатор и анализатор. Она регулирует интенсивность пропускания. Затем отрегулированный по интенсивности луч света поступает на управляемый преломляющий элемент **3**. Под влиянием управляющего поля, он отклоняет (преломляет) луч света на заданный угол. Затем луч света, границы которого (он имеет некоторое заметное расширение,

так как на разных краях преломляющего элемента преломляется на неодинаковый угол) показаны на рисунке как **4** и **5**, поступает к зрителю **6**, освещая с учетом расширения луча область **7**. Управляемая линза ЖК **8** расширяет луч.

Рассеивающая ЖК линза эквивалентна сферической стеклянной, как показано выше. При этом расширение луча резко увеличится и обеспечит освещение лучом области шириной в несколько раз меньше, чем расстояние до нее (до зрителя), то есть с одного-двух метров расстояния будет освещена область в 30 сантиметров диаметром. Это позволяет зрителю в двух метрах от экрана располагать индивидуальный маяк на расстоянии несколько меньше 30см от органов зрения, что в целом достаточно удобно.

Таким образом, поставленная задача решена и технически возможно обеспечить группу зрителей индивидуальным изображением на экране для каждого зрителя. Также можно использовать элементную базу на основе ячейки ЖК с одной парой управляющих электродов.

Управляемый элемент изображен на рис.4.13. В его состав входит ячейка с нематическим жидким кристаллом. Регулируя прилагаемым к ячейке полем ориентационное распределение директора ЖК, тем самым регулируем угол, на который преломляется луч света, падающий на ячейку под углом падения, обозначенным на рис.4.13 как γ .

Преломленный луч характеризуется углом преломления. На рис.4.13 он обозначен для одного случая как ϕ , для другого он не отличается от угла падения γ и не обозначен никаким специальным знаком. На рис.4.13.а, то есть сверху слева, показаны оба варианта хода луча и обозначена плоскость поляризации падающего луча света. Он поляризован вертикально в плоскости рисунка, падает луч горизонтально в плоскости рисунка. На рис. 4.13.б, то есть сверху справа, директор ЖК в ячейке, показанный горизонтальными штрихами, ориентирован параллельно ходу луча, параллельно его плоскости поляризации, горизонтально в плоскости рисунка. При этом поле отключено. Такая ориентация директора ЖК в отсутствие поля достигается тем, что на двух противоположных друг другу сторонах ячейки ЖК нанесено покрытие с

микрорельефом, обеспечивающее необходимый азимутальный угол планарно ориентированного ЖК. Обе покрыты ориентантом и снабженные прозрачными электродами поверхности ячейки ЖК параллельны плоскости рисунка и на рис.4.13 не показаны.

Показатель преломления ЖК обыкновенный n_o подобран равным показателю преломления прозрачного изотропного материала, через который луч идет до входа в ячейку. В таком случае луч идет по прямой и достигает криволинейной поверхности, на поверхности (линзы) он преломится и выйдет. На рис.4.13.в, то есть снизу слева, показано преломление луча, угол его падения на поверхность линзы обозначен α , угол преломления луча обозначен β .

Если поле включено (оно перпендикулярно плоскости рисунка) и его напряженность настолько велика, что директор ЖК в плоскости рисунка (в плоскости падения и преломления луча света) ориентирован по полю, перпендикулярно к первоначальному направлению директора, то, как показано на рис. 4.13.г, то есть снизу справа, луч преломится в соответствии с показателем преломления ЖК необыкновенным n_e . Затем он дойдет до поверхности линзы, преломится на ней и выйдет.

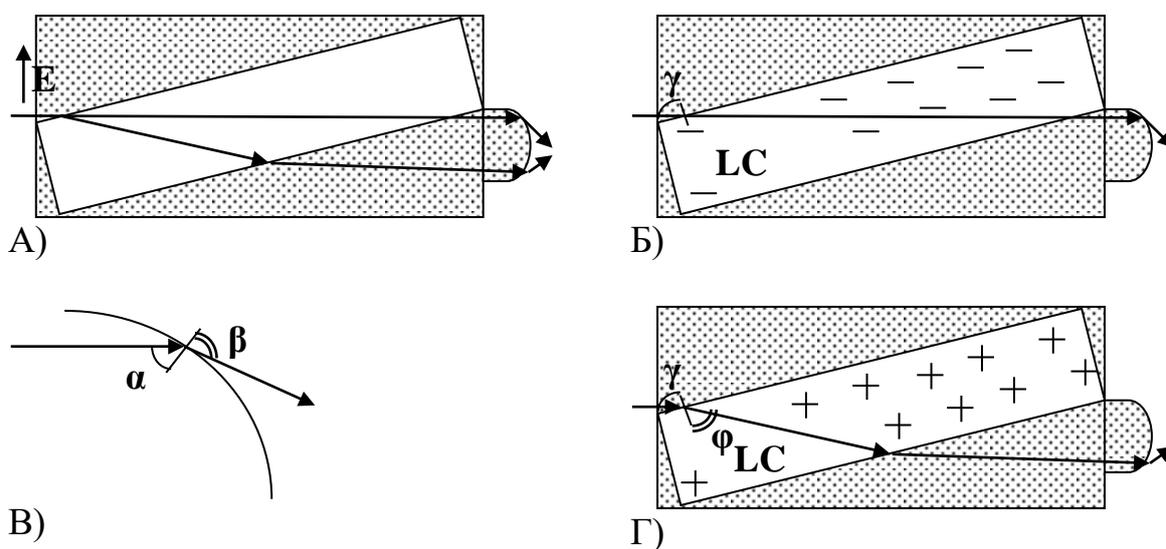


Рис. 4.13. Регулятор вертикального угла выхода луча света.

Регулируя полем ориентацию директора ЖК, обеспечим выход луча через точку поверхности линзы, расположенную между точками выхода

рассмотренных выше крайних лучей и, соответственно, обеспечим угол преломления выходящего луча в диапазоне между крайними значениями.

Этот диапазон и есть вертикальный диапазон углов, в пределах которого зрители могут увидеть изображение на экране.

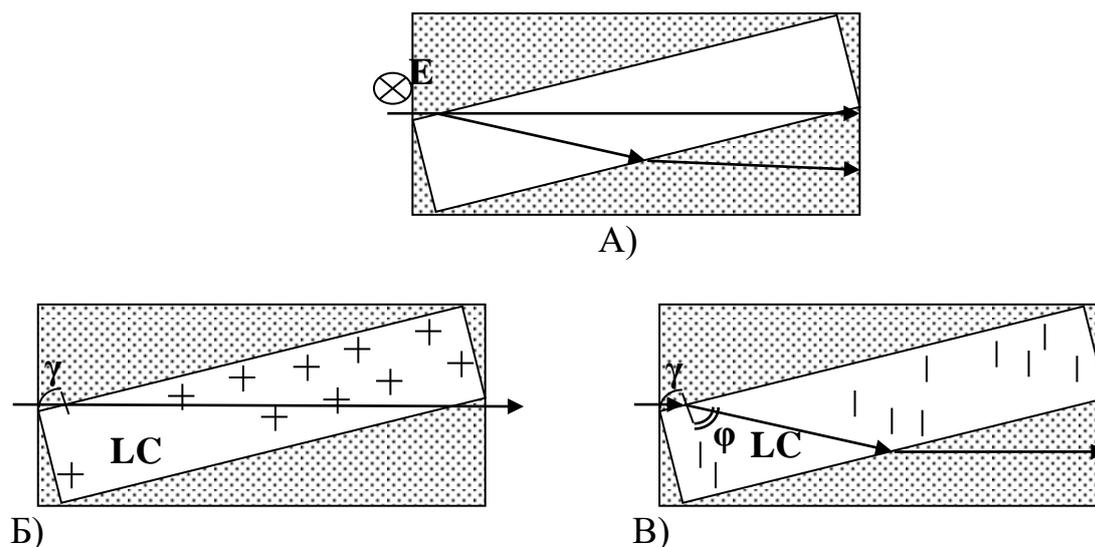
Там, где к поверхности линзы приближается луч, не преломившийся, то есть как на рис. 4.13.б, зачерним (покроем поглотителем), чтобы пользоваться для формирования изображения лучом, преломившимся в соответствии с $n_e \geq n_e^{\text{eff}} > n_o$.

Управляемый элемент – регулятор горизонтального угла отклонения луча изображен на рис.4.14. На рис.4.14.а, то есть сверху, показаны оба варианта хода луча и обозначена плоскость поляризации падающего луча света. Он поляризован горизонтально перпендикулярно плоскости рисунка, падает луч горизонтально в плоскости рисунка. На рис.4.14.б, то есть в среднем ряду слева, директор ЖК в ячейке ориентирован параллельно плоскости поляризации луча, перпендикулярно его ходу, горизонтально, перпендикулярно плоскости рисунка. При этом поле включено и обеспечивает полную переориентацию директора ЖК в плоскости преломления луча. Такая ориентация директора ЖК в поле достигается тем, что на двух противоположных друг другу сторонах ячейки ЖК нанесено покрытие с микрорельефом, обеспечивающее необходимый азимутальный угол планарно ориентированного ЖК. Обе покрытые ориентантом и снабженные прозрачными электродами поверхности ячейки ЖК параллельны плоскости рисунка и на рис.4.14 не показаны. Показатель преломления ЖК обыкновенный n_o подобран равным показателю преломления прозрачного изотропного материала, через который луч идет до входа в ячейку. В таком случае луч идет по прямой.

Если поле выключено, директор ЖК в плоскости рисунка (в плоскости падения и преломления луча света) ориентирован вертикально в плоскости рисунка, перпендикулярно к плоскости поляризации луча и к его ходу, то, как показано на рис.4.14.в, то есть в среднем ряду справа, луч преломится в соответствии с показателем преломления ЖК необыкновенным n_e .

Регулируя полем ориентацию директора ЖК, обеспечим выход луча через точку поверхности линзы, расположенную между точками выхода рассмотренных выше крайних лучей. Там, где к поверхности выхода луча приближается луч, не преломившийся, то есть как на рис.4.14.б, зачерним (покроем поглотителем), чтобы пользоваться для формирования изображения лучом, преломившимся в соответствии с $n_e \geq n_e^{eff} > n_o$.

На рис.4.14.в, то есть внизу, показаны оба элемента рядом. Слева регулятор горизонтального угла отклонения луча, рассмотренный на рис.4.14.а-в, справа регулятор вертикального угла отклонения луча, рассмотренный на рис.4.13. Причем регулятор вертикального угла отклонения луча показан в другой проекции, чем на рис.4.13. Для регулятора вертикального угла плоскость рис.4.14.в можно считать горизонтальной плоскостью углов дисплея (на рис.4.13 плоскость рисунка можно считать вертикальной плоскостью для углов работы дисплея). Как видно на рис.4.14.в, в зависимости от регулятора горизонтального угла отклонения (расположен в левой части рис.4.14.в) луч света проходит через регулятор вертикальных углов дисплея (расположен в правой части рисунка) и попадает на линзу, преломляясь в диапазоне углов горизонтальных.



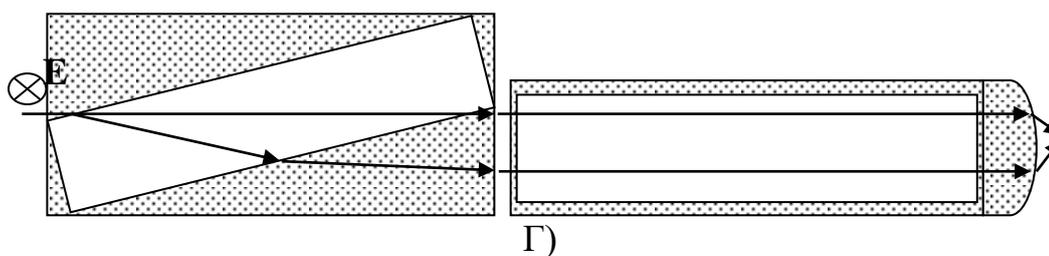


Рис.4.14. Регулятор горизонтальных углов выхода луча света.

Важнейшее практическое значение имеют количественные оценки. Угол, на который может быть отклонен луч, оценен количественно для ячейки ЖК, с показателями преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.65$. Угол падения луча γ принят равным 76° , тогда угол преломления φ равен 62° . Луч не преломленный идет горизонтально, луч, преломленный под углом преломления 62° , отклоняется в плоскости рис.4.13 вниз на 14° .

Для преломления на линзе, угол падения α принят равным 41° , тогда угол преломления β равен 80° (вторая среда воздух). Для точки падения луча горизонтального на рис.4.13 это означает, что нормаль к поверхности линзы образует 41° к горизонтали, тогда преломленный линзой луч образует к горизонтали угол 39° (отсчет угла вниз в плоскости рис.4.13). Для точки падения луча преломленного вниз на 14° на рис.4.13 это означает, что нормаль к поверхности линзы образует 55° к горизонтали, тогда преломленный линзой луч образует к горизонтали угол 25° (отсчет угла вверх в плоскости рис.4.13).

Для горизонтальных углов получаем 39° вправо и влево.

Примерные размеры элементов пикселя на рис.4.15.

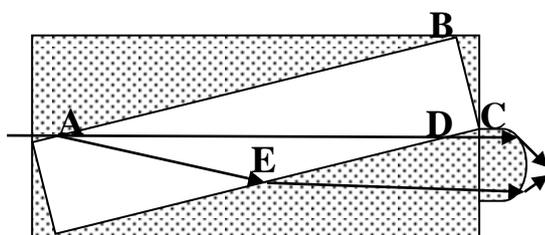


Рис.4.15. Отрезки, длины которых количественно оценены.

Если поперечные размеры линзы между крайними точками выхода лучей около 100 мкм , то на рис.4.13 толщина слоя ЖК (отрезок BC) в ячейке 200 мкм ,

расстояние между крайними точками выхода луча из ячейки (отрезок ED) 400 мкм, сторона ячейки не менее (отрезок АВ) 800 мкм. Габарит пикселя по вертикали около 300 мкм.

Для проектора, управляемый преломляющий элемент аналогичен описанному выше для дисплея (любому из двух вариантов). На рис.4.16 изображен принцип проецирования с использованием управляемого преломляющего элемента. Отношение максимального угла отклонения луча к угловой ширине отклоненного луча задает, соответственно, отношение полуширины освещенного проекционного экрана к размеру пикселя изображения. Удвоив эту величину, получим максимальное число строк (и столбцов) для прямоугольного управляемого преломляющего элемента, освещающего также прямоугольную область экрана. Следовательно, на большой экран будет приходиться ограниченное число проекционных элементов, каждый из которых обеспечивает построчную развертку (как в экранах на электронно-лучевой трубке) изображения ограниченных размеров на выделенной для него части экрана.

Для ограничения угла расширения луча, в том числе для максимальных углов его отклонения, следует использовать линзу (как вариант, линзу ЖК). Луч будет коллимирован. Линза ЖК может регулироваться под необходимые требования.

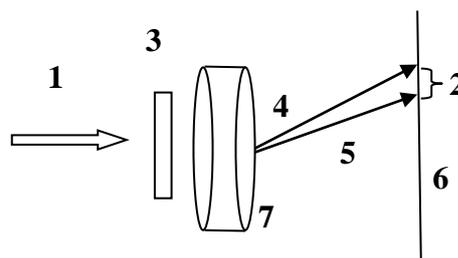


Рис.4.16. Принцип проецирования с использованием управляемого преломляющего элемента. Луч света **1** проходит через управляемый преломляющий элемент **3**. Под влиянием управляющего поля, он отклоняет (преломляет) луч света на заданный угол. Затем луч света, границы которого (он имеет некоторое заметное расширение, так как на разных краях преломляющего элемента преломляется на неодинаковый угол) показаны на рисунке как **4** и **5**, падает на экран **6**, освещая с учетом расширения луча область **2**. Управляемая линза ЖК **7** коллимирует луч.

Фактически изображение формируется построчно, время пребывания луча постоянной интенсивности направленным на один пиксель определяет яркость пикселя. Проецирование одной строки осуществляется за время одного переключения ячейки ЖК от одного крайнего состояния до другого. Для аккумуляторного проектора важна энергоэффективность. Отсутствует использование поглощающих регуляторов яркости, она регулируется аддитивно (накапливается). Для увеличения потенциально достижимой контрастности, области проецирования для смежных проецирующих элементов частично перекрываются. Каждый проецирующий элемент может ни разу за время формирования кадра не осветить пиксель, и он будет иметь нулевую яркость в заданном цвете RGB палитры. В тоже время, пиксель с высокой яркостью может быть сформирован за счет многократного по продолжительности (по сравнению с обычным) временем его освещения, как одним, так и в общей сложности несколькими проекционными элементами. Таким образом, световой поток от источника света перераспределяется в соответствии с заданной яркостью пикселей.

Далее в Главе 4 описаны конструктивные решения и принципы работы многопользовательской проекционной системы.

Далее в Главе 4 описаны новые конструктивные решения и принципы обеспечения индивидуального многопользовательского стереоизображения.

В следующих частях Главы 4 описаны предложенные в данной работе светоориентируемые ячейки ЖК. Показана возможность их использования в качестве ЖК линз. Также показана их перспективность в системах отображения и обработки информации в качестве оптических затворов, пространственно-временных преобразователей света различного назначения.

Далее в Главе 4 описано применение матричных ЖК-композитов для оптического манипулирования (оптический пинцет). Показаны преимущества матричных многолучевых оптических пинцетов.

В выводах перечислены основные результаты диссертационной работы.

Выводы.

1. Разработана конструкция дисплея, в пикселях которого регулирование распределения угла наклона директора ЖК по толщине ячейки позволяет значительному числу зрителей индивидуально просматривать одновременно различный видеоряд на одном и том же экране, и проекционной системы с аналогичными возможностями.

2. Разработана конструкция энергоэкономного проектора, в элементах которого регулирование распределения угла наклона директора ЖК по толщине ячейки позволяет увеличить в два раза освещение проекционного экрана при том же энергопотреблении при средней 50%.

3. Разработаны статические линзы ЖК нового типа, фокусное расстояние которых задается приповерхностным углом директора, упругими свойствами ЖК и поперечником линзы, пригодные для применения в матричных фокусирующих системах.

4. Разработана на основе впервые примененного в оптике ЖК-композита матричная структура, регулирующая пропускаемый световой поток. ЖК-композит на основе поликапролактона обеспечивает реализацию электроуправляемого регулятора поляризации и интенсивности пропускания света, что позволяет применить его для матричной системы управления распределением интенсивности света.

5. Разработана на основе впервые примененного в оптике ЖК-композита регулирующая распределение света структура нового типа. ЖК-композит на основе борсилоксана обеспечивает реализацию регулятора пропускания света для матричной системы управления распределением интенсивности света и при освещении матричной структуры на его основе формирование суперпозиции дифракционных картин с разными длинами волн.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе решена актуальная проблема: управляемое распределение световых потоков для приборов отображения и обработки информации,

позволяющих улучшить характеристики и функциональные возможности оптических и электрооптических приборов.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

1 часть. Публикации в журналах, включенных в международные базы WoS, ISI, Scopus.

1. Dadivanyan A.K. Orientation of mesogen and hydrocarbon molecules on graphite and polyethylene crystal surfaces / A.K. Dadivanyan, Y.M. Pashinina, D.N. Chausov, V.V. Belyaev, A.S. Solomatin // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. – 2011. - V.545. – I.1. – P.159/[1383] - 167/[1391].
2. Belyaev V.V. Liquid crystal alignment on Langmuir-Blodgett organosilicon films / V.V. Belyaev, V.G. Mazaeva, M.V. Sobolevskii, I.G. Kokaulina, A.S. Solomatin // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. – 2011. - V.546. – I.1. - P.17/[1487] - 25/[1495].
3. Belyaev V.V. Properties of hybrid aligned nematic (HAN) LC layers with both fixed and unfixed boundary conditions / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. - 2015. – V.613. – I.1. - P.121 – 128.
4. Belyaev V.V. Phase retardation difference of liquid crystal cells with symmetric and asymmetric boundary conditions / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov // *Molecular Crystals & Liquid Crystals*. – 2014. - V. 596. – I.1. - P.22 – 29.
5. Belyaev V.V. Phase retardation vs. pretilt angle in liquid crystal cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov // *Optics Express*. – 2013. – V.21. – I.4. - P.4244 - 4249.
6. Belyaev V.V. Measurement of the liquid crystal pretilt angle in cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov // *Applied Optics*. – 2013. - V.52. – I.13. - P.3012 - 3019.
7. Belyaev V.V. Optical Properties of Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells with Different Pretilt Angles / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, A.D. Kurilov,

D.N. Chausov, V.G. Mazaeva, V.M. Shoshin, Y.P. Bobylev // *Applied Optics*. -2014. - V.53. – I.29. - P.H51 - H57.

8. Belyaev V.V. Light propagation through composite heterophase objects with liquid crystal material / V. Belyaev, A. Gorbunov, A. Solomatin, D. Suarez // *Procedia Computer Science*. – 2017. - V.103. - P.556 - 561. DOI: 10.1016 / j.procs.2017.01.060

9. Оганесян Д.Л. Управление излучением в среднем инфракрасном диапазоне длин волн с помощью жидкокристаллической фазовой решетки / Д.Л. Оганесян, А.Л. Маргарян, Н.Г.Акопян, В.М.Арутюнян, В.В.Беляев, А.С.Соломатин // *Известия НАН Армении: Физика*. – 2015. - Т.50. - №1. - С.74 - 84.

10. Беляев В.В. Ориентационные и оптические свойства слоев жидкого кристалла с одной ориентирующей и одной неориентирующей поверхностью / В.В. Беляев, А.С. Соломатин // *Жидкие кристаллы и их практическое применение*. – 2014. - Т.14. - №2. - С.4 - 20.

11. Соломатин А.С. Ориентационные и оптические свойства доменов жидкого кристалла с центральной ориентирующей и внешней неориентирующей поверхностью // *Жидкие кристаллы и их практическое применение*. – 2016. - Т.16. - №3. - С.39 - 48.

12. Беляев В.В. Оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек при различных углах падения света / В.В. Беляев, А.С. Соломатин // *Оптический Журнал*. – 2015. - Т.82. - №1.- С.41 - 48.

13. Belyaev V. Optical properties of composite heterophase objects with liquid crystal material for different display / V. Belyaev, A. Solomatin, D.Chausov D. Suarez, N. Smirnova, Y. Kuleshova / *Journal of the Society for Information Display*. – 2017. - V.25. – I.9. - P.561 – 567. DOI: 10.1002 / jsid.606.

14. Belyaev V. Dielectric properties of liquid crystals for display and sensor applications / V. Belyaev, D.Chausov, A.Kurilov, D.Rybakov, A. Solomatin, A. Murauski, A. Murauski, V.Chigrinov // *Journal of the Society for Information Display*. – 2015. - V.23. – I.9. – P. 403 - 409. DOI: 10.1002 / jsid.352

15. Margaryan H.L. Recording of geometric phase elements based on liquid crystall polymers / H.L. Margaryan, V.K. Abrahamyan, D.L. Novhannisyanyan, N.H. Nakobyan, V.M. Aroutiounian, V.V. Belyaev, A.S. Solomatin // Journal of Contemporary Physics. - 2017. – V.52. – I.3. - P.258 - 263. DOI: 10.3103 / S1068337217030112.

16. Маргарян А.Л. Запись геометрических фазовых элементов на основе жидкокристаллических полимеров / А.Л. Маргарян, В.К. Абрамян, Д.Л. Оганесян, Н.Г. Акопян, В.М. Арутюнян, В.В. Беляев, А.С. Соломатин // Известия НАН Армении: Физика. – 2017. - Т.52. - №3. - С.353 – 360.

2 часть. Патенты РФ.

17. Патент 2491316 РФ Способ изготовления жидкокристаллической ячейки / С.Н. Нацюк, В.В. Беляев, В.Г. Мазаева, А.С. Соломатин // Заявка на Патент РФ №2011154168 от 30.12.2011 Патент РФ №2491316 от 27.08.2013. (международная заявка PCT/RU2013/000367 priority 03.05.2013, filed 29.04.2013 No. WO 2013/165277 published 07.11.2013).

18. Патент РФ № 2607454 Способ получения смеси жидкого кристалла с полимером для дисплейной техники и оптоэлектроники / Беляев В.В., Мащенко В.И., Чаусов Д.Н., Соломатин А.С. // Заявка на патент РФ № 2015107901 Приоритет от 10.03.2015. Получено положительное решение о выдаче патента (15.07.2016).

19. Патент РФ 2625121 Способ получения гомеотропно ориентированного слоя жидкого кристалла жидкокристаллического устройства / Шошин В.М., Чаусов Д.Н., Мащенко В.И., Соломатин А.С., Бобылев Ю.П., Беляев В.В. // заявка № 2015115778 . Получено положительное решение о выдаче патента (11.01.2017). Патент РФ № 2625121 от 11.07.2017

3 часть. Журналы, включенные в список ВАК.

20. Муравский Ан.Ал. Жидкокристаллический емкостной датчик температуры / Ан.Ал. Муравский, Ал.Ан. Муравский, В.В. Беляев, Д.О. Рыбаков, В.Г. Мазаева, А.С. Соломатин, Д.Н. Чаусов, В.М. Шошин, Ю.П. Бобылев // Вестник МГОУ. Серия «Физика-Математика». - 2014. - №1. – С.40 - 47.

21. Беляев В.В. Оптические свойства ЖК ячеек с произвольным краевым углом наклона директора / В.В.Беляев, А.С.Соломатин, Д.Н.Чаусов // Вестник МГОУ. Серия «Физика-Математика». – 2013. - №1. - С.32 - 40

22. Соломатин А.С. Влияние профиля микрорельефа периодических анизотропных структур на их дифракционные свойства. // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2016. - №1. - С.74 - 87. DOI: 10.18384 / 2310-7251-2016-1-74-87.

23. Соломатин А.С. Влияние деформации поперечного и продольного изгиба на оптические свойства гибридных жидкокристаллических ячеек с произвольным углом преднаклона на ориентирующей поверхности / А.С. Соломатин, В.В. Беляев // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2016. - №2. - С.37 - 50. DOI: 10.18384 / 2310-7251-2016-2-37-50.

24. Соломатин А.С. Линзы на основе жидких кристаллов с неоднородным радиальным распределением директора // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2016. - №3. - С.37 - 45. DOI: 10.18384 / 2310-7251-2016-3-37-45.

25. Соломатин А.С. Влияние пространственного ориентационного распределения директора жидкого кристалла на диэлектрические свойства ячейки ЖК / А.С. Соломатин, В.В.Беляев, Д.О.Рыбаков // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2016. - №3. - С.96 - 110. DOI: 10.18384 / 2310-7251-2016-3-96-110.

26. Соломатин А.С. Жидкокристаллические дифракционные оптические элементы с неоднородным распределением директора / А.С. Соломатин, В.В. Беляев // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2016. - №4. - С.56 - 67. DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-56-67.

27. Соломатин А.С. Ориентационные и оптические свойства сферических доменов жидкого кристалла с центральной ориентирующей и внешней неориентирующей поверхностью / А.С. Соломатин, В.В. Беляев // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия:

Физика-Математика. - 2016. - №4. - С.32 - 42. DOI: 10.18384/2310-7251-2016-4-32-42.

28. Мащенко В.И. Особенности формирования микроструктуры жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана / В.И. Мащенко, Ю.О. Шашкова, А.С. Соломатин, В.В. Беляев // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2017. - №2. - С.34 - 45. DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-34-45

29. Соломатин А.С. Особенности формирования микроструктуры и оптические свойства жидкокристаллических композитных твист-ячеек / А.С. Соломатин, В.И. Мащенко, Ю.О. Шашкова, В.В. Беляев // Вестник Московского Государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2017. - №2. - С.53 - 63. DOI: 10.18384/2310-7251-2017-2-53-63

30. Соломатин А.С. Управляемые дифракционные элементы на основе жидкокристаллических композитов / А.С. Соломатин, В.И. Мащенко, В.В. Беляев, А.Л. Маргарян, Н.Г. Акопян // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2017. - № 3. - С.76 – 83. DOI: 10.18384/2310-7251-2017-3-76-83

31. Мащенко В.И. Микроструктуры жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана. Оптические свойства дисперсной жидкокристаллической структуры на их основе / В.И. Мащенко, А.С. Соломатин, Ю.О. Шашкова, В.В. Беляев // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2017. - № 3. - С.97 – 107. DOI: 10.18384/2310-7251-2017-3-97-107

32. Соломатин А.С. Оптические свойства жидкокристаллических композитных несимметричных твист-ячеек / А.С. Соломатин, В.И. Мащенко, В.В. Беляев // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. - 2017. - № 4. - С. 68 – 78. DOI: 10.18384/2310-7251-2017-4-68-78

33. Акопян Н.Г. Circular dichroism meter based on polarization diffractive waveplate / Н.Г. Акопян, А.Л. Маргарян, А.С. Чилингарян, Н.В. Табирян, В.В. Беляев, А.С. Соломатин // Вестник Московского государственного областного

университета. Серия: Физика-Математика. - 2017. - № 4. - С. 88 – 94. DOI: 10.18384/2310-7251-2017-4-88-94

34. Беляев В.В. Автоматизированная система измерений параметров взаимодействия жидких кристаллов с поверхностью ориентирующего слоя жидkokристаллической ячейки / В.В. Беляев, А.А. Горбунов, С.В. Мойсеенко, Ал.Ан. Муравский, Ан.Ал. Муравский, И.В. Попов, Н.А. Бункина, К.А. Пупков, А.С. Соломатин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. - 2015. - №1. - С.73 - 82.

35. Беляев В.В. Автоматизированная система измерений параметров дифракции на пленках полимеров с периодическим микрорельефом / В.В. Беляев, К.В. Савцов, С.В. Мойсеенко, А.А. Горбунов, И.В. Попов, А.Л. Волынский, К.А. Пупков, А.Л. Маргарян, А.С. Соломатин, Н.А. Бункина // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. - 2015. - №3.- С.55 - 64.

36. Соломатин А.С. Дисплей с многопользовательским направленным распределением визуальной информации и проектор с управляемым распределением луча света на основе жидких кристаллов с неоднородным распределением директора / А.С. Соломатин, В.В. Беляев // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. - 2018. - № 1. - С. 47 – 62. DOI: 10.18384/2310-7251-2018-1-47-62.

4 часть. Периодические сборники, индексируемые в Google Scholar.

37. Belyaev V.V. Measurement of the LC pretilt angle and polar anchoring in cells with homogeneous and inhomogeneous LC director configuration and weak anchoring on organosilicon aligning films / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov, A.A. Gorbunov // SID'12 Digest. – 2012. - P.1422 - 1425.

38. Belyaev V.V. Optical properties of liquid crystal cells with hybrid orientation and negative birefringence / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov // SID'13 Digest. - 2013. – V.44. – I.1. - P.1328 - 1331.

39. Belyaev V.V. Measurement of the LC pretilt angle in hybrid LC cells / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov // SID'13 Digest. – 2013. - P.1432 - 1435.

40. Belyaev V.V. Oblique Light Incidence onto Hybrid Aligned Nematic (HAN) Cells for Optical Compensators / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, A.D. Kurilov, D.N. Chausov, V.G. Mazaeva, V.M. Shoshin, Y.P. Bobylev // SID'14 Digest. - 2014. - P.1445 - 1448.
41. Belyaev V.V. Light Propagation through Composite Heterophase Objects with Liquid Crystal Material / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D. Suarez, F. Molina, A. Smirnov // SID'16 Digest. - 2016. – P.1632 – 1635. DOI: 10.1002/sdtp.11045.
42. Belyaev V.V. Liquid Crystal Microlenses in Porous Media / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, A. Smirnov, D. Suarez, F. Molina // SID'17 Digest. - 2017. – P.1858 – 1861.