

**Государственное образовательное учреждение высшего образования
Московской области
Московский Государственный Областной Университет (МГОУ)**

На правах рукописи

СОЛОМАТИН Алексей Сергеевич

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

Специальность 01.04.05 Оптика

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор Беляев Виктор Васильевич

Москва-2018

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Литобзор.....	16
Глава 2. Методы.....	40
Глава 3. Оптические и ориентационные свойства ЖК слоев с произвольным приповерхностным углом наклона и различным пространственным распределением директора.	
Часть 3.1. Оптические свойства ЖК ячеек.....	67
Часть 3.2. Оптические и ориентационные свойства нематических ЖК ячеек при $K_{11} \neq K_{33}$	93
Часть 3.3. Ориентационные и оптические свойства односторонне ограниченных слоев жидкого кристалла.....	99
Часть 3.4. Объемные ЖК структуры.....	127
Часть 3.5. Дифракция на объектах из оптически анизотропных материалов с периодическим поверхностным микрорельефом.....	151
Глава 4. Физические свойства объемно неоднородных оптически анизотропных ЖК структур для элементной базы приборов, измерительно-расчетные методики определения ряда их параметров	
Часть 4.1. Линзы на основе жидких кристаллов с неоднородным радиальным распределением директора.....	169
Часть 4.2. Диэлектрические свойства ЖК ячеек с различными ориентационными распределениями, приповерхностными углами и упругими характеристиками.....	183
Часть 4.3. Оптические свойства ЖК-композитов.....	196
Часть 4.4. Фокусирующее-дифракционное ЖК устройство с неоднородным радиальным распределением директора.....	207
Часть 4.5. ЖК-устройства с управляемым преломлением луча света.....	211

Часть 4.6. Жидкокристаллические композитные ячейки для оптического пинцета.....	246
Часть 4.7. Светоориентируемые ячейки нематического ЖК с одной стороной, покрытой ориентантом.....	257
Выводы.....	266
Литература.....	267

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 предыдущий период времени они развивались, повышая свои визуально значимые для пользователя (цветность, контрастность, углы обзора) характеристики и достигли очень высокого качества изображения. 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 многопользовательского дисплея с индивидуальным видеоизображением для каждого зрителя. Он может найти применение от семейного (но в то же время индивидуального) телевизора, 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, особенно в качестве экрана компьютера. В то же время использование индивидуальных экранов сталкивается с ограничениями по их габаритам, например, экраны носимых с одного места использования на другое (ноутбуков) обычно невелики, а экраны носимых постоянно (телефонов)

откровенно маленькие. 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.

Особый интерес представляют анизотропные слои (жидкие кристаллы, полимеры) с заданным пространственным распределением параметров и ориентационные эффекты в них, влияющие на их оптические и диэлектрические свойства. В современных конструкциях различных оптических элементов полезные эффекты достигаются за счет управления комплексом параметров устройства. Среди них одним из самых важных

является ориентация ЖК. Поэтому разработка новых ориентантов и ориентирующих покрытий на их основе, в том числе с молекулярным микро- и нанорельефом, и связанная с этим практическая реализация слоев ЖК с пространственно неоднородной структурой и новыми оптическими свойствами является актуальной задачей. При исследовании ориентационно-оптических и электрооптических свойств слоя ЖК надо учитывать комплекс физических свойств ЖК материала – упругие, диэлектрические, оптические (коэффициенты преломления), вязкие свойства и др.

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.

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

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

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается проверкой адекватности разработанных компьютерных моделей, практической применимостью созданного методического обеспечения, включающего процедуры и алгоритмы для решения разнообразных задач 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 системы 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

Впервые предложено формировать индивидуальный визуальный информационный поток дисплея 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

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.

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: конструкция и принципы работы спроектированного и изготовленного для данных исследований экспериментально-измерительного оборудования; свойства и технология ориентирующих покрытий, в том числе с использованием ряда новых материалов, примененных в данных целях впервые; разработанные нами

методики изготовления ЖК ячеек, нанесения различных покрытий на поверхности ячеек, изготовления образцов полимера с микрорельефом, данные о новых материалах и методах их применения.

В третьей главе: сформулированы основные теоретические положения, положенные в основу моделей в последующей части работы; изложены результаты моделирования оптических свойств ЖК слоев с произвольными приповерхностными углами и различными типами пространственного распределения директора ЖК; результаты моделирования объемных ЖК доменов в изотропной среде, новая методика определения показателей преломления и геометрических характеристик доменов; модель оптических свойств дифракционных оптических элементов (ДОЭ) с поверхностным микрорельефом в микрометровом диапазоне.

В четвертой главе изложены: результаты моделирования линз из нематического ЖК с неоднородной ориентацией; модель диэлектрических свойств ЖК ячеек с различными типами распределения директора ЖК по толщине ячейки и различными двумерными распределениями краевых углов по апертуре электрооптического устройства; новые ЖК-композитные материалы, методика их получения и модель матричных систем на их основе для регулирования и преобразования светового потока; новые оптические элементы и устройства.

В выводах перечислены основные результаты диссертационной работы.

Глава I. Обзор литературы

В первой главе представлен аналитический обзор научных трудов по типам, структуре, методам исследований и практическому применению оптически анизотропных сред с неоднородной структурой. На основе аналитического обзора научных исследований сформулированы цели и задачи диссертационной работы. В качестве оптически анизотропных сред рассматривались нематические ЖК, двулучепреломляющие полимеры, слои, ориентирующие ЖК (кремнийорганические соединения, перфторированные соединения, полиимиды). В качестве неоднородности структур рассматривались микрорельеф на ориентирующей поверхности ЖК слоев, микрорельеф на пленках двулучепреломляющих полимеров, молекулярный нанорельеф на покрытиях, ориентирующих ЖК, пространственно неоднородная ориентация директора в ЖК слоях.

В качестве исследуемых свойств рассматривались ориентационные и электроориентационные, оптические и электрооптические, емкостные свойства слоя ЖК в ячейке, а также дифракционные свойства слоя двулучепреломляющего материала с периодическим микрорельефом. В качестве измеряемых характеристик рассматривались угол наклона директора в приповерхностном слое ЖК, энергия сцепления слоя ЖК с поверхностью ориентирующего слоя, показатели преломления ЖК, толщина слоя ЖК. В качестве разрабатываемых рассматривались материалы, ориентирующие слой ЖК, такие как кремнийорганические соединения, перфторированные соединения, полиимиды, и процессы формирования ориентирующих слоев.

§1. Виды оптически анизотропных систем с неоднородной структурой

1.1. Неоднородность поверхности (рельеф)

Нематический жидкий кристалл (НЖК) имеет два главных показателя преломления: обыкновенный n_o и необыкновенный n_e . Ограничивающие слои

ЖК поверхности с микрорельефом используются в ЖК дисплеях. Рельеф характеризуется профилем, размерами (глубина, период). Рельеф оказывает ориентирующее действие на ЖК молекулы приповерхностного слоя. На рис.1.1 показан микрорельеф, сформированный способом натирания. Приповерхностные параметры ориентации директора ЖК могут быть заданы с помощью покрытия ориентантом, который взаимодействует с молекулами ЖК в приповерхностном слое. Стремясь к минимуму потенциальной энергии взаимодействия с поверхностью, молекулы ЖК располагаются под оптимальным углом к поверхности ориентанта, что в сочетании с периодичностью микрорельефа приводит к тому, что ориентация может быть промодулирована. Можно комбинировать ориентирующее покрытие и натирание его с формированием микрорельефа.

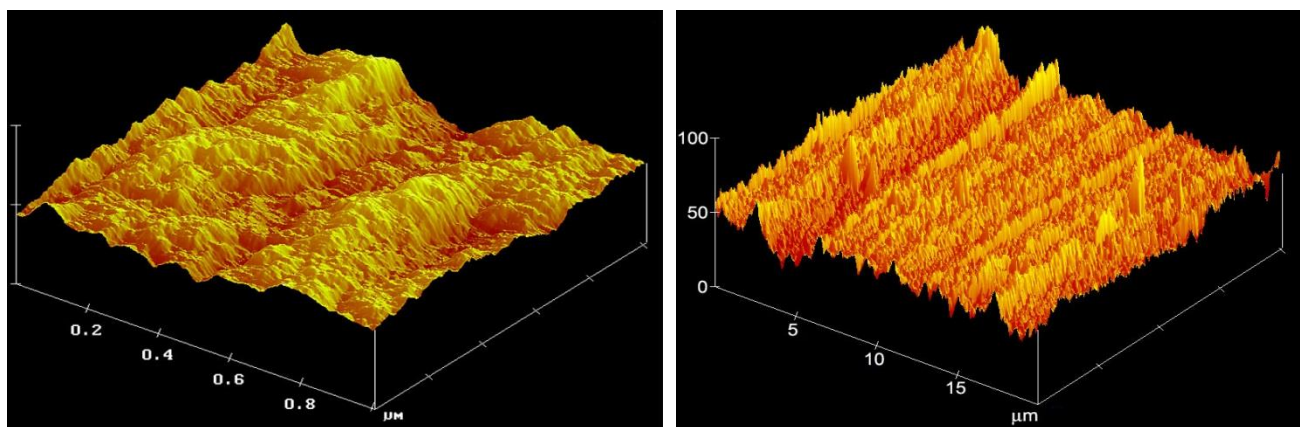


Рис.1.1. Структура поверхности полиимидного материала AL3046, снятая при помощи атомного силового микроскопа: слева до натирания, справа после натирания.

1.2. Неоднородность ЖК объемно-ориентационная

В современной дисплейной технике широко применяются материалы, сочетающие свойства полимеров и жидких кристаллов, механические и электрооптические, соответственно. В [1] описан способ получения капсулированных в полимерной пленке жидкокристаллических композиций (полимер-диспергированных жидких кристаллов, ПДЖК). Полимер (с

единственным показателем преломления n_p , он изотропен) и ЖК выбирают так, что $n_p \approx n_0$.

В каплях ЖК (рис.1.2, рис.1.3, рис.1.4) в полимерной пленке приповерхностная ориентация молекул жидкого кристалла определяется параметрами поверхностного взаимодействия ЖК-полимер, можно для всей капли ввести результирующее направление директора. Поскольку возможна технология капсулирования ЖК в полимере с произвольным направлением результирующего директора капель, то в целом по пленке будет сильное рассеяние света (малый коэффициент сквозного пропускания).

При воздействии электрического поля, ЖК в каплях переориентируется и оптические свойства пленки изменятся. Так, например, возможно почти полное пропускание нормально падающего света при нормально направленном сильном управляющем поле. Возможность регулирования коэффициента пропускания ПДЖК определяет их широкое применение и актуальность их исследования.

В [2-7] предложен представляющий собой многослойную электрооптическую структуру, в том числе содержащую пленку НЖК жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света. Ориентирующее покрытие на основе пленок нефоточувствительного полиимида используется для ориентации молекул ЖК. Это позволило, при уменьшении до 0,03мас.% концентрации вводимой сенсibiliзирующей добавки, на порядок увеличить быстродействие модулятора. В [8] описано экспериментальное изучение электрооптического эффекта в ПДЖК, зависимости параметров эффекта (коэффициенты пропускания, управляющие поля, времена переключения и др.) от ряда параметров: соотношения жидкого кристалла и полимера, сил поверхностного взаимодействия на границе сред с учетом геометрии поверхности и, фактически, формы капель ЖК.

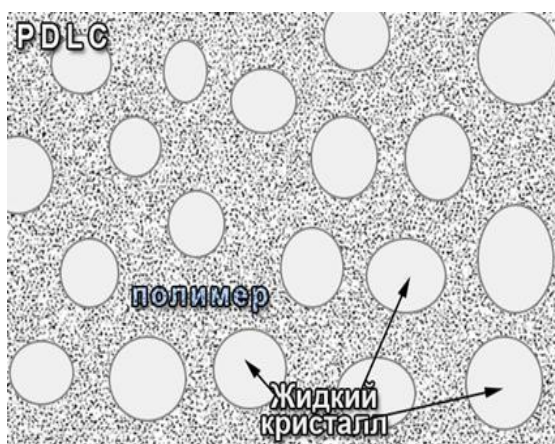


Рис.1.2. Не растворившийся в полимере жидкий кристалл формирует капли [8]



Рис.1.3. Директор капли результирующий, с ним строго совпадает направление лишь некоторой части молекул [8]

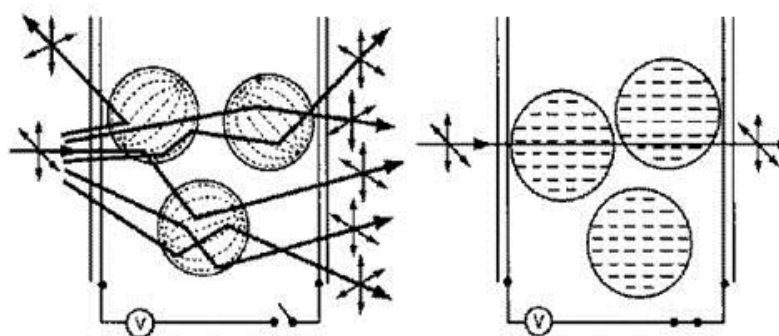


Рис.1.4. Слева: рассеяние света, без поля или поле меньше порогового; Справа: пропускание света, поле выше порогового (включения) [8]

Моделирование осесимметричных (цилиндрических) и сферически симметричных пространственно неоднородных структур ЖК и их оптических свойств стало одной из задач данной работы.

Исследование зависимости приповерхностного слоя ЖК от приложенного поля, упругих и диэлектрических свойств ЖК также стало одной из задач данной работы.

Осесимметричные и сферические оптически анизотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

В жидких кристаллах (ЖК) толщина ориентационного слоя достигает величины нескольких микрон, в стеклообразных полимерах на

поверхности раздела с другими фазами также существует ориентационный порядок. В жидкостях и в высокоэластичных полимерах этот порядок распространяется на расстояниях не более нескольких нанометров. В растворах полимеров молекулы растворителя образуют ориентированный слой на поверхности, толщина которого увеличивается с понижением температуры [9]. Характеристики жидких кристаллов в значительной мере определяются ориентацией молекул ЖК на поверхности раздела фаз [9]. Таким образом, исследование ориентационного порядка при переходе изотропная фаза – жидкий кристалл весьма актуально.

Состав жидкокристаллических индикаторных средств

Физические свойства ЖК и структура слоев ЖК решающим образом влияют на технические и эргономические характеристики устройств, в том числе ЖК дисплеев (рис.1.5).



Рис.1.5. Исследуемые составляющие (красный цвет) жидкокристаллических индикаторных средств (дисплеев).

В состав ЖК индикаторных средств (дисплеев) входят (рис.1.5, составляющие ЖК дисплеев, в которых могут быть использованы результаты исследований, представленные в диссертации, выделены красным цветом): ЖК слои, регулирующие пропускание света через поляроиды, изменяя состояние поляризации света; оптические пленки, компенсирующие, регулируя поляризацию, изменение яркости после поляризатора в зависимости от угла обзора; покрытия в составе ЖК ячеек, обеспечивающие ориентацию директора ЖК как у поверхности ЖК слоя, так и, через упругие взаимодействия, в его объеме; подложки с периодическим микрорельефом, обеспечивающие разделение, отклонение, фокусирование, гомогенизацию световых пучков; средства управления ориентационными и ориентационно-оптическими свойствами ЖК слоев с помощью поля.

MVA-технология (Multidomen with Vertical Alignment — изменение ориентации нескольких доменов относительно нормали к плоскости матричного слоя) была предназначена [10] для реализации более высоких углов обзора в ЖК-дисплеях. В MVA площадь каждого пикселя разбита на несколько зон-доменов (рис.1.6). Для каждой зоны за счет использования ориентирующего покрытия и специальной обработки поверхности создается анизотропная пространственная ориентация осей ЖК-молекул. В итоге для каждого домена возникает некоторый угол рассогласования вектора ориентации ЖК-молекул по отношению к оси поляризующих фильтров.

Каждый домен обеспечивает свой угол обзора, а угол обзора экрана формируется комбинацией всех доменов. MVA также используется для решения совсем другой задачи. В трансфлективном методе STAR (Switchable Transmissive and Reflective) применяются оба режима— на пропускание (T) и на отражение (R) без деления пикселей на зоны T/R. Дисплей может переключаться между двумя основными состояниями T и R в соответствии с условиями внешней освещенности (рис. 1.6).

Улучшается качество и читаемость изображения при ярком внешнем освещении. Кроме того, уменьшается энергопотребление дисплея, поскольку

работа с подсветкой не ведется. Переключение режимов производится автоматически от встроенного в мобильное устройство датчика уровня внешней освещенности. С учетом режима работы ЖК дисплея на основе активной матрицы тонкопленочных транзисторов (TFT) важной является задача исследования и моделирования диэлектрических свойств слоя ЖК.

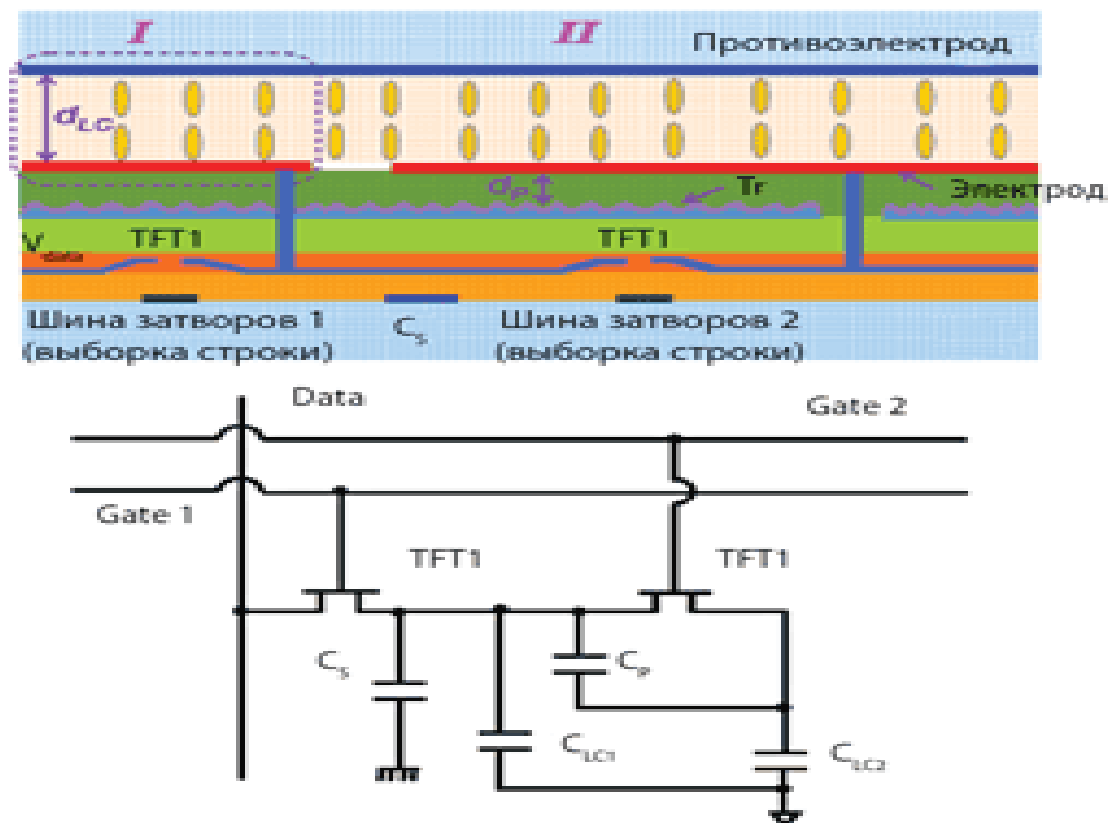


Рис.1.6. Топология и эквивалентная схема ЖК-ячейки с переключением доминантного режима. d_{LC} — зазор с ЖК-материалом; C_s — запоминающий конденсатор пикселя; C_{LC1} — емкость первого домена; C_{LC2} — емкость второго домена; C_p — емкость пассивирующего слоя; T_r — слой отражателя; D_p — толщина пассивирующего слоя; V_{data} — шина данных (столбцы).

§ 2. Переход Фредерикса в нематических жидких кристаллах

2.1. Статика

Нематическими называются главным образом термотропные жидкие кристаллы (бывают и лиотропные нематические ЖК), для которых характерно наличие дальнего ориентационного порядка и отсутствие дальнего трансляционного порядка. Именно такие жидкокристаллические материалы

исследуются в данной работе. Они представляют собой оптически одноосную среду, кристаллографическая структура которой неполярна. Директором называется единичный вектор $\vec{n}$, описывающий направление преимущественной ориентации молекул в какой-либо точке объема жидкого кристалла. Франк [11] (до Франка она была получена Озеном) учитывая цилиндрическую симметрию ЖК, рассматривая молекулы с зеркальной симметрией, предполагая отсутствие полярности среды, получил для плотности объемной свободной упругой энергии нематического жидкого кристалла с коэффициентами упругости k_{ii} следующее выражение:

$$F = \frac{1}{2} [K_{11} (\operatorname{div} \vec{n})^2 + K_{22} (\vec{n} \cdot \operatorname{rot} \vec{n})^2 + K_{33} (\vec{n} \times \operatorname{rot} \vec{n})^2] \quad (1.1)$$

В выражении (1.1):

первый член описывает ***S – деформацию (splay, поперечный изгиб)***;

второй член описывает ***T – деформацию (torsion, кручение)***;

третий член описывает ***B – деформацию (bend, продольный изгиб)***.

В данной работе плотность свободной энергии будет рассматриваться только в виде (1.1). Надо отметить, что в случае холестерических ЖК (ХЖК) несколько изменяется член с модулем k_{22} . Члены, которые описывают поверхностную энергию ЖК [12], существенны при рассмотрении флексоэффекта [13], условий для образования дисклинаций и других нарушений НЖК. В выражении (1.1) они, естественно, отсутствуют. Все эти виды деформации можно наблюдать, воздействуя на слой ЖК либо механически, либо с помощью магнитного или электрического поля (рис.1.7). Также можно воздействовать на слой ЖК, задав различные краевые углы директора ЖК на противоположных поверхностях ЖК ячейки. Тогда в объеме ЖК слоя возникнет распределение углов ориентации директора ЖК и, соответственно, упругие деформации слоя ЖК.

Каждому виду деформации соответствует константа упругости k_{ii} , по порядку величины равная отношению энергии взаимодействия молекул ЖК к их размеру. В.К. Фредериксом с сотрудниками наблюдался еще в 1930-е годы магнитный эффект, связанный с анизотропией диамагнитной восприимчивости

$\Delta\chi = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$ (разность компонент восприимчивости, параллельной и перпендикулярной директору). Для электрического аналога используется разность компонент диэлектрической проницаемости, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$.

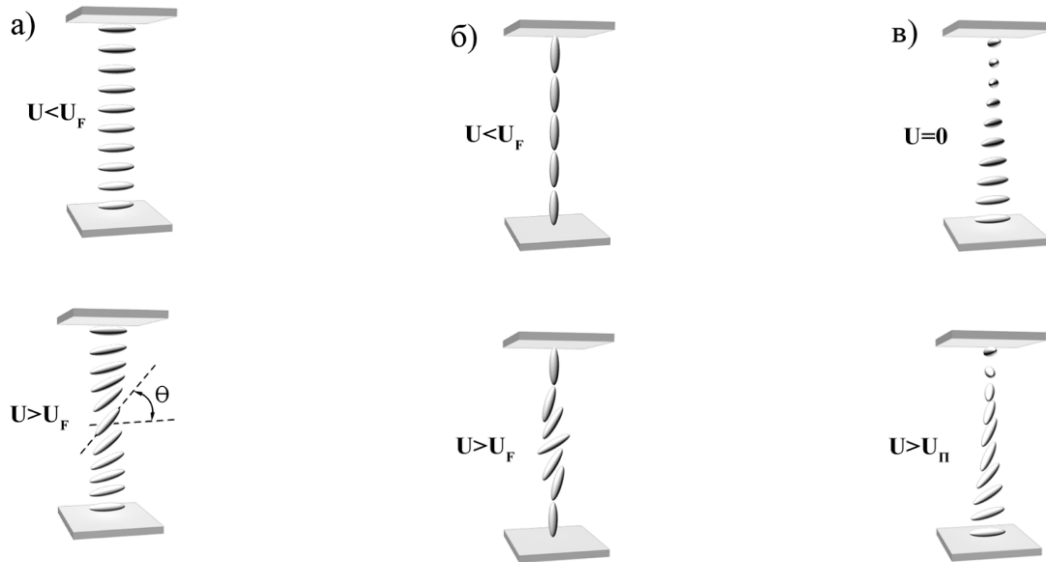


Рис.1.7. Схематическое изображение изменения ориентации молекул НЖК до (сверху) и после включения (снизу) электрического напряжения в S-, В- и твист-эффекте (слева направо).

Если молекулы ЖК жестко закреплены на поверхности ориентирующего слоя (то есть полярная энергия сцепления ЖК с ориентантом значительно больше упругих сил взаимодействия деформированных слоев ЖК), то, когда директор строго перпендикулярен полю, так, что момента сил нет, электрическая деформация начинается не с нулевого, а с некоторого порогового напряжения Фредерикса U_F . При условии $\Delta\varepsilon \ll \varepsilon_{\perp}$ уравнение Эйлера, в котором учитываются вклады упругого диэлектрического момента, записывается следующим образом:

$$\frac{d}{dz} [K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta] - (K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cdot \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 = - \frac{\Delta\varepsilon}{4\pi} E^2 \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (1.2)$$

где: θ – угол отклонения директора от равновесного (считается, что деформация идет в одну сторону и дефекты в виде «стенок» не образуются); z – ось координат, направленная перпендикулярно плоскости ячейки;

$E = \frac{U}{L}$ - напряженность электрического поля, направленного вдоль оси z.

Деформации слоя ЖК при напряжениях U , ненамного превышающих U_F , в зависимости от геометрии опыта будут представлять собой поперечный изгиб, или кручение, или продольный изгиб в чистом виде. Т – деформацию можно наблюдать также при наклонном падении пучка поляризованного света на планарно-ориентированный слой ЖК [14]. В данной диссертационной работе исследованы эти эффекты.

Большинство эффектов в ЖК наблюдается при использовании поляризованного света. Это обусловлено тем, что жидкие кристаллы обладают большой оптической анизотропией и вращают плоскость поляризации. Разность показателей преломления для необыкновенного и обыкновенного лучей $\Delta n = n_e - n_o$ может достигать $\Delta n = 0,3$ и более. Такие (основанные на изменении оптических свойств слоя ЖК при приложении электрического поля) методы исследования характеристик ЖК называются электрооптическими. Применяя монохроматическое поляризованное (лазерное) излучение, удобно измерять количественные характеристики. С учетом свойств ЖК, исследуемые образцы ориентируют плоскостью, содержащей вектор директора ЖК (если он в исследуемом образце наклонен в определенной плоскости), под некоторым (оптимальным) углом к плоскости поляризации падающего луча света (лазера). Наряду с этим для изучения деформации ЖК можно также измерять емкость слоя при изменении внешнего электрического или магнитного поля [15].

К 1972 году относятся первые сообщения об S – эффекте [16, 17]. Иногда его называют эффектом фазовой модуляции света, так как увеличивающееся напряжение уменьшает эффективное значение $\Delta n^{\text{eff}} = n_e^{\text{eff}} - n_o$ и, следовательно, разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами, равную (1.3):

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\int_0^L \frac{n_o n_e dz}{(n_o^2 \cos^2 \theta(z) + n_e^2 \sin^2 \theta(z))^{\frac{1}{2}}} - n_o L \right] \quad (1.3)$$

При этом интенсивность света, регистрируемая за анализатором равна:

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta\Phi}{2} \right) \quad (1.4)$$

где: I_0 интенсивность света, падающего на ячейку (правильнее - интенсивность света, прошедшая через поляризаторы с параллельными осями пропускания); φ угол между азимутальным направлением ориентации директора на подложках ЖК слоя и направлением главной оси поляризатора. Как видно из (1.3), (1.4), интенсивность регистрируемого фотоприемником света, с увеличением электрического напряжения, будет осциллировать, причем, если $\varphi = \pi/4$, то размах осцилляций (контраст) будет максимален (принято одноконстантное приближение, т. е. $K_{11}=K_{22}=K_{33}=K$).

Типичный вид распределения угла наклона директора по толщине ЖК ячейки при разных напряжениях приведен на рис.1.8. Уравнение (1.2) позволяет вычислить величину деформации слоя ЖК при любых напряжениях, превышающих пороговое.

По сравнению с «S – эффектом», «В – эффект» имеет некоторые особенности. Начальная разность фаз равна нулю и начинает расти только при напряжениях выше порогового. Вольт - контрастная характеристика «В – эффекта» на пороговом участке очень крута, что позволяет успешно использовать «В – эффект» в матричных устройствах. Зависимости разности фаз $\Delta\Phi$ планарно ориентированной (S) ячейки от величины угла наклона θ в центре ячейки приведены на рис.1.9 для двух значений толщины [18].

В 1971 году обнаружен «В – эффект» и назван «DAP» – эффектом в работах [19, 20]. Описание деформации гомеотропно ориентированного слоя принципиально не отличается от такового для случая планарной ориентации, судя по экспериментальным данным и теоретическим расчетам работ [21].

Это связано с тем, что исходная гомеотропная ориентация слоя ЖК с «В – эффектом» оптически однородна. Наиболее строгие расчеты S- и В-деформаций выполнены С.А.Пикиным [22] и В.Г.Чигриновым [23].

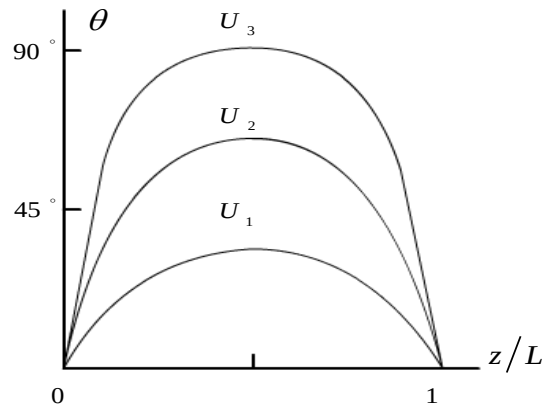


Рис.1.8. Распределение угла отклонения директора по толщине ячейки при различных внешних электрических напряжениях [16], S- эффект.

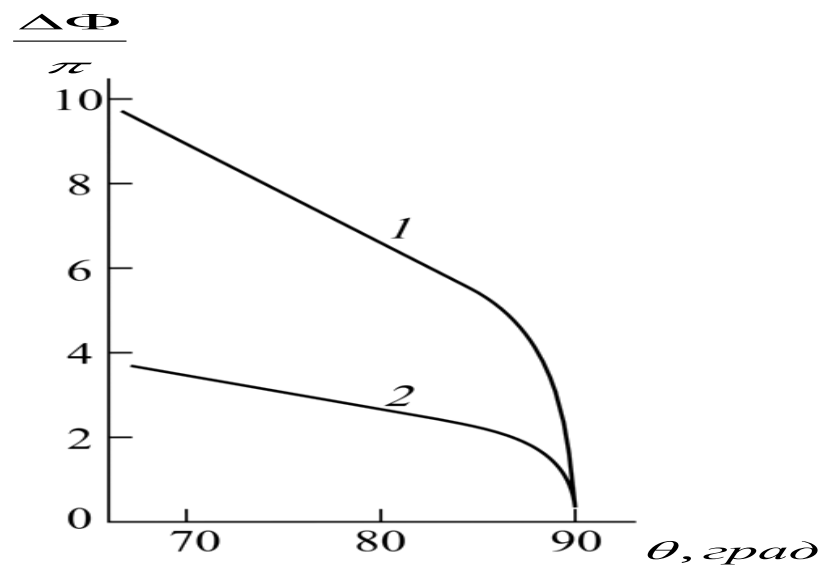


Рис.1.9. Зависимость разности фаз $\Delta\Phi$ S-ячейки от величины угла наклона θ молекул в центре слоя. Смесь 97% МБА и 3% ЖК-614. 1 – $L=35\text{мкм}$, 2 – $L=14\text{мкм}$.

2.2. Динамика

При переключении яркости элементов ЖК дисплея, большое значение имеет переходный режим, то есть динамика переориентации ЖК слоя при изменении приложенного к нему поля. Можно использовать результаты работы [24], где считается, что величина деформации убывает по экспоненциальному закону, для вычисления времени включения $T_{вкл}$ и релаксации $T_{рел}$ S- и В-эффектов. При малых деформациях директора это справедливо, если пренебречь потоками жидкости, сопровождающими этот процесс (обратным

течением). Изменение угла наклона директора при релаксации деформации для немалых отклонений рассчитывается численным методом [25]. В [26] изучена динамика переориентации жидкого кристалла с учетом обратного течения и без привлечения условия о малых отклонениях директора. Динамика процесса переориентации молекул определяется из условия равенства диэлектрического, упругого и вязкостного моментов единицы объема НЖК. Инерционными членами при этом, ввиду их малости по сравнению с вязкостными, пренебрегается [27-29]. Исследование динамики переориентации имеет важное значение для разработки новых ЖК систем. Емкостные свойства играют большую роль в процессах переориентации, определяя изменение приложенного поля со временем. Исследование емкостных свойств ЖК слоев стало одной из задач данной работы.

§ 3. Частичная переориентация слоя НЖК

Для применения ЖК материалов в световых модуляторах или затворах требуются специальные режимы работы, при которых полные времена переориентации директора в ЖК устройствах существенно снижаются (могут использоваться повышенные температуры, высокие напряжения). Также сокращение времени достигается уменьшением толщины слоя ЖК в ячейке. При минимизации толщины ячейки твист-эффект сталкивается с ограничениями (волноводный режим Могена не получается) и следует использовать плоский S или В эффект. Сокращение времени переключения (прилагая внешнее поле к слою ЖК) элементной базы дисплейных ЖК систем является одной из целей данной работы. Один из режимов работы, при которых времена существенно снижаются, был предложен для S- эффекта в [30]. Ячейка ЖК помещена между скрещенными или параллельными поляроидами. Представляется возможным задать приповерхностный угол наклона директора ЖК с помощью поверхностного микрорельефа на ориентирующем покрытии. Далее рассмотрим два варианта. Первый из них: поддерживая стационарное напряжение смещения (на ячейке с планарно ориентированным слоем ЖК) $U_{см}$,

соответствующее минимуму или максимуму интенсивности лазерного света, прошедшего через ЖК ячейку, и возбуждая ячейку коротким высоковольтным импульсом напряжения, можно изменить эффективное двулучепреломление ячейки. Подобрав параметры импульса так, что фазовая задержка за время импульса возбуждения изменится только на π , а пропускание системы при этом увеличится или уменьшится в десятки раз, можно обеспечить сокращение времени переключения элементной базы дисплейных ЖК систем. Быстродействие обусловлено как тем, что молекулы ЖК под воздействием электрического поля переориентируются на угол значительно меньший 90° , так и тем, что релаксация идет в тонком пристеночном слое.

Второй из них: подобрав для конкретного ориентанта строго определенный профиль и период микрорельефа, можно получить точно заданный приповерхностный угол директора, величина которого выбирается заранее с целью обеспечить максимум (или минимум) пропускания. Тогда для осуществления переключения ЖК ячейки кратковременным включением заданного напряжения, можно за время импульса изменить эффективное двулучепреломление ячейки так, что фазовая задержка изменится только на π , а пропускание системы при этом увеличится или уменьшится в десятки раз. Этот режим, помимо быстродействующих модуляторов, представляет интерес для матричных устройств. Быстродействие может быть очень велико, поскольку угол поворота директора ЖК невелик, а ячейка может быть тонкая. Наиболее выгодно в целях обеспечения быстродействия заранее придать слою ЖК в ячейке такой профиль распределения директора по толщине слоя, чтобы максимальное изменение пропускания сопровождалось минимальным переориентированием молекул ЖК, в сочетании с минимизацией толщины ячейки. Как будет далее показано в данной работе, наиболее сильно изменяется эффективная разность фаз по отношению к углу переориентации в случае планарной или гомеотропной ориентации в слоях ЖК. В связи с вышеизложенным актуальны исследования с целью поиска ориентантов, способов их нанесения и формирования поверхностного микрорельефа,

обеспечивающих заданный приповерхностный угол наклона директора ЖК. Это стало одной из задач данной работы.

Из практических соображений, связанных с тем, что обычно яркость элемента (пикселя) ЖК дисплея колеблется около средних значений, представляет интерес также широкий диапазон приповерхностных углов, так как в однородных слоях с углом преднаклона, обеспечивающим пропускание 40-60% от максимального, переход от средней интенсивности к максимуму или минимуму пропускания требует переориентации молекул ЖК для изменения эффективной разности фаз значительно меньше, чем на π . Следовательно, меньше и угол переориентации молекул и, в сочетании с уменьшением толщины ячейки, необходимое для переориентации время. Это позволяет, при заданном быстродействии, уменьшить величину поля и энергозатраты на управление ЖК слоем. С этими же целями актуальны исследования и неоднородно распределенных ЖК слоев. Выше на рис.1.9. показано, что наиболее сильно изменяется эффективная разность фаз по отношению к углу переориентации в случае почти гомеотропной ориентации в ЖК слоях с S-распределением при планарном приповерхностном угле. Это позволяет применить к S-ячейке рассуждения, аналогичные вышеизложенным, об актуальности исследования S-ячеек с широким диапазоном приповерхностных углов. Аналогично вышеизложенному, можно обосновать актуальность исследования В-ячеек с широким диапазоном приповерхностных углов. Однако и при углах посередине слоя ЖК, далеких от 0° или 90° , тоже можно получить высокоэффективные характеристики быстродействующей ЖК ячейки с малым управляющим полем (малыми энергозатратами). Такие слои, с неоднородным распределением ЖК директора по толщине, при широком диапазоне приповерхностных углов, также стали объектом исследований в данной работе.

В принципе, если рассматривать ЖК слои с одинаковыми приповерхностными углами наклона директора ЖК на противоположных сторонах, то очевидна симметричность их относительно плоскости, расположенной посередине толщины слоя ЖК. В связи с этим, актуально

рассмотрение слоя ЖК как состоящего из двух слоев ЖК с переменным (от граничного угла до срединного) углом наклона директора ЖК. Тогда вполне можно рассматривать и ЖК слои с неодинаковыми граничными углами. При этом два слоя ЖК будут иметь переменный угол наклона директора от граничного угла, неодинакового для каждого из них, и до угла, связывающего эти слои. Но связывающий их угол наклона директора в таком случае уже будет не посередине толщины ЖК ячейки. Основные уравнения переориентации директора внутри слоя ЖК приведены в [31-37].

В связи с вышеизложенным актуальны исследования слоя ЖК, с одной стороны ограниченного ориентирующей поверхностью, а с другой стороны ограниченного не физически, а только условной границей толщины рассматриваемого слоя. Такой слой имеет толщину, называемую длиной когерентности или параметром де Жена [13]. Такие исследования были осуществлены для реализации одной из задач данной работы.

При оптическом наблюдении деформации поперечного (или продольного) изгиба изменение угла наклона θ директора приводит к изменению эффективной величины двулучепреломления слоя, а, следовательно, и разности фаз $\Delta\Phi$. Изменение разности фаз $\Delta\Phi$ выражается в осциллирующем характере пропускания слоя ЖК между скрещенными поляроидами в зависимости от приложенного напряжения или от времени, если напряжение выключено. Изменению пропускания от максимального до минимального или наоборот соответствует изменение $\Delta\Phi$ на π радиан.

Именно измерение зависимости интенсивности пропускания от напряжения, приложенного к слою ЖК, и было осуществлено в данной работе. Зная связь между характеристиками распределения угла наклона директора ЖК и величиной $\Delta\Phi$, можно определить, как изменяется геометрия слоя ЖК в зависимости от напряжения. По вольт-контрастной характеристике можно определить (как выше сказано, изменению пропускания от минимального до максимального или наоборот соответствует изменение $\Delta\Phi$ на π радиан) зависимость $\Delta\Phi$ от напряжения.

§4. Слои с неоднородным распределением директора ЖК

Во многих типах современных ЖК дисплеев используется наклонное и/или неоднородное распределение ЖК директора [38-40]. Это может улучшить время электрооптического отклика или диапазон углов обзора дисплея [41]. Следовательно, актуальны исследования оптических свойств и, в частности, двулучепреломления, в зависимости от распределения директора ЖК в слое, определяющего разность фаз обыкновенного и необыкновенного лучей при их прохождении через слой ЖК, расположенный между скрещенными поляризаторами (формула 1.3). Данная зависимость хорошо исследована для однородных слоев, однако нет достаточных данных по слоям с неоднородным распределением директора ЖК. Определение зависимости разности фаз от угла преднаклона директора ЖК как в однородно, так и в неоднородно распределенных слоях было выполнено для реализации одной из задач данной работы. Нетипичные распределения угла директора ЖК могут возникать при динамическом переключении [39,40], а также при нанесении на поверхность, ограничивающую ЖК слой, слоев двулучепреломляющего материала, например, полимерного ЖК [42].

§5. Определение приповерхностного угла наклона

В современных конструкциях ЖК дисплеев (ЖКД) полезные эффекты (увеличение контраста изображения, быстродействия, расширение углов обзора) достигается за счет управления ориентацией ЖК на поверхности подложек ЖК панели [43, 44]. Классическим примером неоднородного распределения ориентации ЖК в устройстве являются так называемые ОСВ (Optically Compensated Bend) ЖК ячейки: с распределением ориентации ЖК, соответствующим деформации продольного изгиба, с оптической компенсацией [39]. На противоположных подложках ОСВ ячейки ЖК затвора или дисплея ориентация ЖК имеет наклон с противоположными направлениями, в центре ориентация ортогональна плоскостям подложек.

Благодаря этому в объеме слоя создается механически напряженное состояние с повышенной упругостью, что способствует снижению времен переключения электрооптического отклика слоя ЖК. Противоположенная направленность ориентации ЖК в пристеночных областях приводит к взаимной компенсации изменений в разности фаз поляризованных пучков света, падающих на слой с разных сторон, и, соответственно, более плоской зависимости контраста ЖК слоя при его наблюдении под разными углами обзора.

Другими известными примерами ЖКД с неоднородным распределением ориентации ЖК в устройстве являются (рис.1.6) ЖКД с многодоменной вертикальной ориентацией (MVA), ЖКД по технологии BiNem или зенитальные бистабильные устройства (ZBD) [45-49].

В литературе известен ряд методов измерения угла наклона в ЖК слоях с однородной ориентацией ЖК директора [50-55]. Известны также публикации по электрооптическим характеристикам ЖК слоев с гибридной ориентацией, являющейся частным случаем неоднородного распределения директора [56]. В таких слоях на одной ориентирующей поверхности создается вертикальная (гомеотропная) ориентация, а на другой – планарная ориентация.

Для монохроматического поляризованного излучения, прошедшего через помещенный между скрещенными поляризаторами ЖК слой с заданным распределением ориентации, результаты расчета (в зависимости от отношения коэффициентов упругости ЖК K_{33}/K_{11}) разности фаз пропускания приведены в [32, 57-58], описан электрооптический метод определения поверхностного угла.

В соответствии с [40, 56, 57] изготавливались ЖК ячейки. В соответствии с [59-61] осуществлялось нанесение, для ориентации ЖК, полиимидных пленок. Способом описанным в [55, 62], производилась наклонная ориентация ЖК с использованием кремнийорганических соединений на ориентирующих поверхностях. На рис.1.10. приведена структура типичной ЖК ячейки. На внутреннюю сторону верхней и нижней подложек нанесены прозрачные электроды - окись индия и олова (ИТО). Поверх электродов нанесены ориентирующие слои.

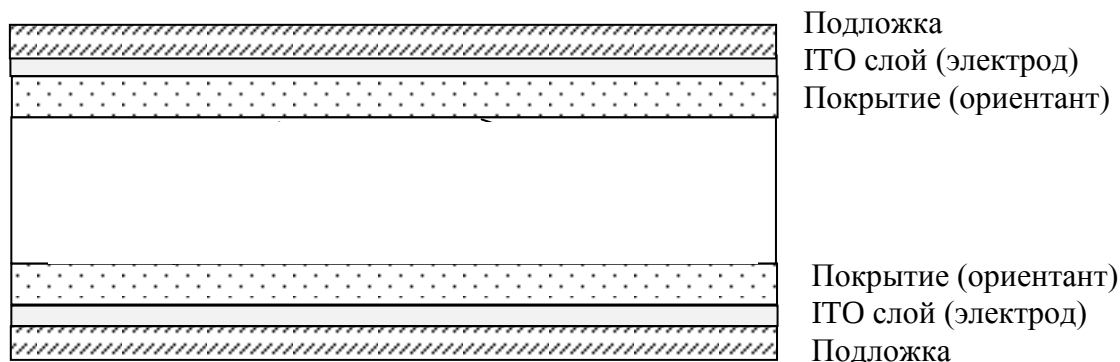


Рис.1.10. Структура типичной ЖК ячейки

§6. Измерение полярной энергии сцепления

Важная характеристика взаимодействия ЖК с поверхностью подложек ячейки - энергия сцепления [63-66], в [63] введены две разновидности энергии сцепления, W_θ называется полярной энергией сцепления (в литературе используется термин зенитальная в зависимости от направления угла отклонения от плоскости yz подложек ячейки (рис.1.11), z - направление ориентации ЖК, далее для обозначения полярной энергии сцепления используется символ W), W_φ – азимутальной энергией сцепления. Отклонение (например, под действием поля) директора ЖК в ячейке характеризуется углом полярным θ к плоскости yz (зенитальным относительно оси x), а также азимутальным углом φ [63].

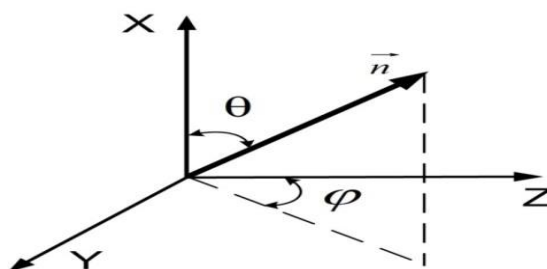


Рис.1.11. Поверхность подложки – плоскость yz . Ось z - направление ориентации ЖК, задаваемой граничными условиями.

Полярная энергия сцепления ЖК с ориентантом влияет на приповерхностный угол наклона директора ЖК, а также на время электрооптического отклика [38, 39, 45-51]. В этих работах приводятся методы

измерения температурной зависимости каждого параметра с оценкой точности измерения.

§7. Гибридные жидкокристаллические слои и их свойства

Для определения отношения коэффициентов упругости K_{33}/K_{11} по оптической фазовой задержке слоя ЖК использовалась в [58] гибридная ориентация $\theta_0^{(1)}=0$, $\theta_0^{(2)}=90^\circ$. В [67, 68] рассмотрены оптические среды с неоднородным распределением ориентации (на поверхности противоположных ориентирующих слоев величина θ_0 различается $\theta_0^{(1)} \neq \theta_0^{(2)}$) и показателя преломления ЖК. Для задания электрооптических характеристик (углов обзора, времени переключения) ЖК дисплеев применяется [69-77] гибридная ориентация. Способ определения на обеих ориентирующих поверхностях слоя ЖК угла наклона директора приведен в [78]. Для этого математически обрабатывались данные по пропусканию пучков поляризованного света наклонно через слой ЖК [78]. Для расчета фазово-поляризационных элементов, например, оптических компенсаторов, рассчитывают разность фаз для заданного распределения угла наклона директора [42, 73, 78, 79].

§8. Ориентационные и оптические свойства слоев жидкого кристалла, ограниченных с одной стороны ориентирующей поверхностью

Одной из задач настоящей работы является расчет ориентационных характеристик гибридных ЖК ячеек оригинального типа и управление параметром де Жена в них при различных ориентациях ЖК и различных упругих и диэлектрических свойствах ЖК. Одна из поверхностей, ограничивающих слой ЖК, покрыта ориентирующим покрытием, обеспечивающим заданный угол наклона директора, а другая поверхность, ограничивающая слой ЖК, не оказывает существенного ориентирующего влияния (в частности, в работах Коньяра рассмотрены неориентирующие покрытия). Управлять длиной когерентности означает управлять оптическими

характеристиками слоя ЖК, путем регулирования его ориентационных характеристик, изменяя (на этапе изготовления ячейки ЖК) ее толщину и угол наклона на той стороне, которая покрыта ориентантом, а также изменяя поле, приложенное к слою. Для достижения этого была поставлена задача разработать метод расчета пространственного распределения директора в слое ЖК как с отрицательной, так и с положительной диэлектрической анизотропией в односторонней ячейке, в зависимости от толщины слоя и угла наклона директора на той поверхности, которая покрыта ориентантом. Изучение возможностей управления как ориентационными, так и ориентационно-оптическими свойствами ЖК слоя представляется весьма актуальной задачей. Она решается в данной работе.

§9. Материалы, применяемые для ориентации жидких кристаллов

В [66] развита концепция молекулярного микрорельефа кремнийорганических соединений (КОС), позволяющего, в зависимости от молекулярного строения фрагментов молекул, регулировать угол наклона ЖК. Пленкообразующие КОС занимают особое место среди материалов, применяемых для ориентации жидких кристаллов благодаря высокой стойкости к внешним воздействиям и низкой температуре нанесения пленки. Для различных ориентантов угол приповерхностного наклона директора ЖК определяет молекулярный рельеф из склоненных (в зависимости от плотности упаковки, как было сказано выше) концевых групп ориентанта, образующийся на поверхности упомянутого поверхностного монослоя. Из однородности поверхностного монослоя ориентанта следует постоянство данного угла наклона ЖК для всей поверхности ориентанта. Одной из задач настоящей работы является измерение углов наклона ЖК на поверхности пленок КОС, а также разработка новых ориентантов, методов их нанесения и изучение характеристик ЖК материалов в ячейках с новыми ориентантами.

§10. Диэлектрические свойства жидких кристаллов

При разработке различных устройств, например, ЖК датчиков температуры, а также нагреваемых при эксплуатации элементов ЖК индикаторов, важное значение имеет анизотропия диэлектрической проницаемости от температуры [80-90]. На рис.1.12. приведена зависимость компонент диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\parallel}$ и $\epsilon_{\perp}$ и ее анизотропии $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ от температуры для нематического ЖК 4-пентил-4'-цианобифенил (в литературе 5ЦБ или 5CB).

Актуальны исследования при различной температуре влияния в комбинированной плоской ячейке краевых углов наклона молекул ЖК на вид зависимости реакции (отклика) ЖК. Величина ϵ измеряется мостовым методом [80-86].

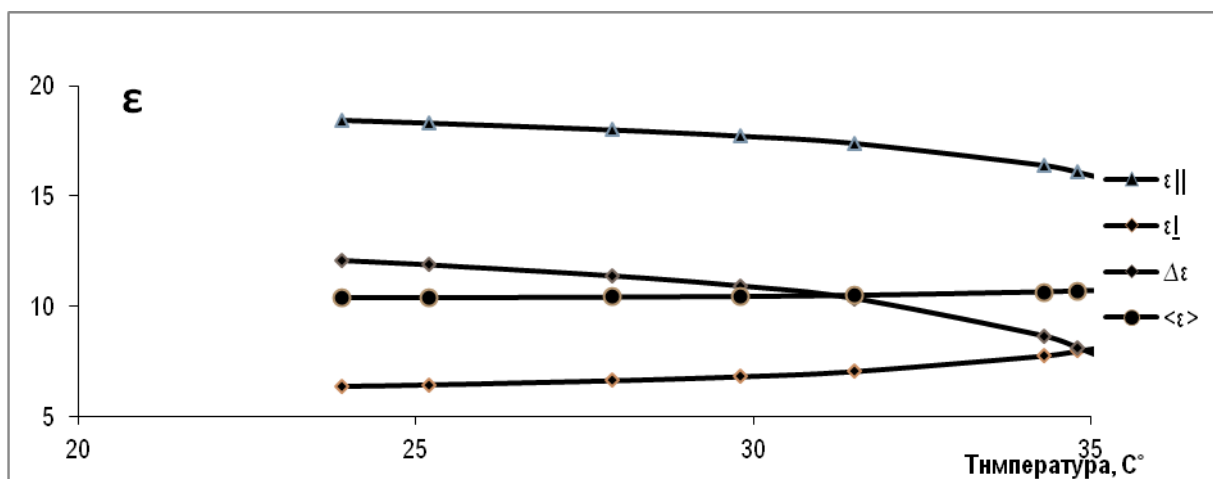


Рис.1.12. Графики зависимости составляющих диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\parallel}$ и $\epsilon_{\perp}$, ее средней величины в нематической фазе $\langle\epsilon\rangle$ и ее анизотропии $\Delta\epsilon$ для ЖК 5ЦБ.

Для ее описания обычно используется теория Майера-Мейера [87, 88] и выражение (1.5):

$$(\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})\epsilon_0 = NFhS \left[\Delta\alpha - \frac{F\mu^2}{2kT}(1 - 3\cos^2\beta) \right] \quad (1.5)$$

где $\Delta\alpha$ — анизотропия молекулярной поляризуемости, μ — дипольный момент молекулы, F — параметр действующего поля (reaction field), h — форм-фактор полости для расчета действующего поля, k_B — постоянная Больцмана, T

– температура, β – угол между направлениями оси молекулы и дипольного момента, S – параметр порядка (степень упорядоченности) ЖК, N – мольная концентрация НЖК, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная. Из (1.5) следует, что обычно диэлектрическая анизотропия пропорциональна первой степени параметра порядка (рис.1.12). В широком диапазоне температуры при $T < T_{NI} - 10K$ зависимость $\Delta\epsilon(T)$ имеет квазилинейный вид, а при $T \rightarrow T_{NI}$ ее крутизна растет. Величина $\Delta\epsilon$ увеличивается с ростом дипольного момента молекулы и может достигать для ряда НЖК +90 [81-90].

§11. Дифракция на оптически анизотропных средах с периодической микроструктурой

Подложки (как правило, из анизотропного материала) с периодическим микрорельефом обеспечивают фокусирование, отклонение, разделение световых пучков в адаптивной оптике и электронике [50,74]. Разработаны технические решения для более эффективного использования света, например, Brightness Enhancement Film (BEF, рис.1.13, элементы с призматическим микрорельефом, способствующим повторному использованию сохраненного внутри них света) - пленочный усилитель яркости, конвертирующий луч поляризованного света, чтобы он не терялся при многочисленных пересечениях границ различных оптических элементов и изменениях направления распространения.

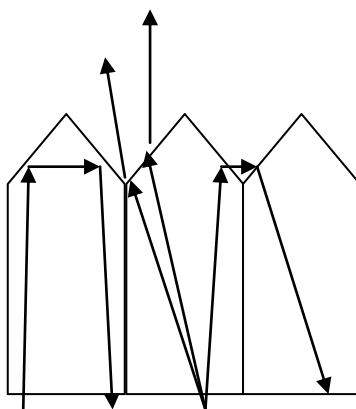


Рис.1.13. Пленочный усилитель яркости (источник света внизу рисунка).

Рассмотрение прохождения через дифракционную решетку образца полимера с поверхностным микрорельефом монохромной волны света явилось одной из задач данной работы. Пленка с заданным профилем микрорельефа (как одномерным: циклоидоподобным, ступенчатым, синусоидальным, сложным синусоидальным, треугольным, так и двумерным) оптически анизотропного полимера является дифракционной решеткой. Исследование физических свойств сред с периодическим микрорельефом является актуальной задачей [91-93]. Для однородной среды с плоскими границами пропускание и отражение света существенно отличается от случая пространственной модуляции оптических характеристик вещества или рельефа поверхности [91, 94, 95]. В [96] на основании сравнения результатов [96-100] вычисления разными методами дифракционной эффективности двулучепреломляющих структур с поверхностным микрорельефом, рекомендован для анизотропных решеток с периодическим микрорельефом метод расчета дифракции, который использован в данной работе для теоретического моделирования дифракционных интенсивностей как прошедшего сквозь решетку, так и отраженного светового потока.

При выборе цели работы были собраны воедино цели и задачи, актуальность которых была (разрозненно) изложена выше.

Целью работы является разработка новых оптически анизотропных материалов с неоднородной структурой (жидкие кристаллы и ЖК-композиты) и новых конструктивных решений для приборов отображения и обработки информации, позволяющих улучшить характеристики и функциональные возможности оптических и электрооптических приборов.

Глава 2. Методы и материалы

§1. Получение экспериментальной зависимости пропускания от напряжения

Одной из задач данной работы является экспериментальное исследование оптических характеристик гибридных ЖК слоев с произвольным распределением директора внутри них, при варьировании всех возможных параметров: приповерхностного угла наклона, показателей преломления, угла падения света, в том числе и угла падения луча по отношению к плоскости директора ЖК. Ячейки ЖК трех разных типов рассмотрены в Главе 1 под следующими обозначениями: *H*, *S* и *B*.

Метод получения экспериментальной зависимости пропускания от напряжения основывается на измерении пропускания монохроматического поляризованного излучения, прошедшего через ЖК ячейку с заданным распределением ориентации ЖК, помещенную между скрещенными поляризаторами. Как было изложено в Главе 1, разность фаз $\Delta\Phi$ между необыкновенным и обыкновенным лучами, распространяющимися в слое ЖК, вычисляется по формуле (1.3), при этом интенсивность света, регистрируемая за анализатором, вычисляется по формуле (1.4). Из них видно, что с увеличением электрического напряжения интенсивность регистрируемого фотоприемником света будет осциллировать, причем размах осцилляций (контраст) будет максимален, если $\varphi = \pi/4$.

Схема расположения элементов установки для электрооптических измерений представлена на рис.2.1. Плоскость поверхности ЖК ячейки ортогональна направлению пучка света. Ячейка расположена между скрещенными поляризаторами так, что плоскость преимущественного направления ориентации директора составляет угол 45° с главными осями поляризаторов. К электродам ячейки присоединен генератор переменного напряжения и вольтметр. Сигнал с фотоприемника идет на вход осциллографа.

Перед выполнением процедуры электрооптических измерений проверяется тип ориентации ЖК слоя – однородный или неоднородный, для этого ячейку поворачивают относительно оси падающего луча света вокруг оси, соответствующей преимущественному направлению ориентации ЖК. Для S- и В-ячеек зависимость интенсивности от угла поворота симметричная, для Н-ячеек несимметричная.

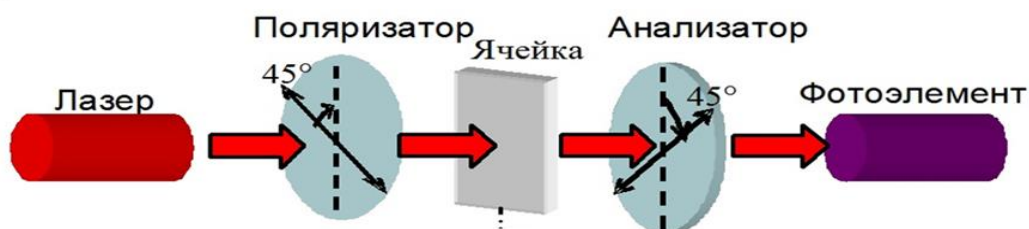


Рис.2.1. Схема расположения составных элементов установки для измерения интенсивности пропускания луча света ЖК ячейкой.

§2. Получение экспериментальной зависимости интенсивности пропускания от угла поворота вокруг оси, перпендикулярной лучу света

В [58, 101-103] используют метод измерения пропускания света в зависимости от угла поворота ЖК ячейки вокруг оси, перпендикулярной к направлению распространения светового пучка. Ячейка (рис.2.1) может вращаться вокруг оси, параллельной поверхности, перпендикулярной направлениям натирания и луча света. Измеряется пропускание света при повороте ячейки на различные углы вокруг этой оси.

В соответствии с (1.3) и (1.4), интенсивность света, регистрируемая за анализатором, зависит от интенсивности света, проходящего через оба поляризатора с параллельными осями, с учетом поглощения ячейки, и от φ - угла между направлением ориентации директора на подложках ЖК слоя и направлением главной оси поляризатора, но так угол φ постоянен в этих измерениях, то на колебания интенсивности он не влияет.

§3. Получение экспериментальной зависимости интенсивности пропускания от угла поворота вокруг оси, параллельной лучу света

Ячейка (рис.2.1) может вращаться вокруг оси, параллельной лучу света.

На рис.2.1 приведена схема измерительной установки, в табл.2.1 список входящего в ее состав оборудования, с номерами или обозначениями на рис.2.2.

Таблица 2.1.

Состав оборудования и обозначения.

Наименование	На рис.
1. Лазер (Модель ГН-5П)	1
2. Светофильтр (Модель СЗС-21)	2
3. Поляризатор (Модель NPFG-1220DU)	3
4. Жидкокристаллическая ячейка	4
5. Анализатор (Модель NPFG-1229DU)	5
6. Генератор (Модель ГЗ-33)	G1
7. Источник постоянного напряжения +9В (модель Б5-30)	G2
8. Вольтметр (Модель В7-78/1)	P1
9. Осциллограф (Модель LeCroy 62Xs)	P2
10. Аттенюатор (Модель ТТ-4117)	U1
11. Фотоприемник	A1
12. Фотодиод (Модель BPW20RF)	VD1

Измеряется пропускание света при повороте ячейки на различные углы вокруг этой оси. Использовался метод [104], в соответствии с которым осуществлялось снятие экспериментальной зависимости интенсивности пропускания от угла поворота вокруг оси, параллельной лучу света.

Для работы и расчетов использовался персональный компьютер. Была осуществлена автоматизация вращения ячейки в держателе (рис.2.2, рис.2.3) и

запись поступающей информации. Установка угла поворота в диапазоне от 0° до 360° при повороте ячейки вокруг оси, перпендикулярной лучу лазера и от -180° до $+180^\circ$ при повороте ячейки вокруг оси, параллельной лучу лазера с шагом до $0,05625^\circ$. Регистрация угла поворота с точностью до $0,05625^\circ$. Регулируемая скорость вращения вокруг оси: поворот от 30 секунд до 180 секунд по выбору экспериментатора. Поворот выполняется с заполнением памяти результатами.

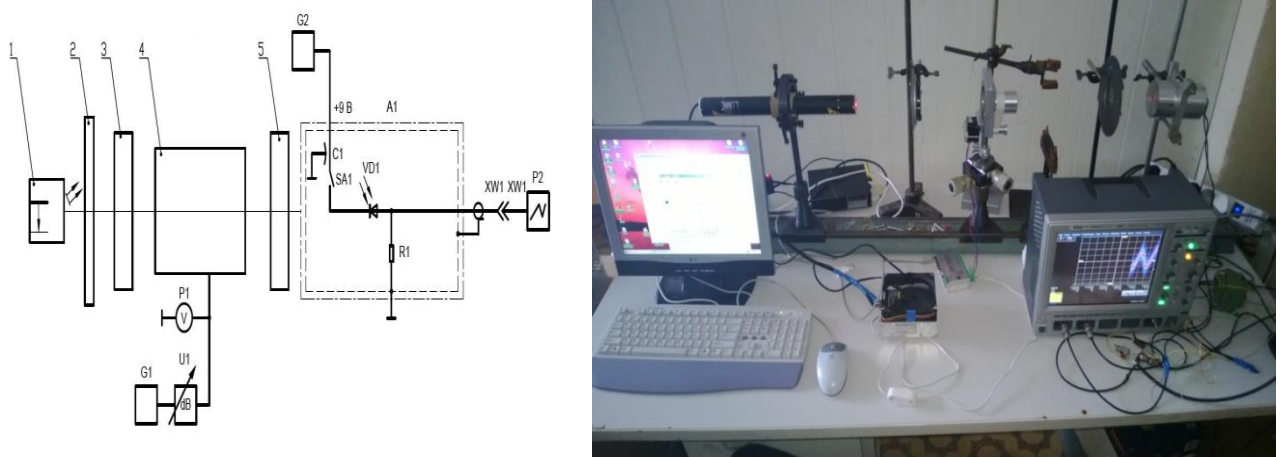


Рис.2.2. Схема измерительной установки, ее спецификация и внешний вид.

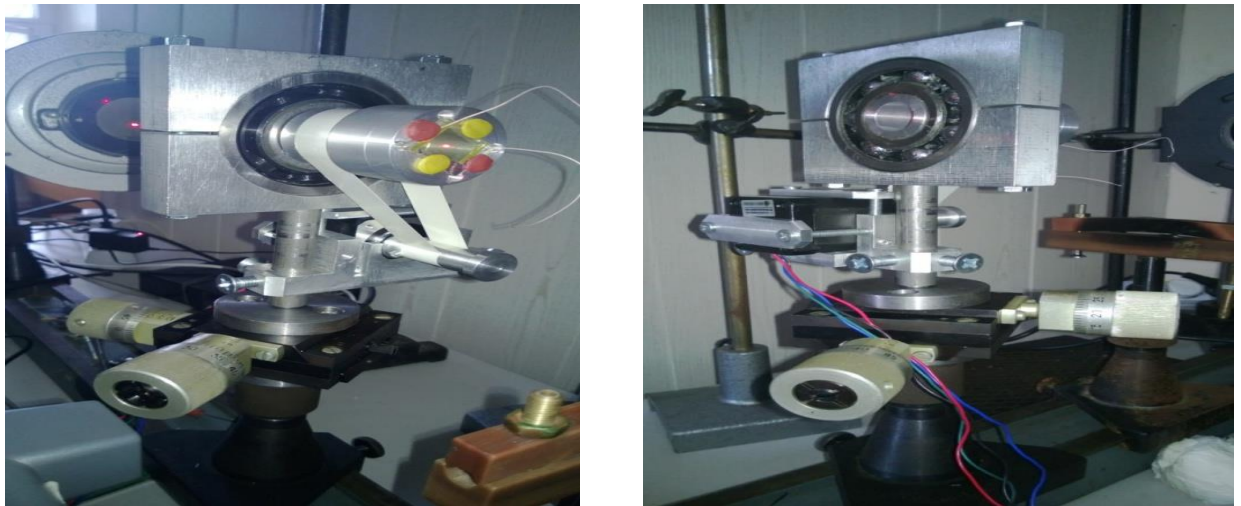


Рис.2.3. Основной подвижный блок в сборе

Процесс измерения происходит следующим образом. Луч лазера проходит через поляризатор и падает на ЖК ячейку, находящуюся в движении. После прохождения через движущуюся ЖК ячейку, луч проходит через

анализатор и попадает в фотоприемник. Вал, вращающий ячейку, приводится в движение ременной передачей от шагового мотора по заданной программе, установленной в блок управления мотором. Скорость вращения ячейки оптимально подобрана для своевременного снятия показаний с фотоприемника. Данные с фотоприемника попадают на осциллограф, где обрабатываются в специальной программе с возможностью записи массива данных в файл.

Управляющее воздействие на двигатель оказывается с компьютера, через программируемый блок управления.

§4. Автоматизированная система измерения дифракции света проходящего через полимер с периодическим микрорельефом

Луч лазера проходит (рис.2.4, рис.2.5, рис.2.6) через дифракционную решетку (образца полимера с микрорельефом, сделанного из двулучепреломляющего материала). Измеряется дифракционная картина на основании возвратно поступательной системы перемещения фотоэлемента, благодаря которой фиксируется интенсивность света.

Шаговый двигатель обеспечил линейное возвратно-поступательное (поперечное по отношению к лучу) перемещение фотоэлемента. Для обеспечения необходимой точности перемещения внедрили в автоматизированную систему измерений программируемый блок управления шаговым двигателем.

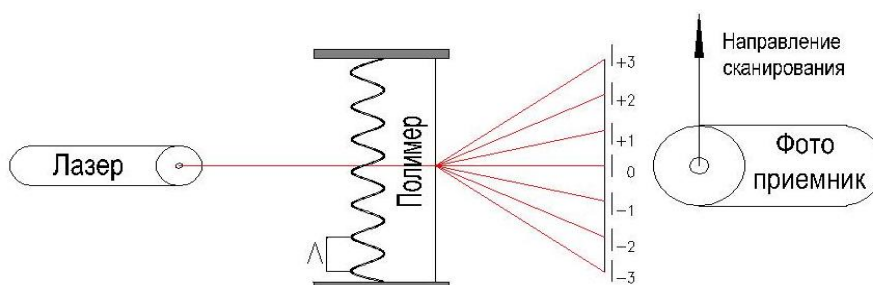


Рис.2.4. Схема установки для наблюдения дифракции.

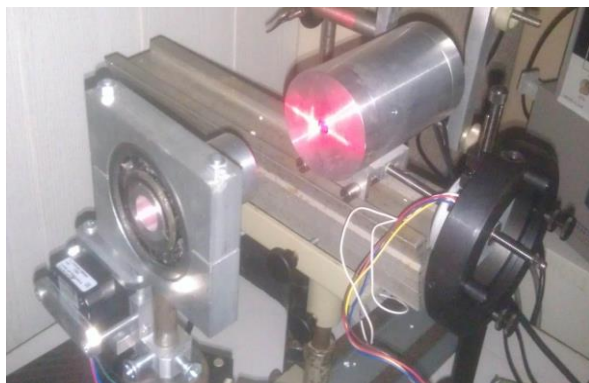


Рис.2.5. Подвижная часть (с фотоприемником) автоматической системы измерения дифракционной эффективности.



Рис.2.6. Общий вид установки. Также можно запрограммировать движение двигателя с заданным ускорением и движением назад.

§5. Материалы, применяемые для ориентации жидких кристаллов

Кремнийорганические соединения (КОС) занимают среди ориентантов ЖК особое место. Для пленкообразующих КОС, благодаря низкой температуре нанесения пленки и высокой стойкости к внешним воздействиям, нашлась обширная область применения в ЖК устройствах с повышенными требованиями к условиям эксплуатации. Концепция молекулярного микрорельефа развита в [66]. Угол наклона ЖК зависит от молекулярного строения фрагментов молекул КОС. Критическая поверхностная энергия твердой подложки $E_{кр}$, определяемая из величин краевых углов смачивания ряда жидкостей, уменьшается для поверхностно-активных веществ (ПАВ) с разной длиной углеводородной цепи.

Тип ориентации молекул ЖК на подложке зависит от взаимодействия на поверхности подложки постоянных дипольных моментов с электрическими зарядами. На приповерхностном монослое из склоненных концевых групп, и в зависимости от плотности упаковки ориентанта в поверхностном слое, образуется молекулярный рельеф. Угол преднаклона ЖК, для различных ориентантов, определяется молекулярным рельефом ориентанта. Для всей поверхности ориентанта постоянство данного угла преднаклона ЖК следует из однородности поверхностного монослоя ориентанта.

§6. Новые ориентианты

Ряд полиимидных и перфторированных ориентиантов, новых кремнийорганических соединений (КОС) был использован в работе. Впервые диапазон углов преднаклона директора ЖК был успешно реализован от 0° до 90° на данных ориентиантах. Такой широкий диапазон углов позволяет на этапе изготовления задавать различные характеристики ЖК ячейки, в том числе оптические. Это позволяет широко использовать в различных типах ЖК устройств ЖК ячейки с углами преднаклона, заданными с помощью новых ориентирующих покрытий, в том числе в дисплеях.

В [105-140] показана связь с азимутальным и полярным углами приповерхностной ориентации и микрорельефом поверхности для азимутальной и полярной энергии сцепления. Совпадающую с плоскостью микрорельефа плоскость директора ЖК задаст определяемый микрорельефом азимутальный угол на противоположных сторонах ячейки, если микрорельеф ЖК лежит в одной плоскости. Иначе будет твист, то есть закрутка директора между ориентирующими поверхностями в пространстве ЖК ячейки, если на противоположных сторонах ориентирующий микрорельеф располагается под углом друг к другу. Образцы имели в данной работе плоскость директора ЖК, predeterminedенную при изготовлении.

Параметры микрорельефа, задаваемые, как показано в [115, 140], при изготовлении ориентирующих покрытий, позволяют получать высокую полярную энергию сцепления. Полярный угол наклона директора ЖК у поверхности ориентианта варьирует в широком диапазоне. Для формируемого механической обработкой (натиранием) микрорельефа с различными пространственными характеристиками рассмотрен синусоидальный рельеф.

Подход формирования пленок КОС предложен авторами [115, 140]. Пленки КОС содержат фрагменты с молекулярным микрорельефом, сравнимые по размеру или форме с соответствующими параметрами молекул ЖК. Это позволяет варьировать угол наклона в как можно большем диапазоне и

повысить энергию сцепления пленок КОС с подложкой. Рассмотрено влияние на угол наклона директора и энергию сцепления параметров молекулярного нанорельефа. Показано авторами [115, 140] что поверхность низких частей (канавок) нанорельефа формируют одни компоненты, при формировании из смеси ориентантов молекулярного рельефа с регулярной структурой, а высокие части (гребни) рельефа формируют другие компоненты. Это ведет к возникновению приповерхностного слоя с чередующимся углом наклона вследствие разной энергии сцепления ЖК материала с разными частями нанорельефа. Однако угол усредняется в следующих молекулярных слоях ЖК и становится для каждого тонкого слоя ЖК однородным. В таблицах 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 показано химическое строение фрагментов пленок ориентантов [115].

Таблица 2.2.

Пленки полиимида

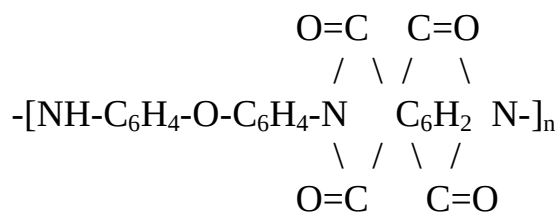


Таблица 2.3.

Кремнийорганические соединения (КОС) трифункциональные

Винилтриэтоксисила н Vinyl-Si(OC ₂ H ₅) ₃	Децилтриэтоксисила н C ₁₀ H ₂₁ Si(OC ₂ H ₅) ₃	Фенилтриэтоксисила н Ph-Si(OC ₂ H ₅) ₃	γ-аминопропил триэтоксисилан (АТМ-9)
$ \begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH} \\ \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}- \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{////////////////} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{R} \\ \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}- \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{////////////////} \\ \text{R децил C}_{10}\text{H}_{21} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5 \\ \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}- \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{////////////////} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{NH}_2 \\ \backslash \\ / \\ \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}- \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{////////////////} \end{array} $

Таблица 2.4.

КОС дифункциональные и монофункциональные

Дифункциональные: $R'R''Si(OC_2H_5)_2$ где $R'=R''=C_2H_5$, $R'=CH_3$, R'' гексил, октил, децил	Монофункциональные: $R(R')_2Si(OC_2H_5)$, где R фенил, R' н-отокси
$ \begin{array}{c} R' \quad R'' \\ \backslash \quad / \\ Si \\ / \quad \backslash \\ O \quad O \\ \quad \\ // \end{array} $	$ \begin{array}{c} R' \\ \\ R-Si-R'' \\ \\ O \\ \\ // \end{array} $

Формирование молекулярного микрорельефа в кремнийорганическом соединении происходит вследствие различной длины групп молекулярного рельефа, как показано на рис.2.7. В таблице 2.6 показан молекулярный микрорельеф поверхности [115].

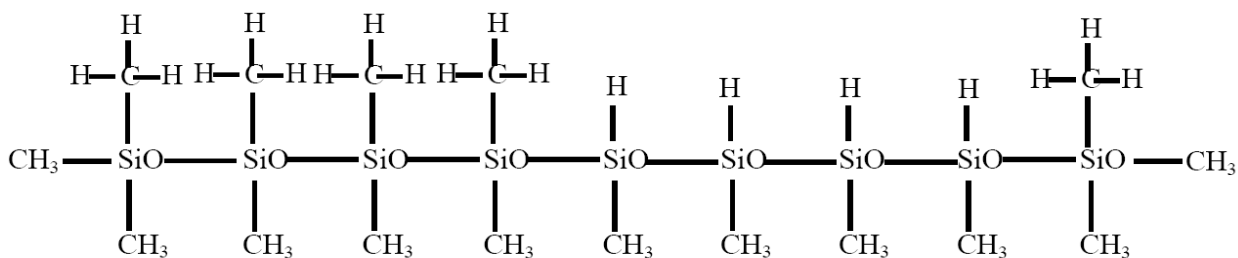


Рис.2.7. Молекулярный микрорельеф. [115]

Таблица 2.5.

Гексаорганотрисилоксаны, органоэтоксисилоксаны,
алкилгидридсилоксаны

$(R'R''SiO)_n$, где R' , R'' гидрид (H), метил, этил, октил, фенил, октокси, этокси

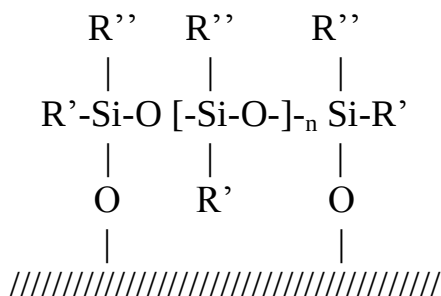
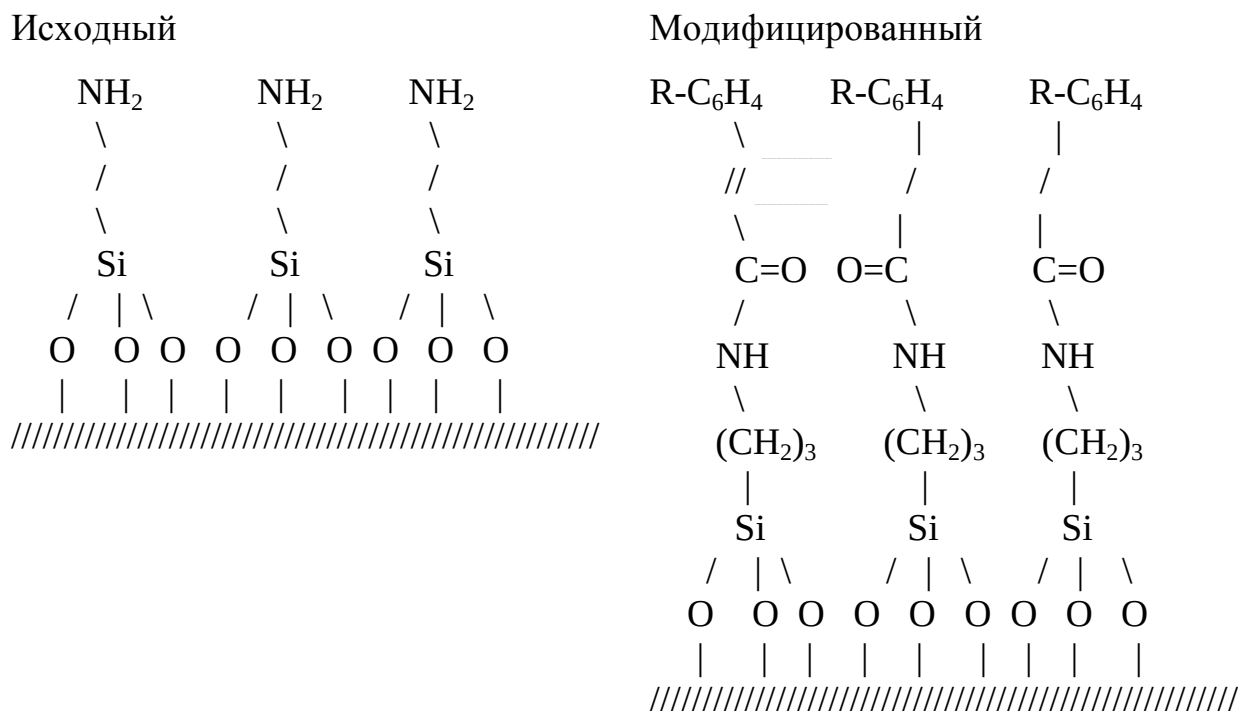


Таблица 2.6.

Структура КОС создает молекулярный микрорельеф на поверхности



Для определяющих энергию взаимодействия с молекулами ЖК элементов молекулярного рельефа отмечена важная роль химического состава, в конечном итоге, определяющая энергию и угол сцепления.

§7. Жидкокристаллическая ячейка с симметричными граничными условиями

В соответствии с процедурой, описанной в [40, 56, 57], были получены ячейки ЖК. Покрытие подложек полиимидными пленками осуществлялось в соответствии с [59-61]. Нанесение покрытий кремнийорганических соединений описано в [55, 62]. Использование полиимидных или кремнийорганических покрытий (ориентантов) обеспечивает выбранное заранее значение краевого угла директора ЖК.

1% раствор кремнийорганических соединений наносился на поверхность подложки при комнатной температуре (20±4°C) и центрифугировался. Образовавшееся покрытие сушилось на воздухе в течение 2 часов. Затем осуществлялась сушка при 120°C в течение 1,5 часа. Противоположные

поверхности натирались в противоположных или в параллельных направлениях, в зависимости от того, какое распределение директора ЖК по толщине ячейки предполагалось в итоге получить, однородное или неоднородное. Толщина ячейки задавалась тефлоновыми спейсерами (элементами, задающими толщину ячейки. Как правило, это полимерные пленки или фрагменты стекловолокна, имеющие сферическую или цилиндрическую форму). Толщина пустой ячейки измерялась по интерференционному спектру ячейки на спектрофотометре [57]. В большинстве описанных ниже экспериментов она составляла 23 мкм. Такая толщина ячейки обеспечивает большое изменение разности фазовой задержки $\Delta\Phi$ от напряжения и уменьшает измерительные погрешности. Заполнение ячеек производилось при комнатной температуре.

§8. Жидкокристаллическая ячейка гомеопланарная

Созданием гомеотропной ориентации на одной подложке и планарной на другой обеспечивается гомеопланарная ориентация ЖК ячеек.

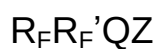
Планарная ориентация задается односторонним натиранием ориентирующего подслоя полимера, в качестве которого используется полиимидный лак (ПАВ). В данном случае применялся серийный лак марки АД-9103, используемый в производстве ЖКИ. Разведение $\sim 10^x$ от стандартной концентрации 13% по сухому веществу.

Состав: полиимидный лак (ПАВ) марки АД-9103, разведение $\sim 10^x$ от стандартной концентрации 13% по сухому веществу.

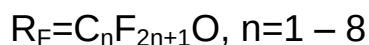
Режим нанесения: центрифугирование, 3000 об/мин; сушка 100°C 1 час; отжиг (имилизация) 300°C 1 час; натирание капроновой тканью, натянутой на колодку, 100 раз при умеренном нажиме.

Гомеотропная ориентация достигается путем нанесения слоя ПАВ, обладающего минимальной поверхностной энергией. Наносится слоем от 5 до 100 нанометров. Минимальной поверхностной энергией обладают пленки

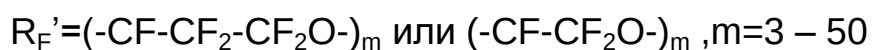
политетрафторэтилена (тефлона) или фторированные ПАВ, называемые эпилами. Эпилами, имеющие различные фирменные названия и состав, используются для обработки поверхностей с целью снижения трения и повышения износоустойчивости, антикоррозийности, влагозащиты ИС и печатных плат, пропитки одежды, модификации красок и т.д. В данных ячейках используется эпилам марки Полизам-05 производства ООО «Леотек-Группа» ТУ 2229-008-50903380-99. Эпилам марки Полизам-05 представляет собой вещество с названием эфироамин перфторполиоксцалкиленкарбоновой кислоты и химической структурной формулой



Перфторированный фрагмент



Изомер перфторированного фрагмента



Три или две перфторированных метильных группы.

$Q=CO$ или CS эфирная группа. $Z=-NHR_N$ или $-N(R_N)_2$, где R_N алкильная группа с C_1-C_6 . Z аминная группа. Пространственный изомер.

При любом соотношении n и m получается гомеотропная ориентация.

Наносился Полизам-05 производства ООО «Леотек-Группа» ТУ 2229-008-50903380-99, эфироамин перфторполиоксцалкиленкарбоновой кислоты в хладоне-112. Режим нанесения ориентирующей пленки: мойка и обезжиривание подложек (в данном случае кипячение в диметилформамиде); отжиг подложек при температуре $300^\circ C$ в течение 1 часа; обработка подложек ультрафиолетом в течение 1 часа; вымачивание в полизама при комнатной температуре в течение 20 минут; обдув, центрифугирование; закрепление полизама при температуре $120^\circ C$ в течение 1 часа; смыв незакрепленного покрытия. Приготовление ячеек с гибридной ориентацией: сборка ячеек (тефлоновые прокладки 20 микрон, клейка эпоксидной смолой); при

комнатной температуре заполнение ячеек ЖК-807 (бифенилы), ЖК-440, ЖК-1001; прогрев до изотропного состояния.

§9. Жидкокристаллическая ячейка гибридная (не гомеопланарная)

Подложки гибридных ячеек могут также покрываться и полностью гомеотропным или полностью планарным ориентантом, а парная (то есть другая) подложка в таком случае покрывается ориентантом с промежуточным углом создаваемого им преднаклона директора ЖК. Получены оригинальные экспериментальные данные (табл.2.7, табл.2.8).

Таблица 2.7.

Краевые углы ориентации директора от 0° до 90° и значения полярной энергии сцепления

Образец	Ориентирующий материал	Угол наклона $\theta, ^\circ$	Полярная энергия сцепления, $W, 10^{-5}$ Дж/м ²
ЖК-440, $\Delta\epsilon < 0$			
2094	Винилтриэтоксисилан Vinyl-Si(OC ₂ H ₅) ₃	24	9,7
2288			6,8
2096	Децилтриэтоксисилан C ₁₀ H ₂₁ Si(OC ₂ H ₅) ₃	24	7,9
2290			2,8
2098	Фенилтриэтоксисилан Ph-Si(OC ₂ H ₅) ₃	34	10
2292			8,9
2100	γ-аминопропилтриэтоксисилан (АТМ-9)	62	6,4
2102	[Si(C ₂ H ₅) ₂ O] _n [CH ₃ HSiO] _m 20:80	90	11
2296			6,3
2104	[Si(C ₂ H ₅) ₂ O] _n [CH ₃ HSiO] _m 40:60	56	8,1
2106	Олигометилгидридсилан [CH ₃ -SiO-H] _n	34	3,5
2300			1,7
2108	Гексаэтилциклотриэтоксисилан	40	6,3
ЖК-807, $\Delta\epsilon > 0$			
2095	Винилтриэтоксисилан Vinyl-Si(OC ₂ H ₅) ₃	74	8,4

2097	Децилтриэтоксисилан $C_{10}H_{21}Si(OC_2H_5)_3$	68	1,7
2099	Фенилтриэтоксисилан $Ph-Si(OC_2H_5)_3$	52	11,6
2101	γ -аминопропилтриэтоксисилан (АТМ-9)	-	1,5
2103	$[Si(C_2H_5)_2O]_n [CH_3HSiO]_m$ n:m=20:80	48	11,6
2105	$[Si(C_2H_5)_2O]_n [CH_3HSiO]_m$ n:m=40:60	40	11
2108	Гексаэтилциклотриэтоксисилан		4
2109		0	6,3

Для обеспечения гибридной ориентации ЖК ячеек, на противоположных сторонах ячейки обеспечивают разные краевые углы. Для этого наносят различные ориентирующие покрытия. Покрытия различаются химическим составом или различной их поверхностной обработкой. Поверхностная обработка формирует соответствующий ориентирующий микрорельеф.

Значения полученных параметров, характеризующих ориентацию ЖК в гибридных ячейках, приведены в Таблице 2.8.

Таблица 2.8.

Параметры, характеризующие ориентацию ЖК в гибридных ячейках

№	ЖК	Ориентант		Угол преднакл		Натирание		Энергия сцепл W, Дж/ м ²
		№1	№2	№1	№2	№1	№2	
2744	807	ПИЛК	Al_2O_3	0	16	Есть	Нет	2.3×10^{-3}
2745	1289			0	29			4.0×10^{-3}
2746	807	ПИЛК	Децилтри этоксисилан	0	23	Есть	Нет	9.5×10^{-3}
2747	1289			0	32			2.2×10^{-3}
2748	807	Al_2O_3	Децилтри этоксисилан	9	12	Нет	Нет	8.5×10^{-3}
2749	1289			45	45			2.5×10^{-5}
2750	807	ПИЛК	Хромолан	18	90	Есть	Нет	5.7×10^{-5}
2751	1289			27	90			2.7×10^{-4}

Было измерено значение полярной энергии сцепления ЖК с подложкой W для применявшихся комбинаций ориентантов. Для случая гибридных ячеек с

разными ориентирующими покрытиями можно говорить только об усредненной эффективной величине энергии сцепления.

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.

§10. Методики экспериментально – расчетного определения ряда параметров ЖК материалов и ЖК ячеек с неоднородной структурой

Разработаны новые методики:

- экспериментальное определение разности фазовой задержки слоя ЖК при заданных оптических параметрах ЖК
- экспериментальное определение угла наклона жидкого кристалла на внутренней поверхности ориентирующей пленки, нанесенной на внутреннюю сторону подложки в жидкокристаллической ячейке и устройстве.
- экспериментальное определение полярной энергии сцепления жидкого кристалла с ориентирующей пленкой на внутренней поверхности ориентирующей пленки, нанесенной на внутреннюю сторону подложки в жидкокристаллической ячейке и устройстве.
- экспериментальное определение необыкновенного показателя преломления жидкого кристалла и толщины слоя ЖК в жидкокристаллической ячейке и устройстве.
- экспериментальное определение азимутальной энергии сцепления жидкого кристалла с ориентирующей пленкой на внутренней поверхности ориентирующей пленки, нанесенной на внутреннюю сторону подложки в жидкокристаллической ячейке и устройстве.

Разработанные методики основываются на использовании электрооптического метода [57]. В этом методе измеряется пропускание монохроматического поляризованного излучения, прошедшего через ЖК ячейку с заданным распределением ориентации ЖК, помещенную между скрещенными поляризаторами. Этот метод описан выше.

Для экспериментального определения поверхностного угла используются также результаты расчетов оптических характеристик ячейки по программе, разработанной в данной работе.

Методики предназначены для измерения заданного свойства нематического жидкого кристалла (НЖК) без добавок или с малой добавкой холестерического ЖК (ХЖК), не создающего закрутку слоя ЖК.

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».

§11. Диэлектрические свойства жидких кристаллов

Были созданы ЖК ячейки с комбинированной ориентацией (рис.2.8) для изучения зависимости анизотропии диэлектрической проницаемости от температуры [80-90]. Была использована установка на базе платы аналогового входа-выхода DAC-NI PCI-6281, National Instruments, США (рис.2.8). Исследовано влияние краевых углов наклона молекул ЖК (с положительной диэлектрической анизотропией) в комбинированной плоской ячейке на результаты, полученные в ходе эксперимента по изучению зависимости реакции (отклика) ЖК от температуры. Было смоделировано влияние пространственного распределения ориентации ЖК на уровень сигнала в изотропной фазе. Установлено, что предложенная структура дает возможность в зависимости от температуры формировать сигналы высокого уровня в мезофазе и низкого уровня в изотропной фазе.

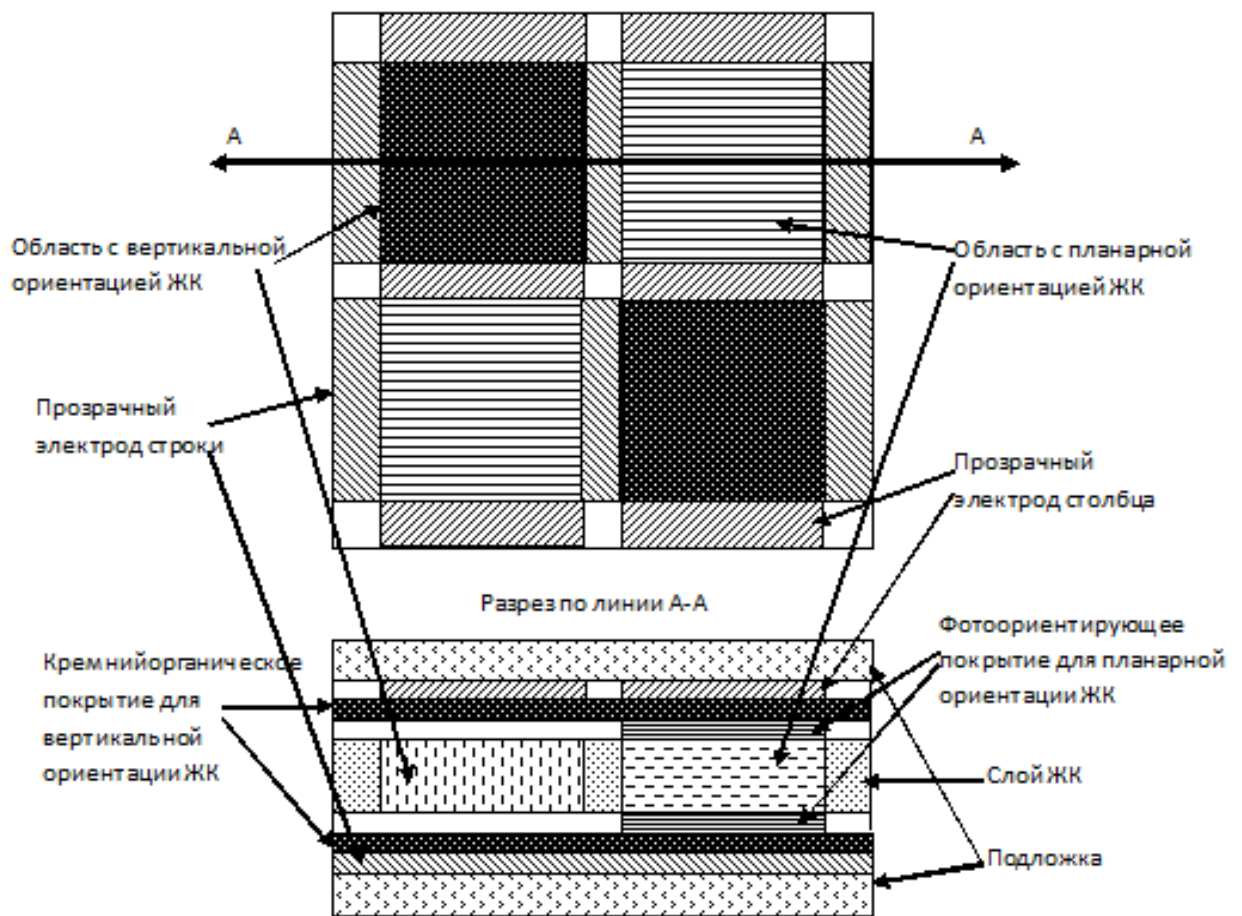


Рис.2.8. Конструкция комбинированной ЖК ячейки.

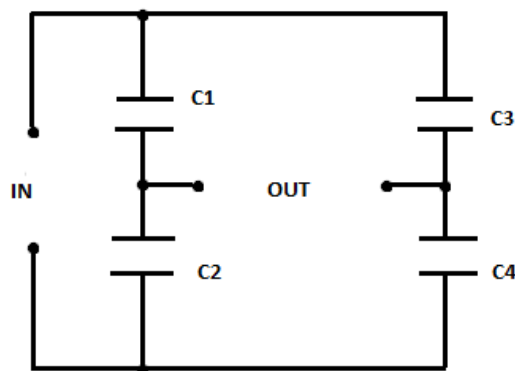


Рис.2.9. Электрическая схема комбинированной ЖК ячейки

Параметры, характеризующие упорядочение молекул внутри жидкого кристалла (параметр порядка, анизотропия диэлектрической проницаемости и величина двулучепреломления) изменяются при изменении температуры.

На эксперимент накладываются определенные ограничения:

1) Подаваемый на ячейку сигнал должен быть коротким импульсом прямоугольной формы. Его длительность τ должна быть меньше 1 мс, но не короче времени заряда электрической емкости: $t=RC$ (2.1)

где R – сопротивление электродов в ЖК ячейке, не превышающее 1 кОм, C – емкость ячейки, равная 10 нФ. Таким образом, исходя из этих значений, длительность импульса должна быть $\tau = 100$ мкс.

2) Средняя величина напряжения, подаваемого на ЖК ячейку, должна быть меньше порогового напряжения переключения жидкого кристалла $V_{th}=2\pi(K_{11}/\epsilon_0\Delta\epsilon)^{1/2}$, где K_{11} – коэффициент упругости, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

3) Подаваемый сигнал должен быть электрически симметричным. При этом амплитуды входного (V_{IN}) и выходного (V_{OUT}) сигнала связаны соотношением (2.2.б). Введено понятие диэлектрического отклика D_r (dielectric response) (2.2.a) в пространственно неоднородной анизотропной среде, пропорционального $\Delta\epsilon^{\text{эф}}$ и обратно пропорционального сумме компонент диэлектрической проницаемости.

$$D_r = \frac{\epsilon^{\text{эф}}(\theta_1) - \epsilon^{\text{эф}}(\theta_2)}{\epsilon^{\text{эф}}(\theta_1) + \epsilon^{\text{эф}}(\theta_2)} \quad (2.2.a)$$

$$V_{OUT} = D_r V_{IN} \quad (2.2.б)$$

Использовались ячейки, состоящие из двух стеклянных подложек с зазором порядка 20 микрон (рис.2.8). Емкость конденсаторов C_1 и C_4 определяются величиной $\epsilon_{\perp}$, емкость конденсаторов C_2 и C_3 определяются $\epsilon_{\parallel}$.

$$C_1 = C_4 = \frac{\epsilon_{\perp} \epsilon_0 S}{d} \quad C_2 = C_3 = \frac{\epsilon_{\parallel} \epsilon_0 S}{d} \quad (2.3)$$

Ячейки были заполнены ЖК:

5ЦБ с интервалом температур ЖК фазы 25-35°C,

Е7 (от -20 до +60°C),

смесь MLC-5700-000 (от -30 до +90°C).

§12. Дифракция на оптически анизотропных средах с периодической микроструктурой

Применение подложек с периодическим микрорельефом описано в [50,74]. В [96-100, 116, 117] рассмотрены оптические свойства многослойной пространственно периодической структуры с послойно различными оптически анизотропными свойствами.

На рис.2.10 показана теоретическая модель синусоидального поверхностного рельефа. На рис.2.11 показана теоретическая модель прямоугольного поверхностного рельефа. В обоих случаях плоскость поляризации падающего луча повернута на 45° к направлению рельефа. Период микрорельефа - от 0,5 мкм до сотен микрометров, высотой до 1 мкм.

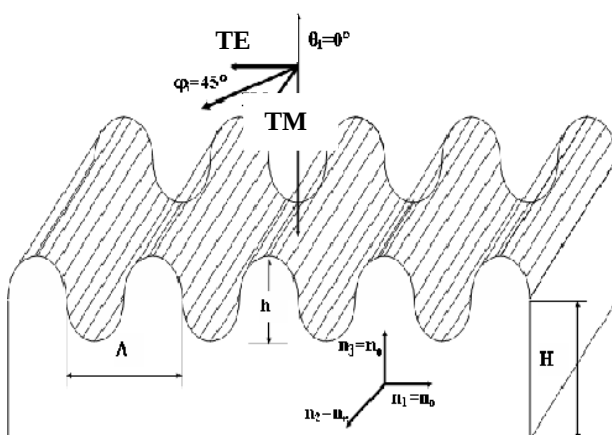


Рис.2.10. Синусоидальный рельеф полимерной пленки (теоретическая модель).

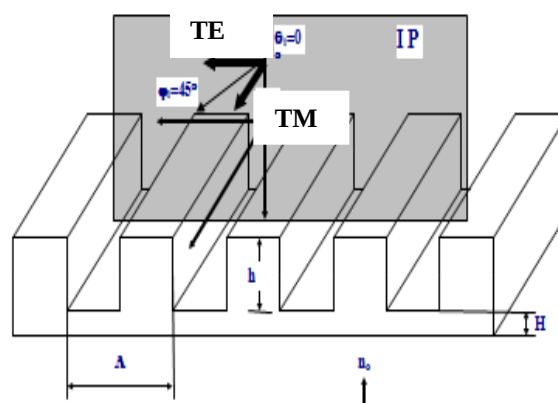


Рис.2.11. Прямоугольный рельеф полимерной пленки (теоретическая модель).

Дифракционной решеткой является пленка полимера с заданной формой микрорельефа и периодической структурой. Исследовалось прохождение через дифракционную решетку монохромной волны света. Образцы изготовлены на Химфаке МГУ. Период Λ поверхностного микрорельефа полимерной подложки с твердым покрытием находится в диапазоне от 0,5 мкм до сотен микрометров, высотой до 1 мкм. Образцы полимера имели следующие характеристики (табл.2.9):

Таблица 2.9.

Характеристики образцов полимера и процесс изготовления.

№ образца	18	42	51
Прибор	Инстрон	Инстрон	Инстрон
ширина	10мм	10мм	10мм
длина	30мм	30мм	30мм
Предварительная обработка материала	спирт	спирт	спирт
Время нанесения	60 сек	180 сек	60 сек
Pt покрытия			
Температура деформации	90 °С	90 °С	90 °С
Время деформации	84 мин	84 мин	84 мин
Время выдержки при температуре деформации	25мин	25мин	25мин
Время выдержки при комнатной температуре	8мин	8мин	8мин
Скорость установленная	0,5 мм/мин	0,5 мм/мин	0,5 мм/мин
Скорость реальная	0.5 мм/мин	0.5 мм/мин	0.5 мм/мин
Относительное удлинение ϵ	140 %	140 %	140 %
Относительное сжатие m	25 %	25 %	30 %
период микрорельефа d	2690 нм	2152 нм	2690

На рис.2.12. показан разрез профиля одного из образцов.

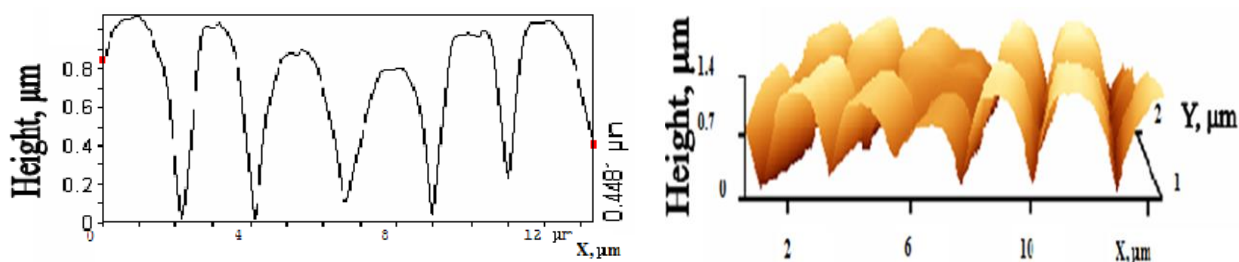


Рис.2.12. Сверху разрез и снизу поверхность микрорельефа, образовавшегося при деформации полимерной пленки с тонким твердым покрытием.

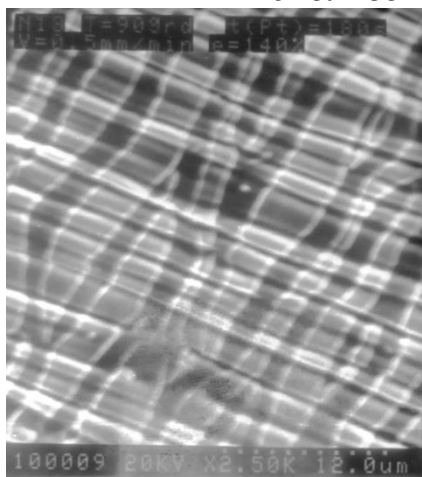
Микрорельеф формировался растягиванием полимерной пленки, покрытой менее упругим поверхностным слоем. При растягивании поверхностный слой достиг предела относительной упругой деформации раньше, чем основная пленка, и необратимо деформировался, сформировав циклоидоподобный рельеф, глубина которого сопоставима с толщиной покрытия.

В таблице 2.10 показаны данные, полученные с использованием атомно-силового микроскопа. Обращает на себя внимание профиль. Он примерно сопоставим для всех трех образцов.

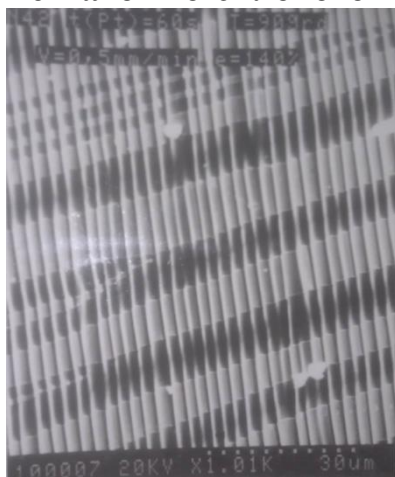
На рис.2.13 приведена слоистая структура двулучепреломляющего материала с периодическим микрорельефом. На рис.2.14 проиллюстрированы комплексные амплитуды электромагнитной волны, распространяющейся через слоистую структуру с разными оптическими характеристиками слоев.

Таблица 2.10.

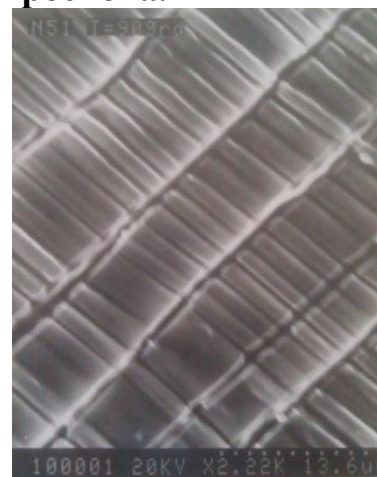
Фотографии образцов с поверхностным микрорельефом, полученные с использованием атомно-силового микроскопа.



образец 18



образец 42



образец 51

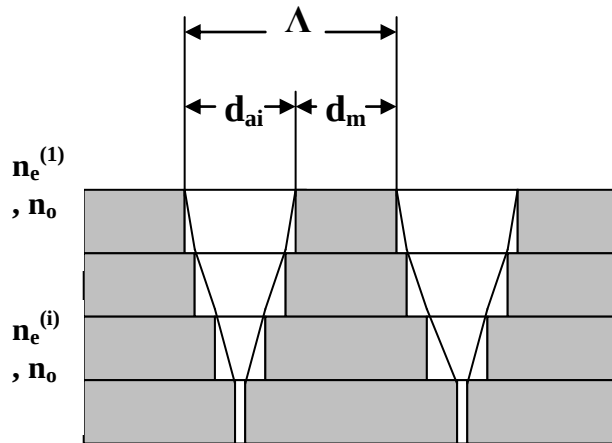


Рис.2.13. Представление в виде последовательности квазиоднородных слоев двулучепреломляющего материала с поверхностным микрорельефом.

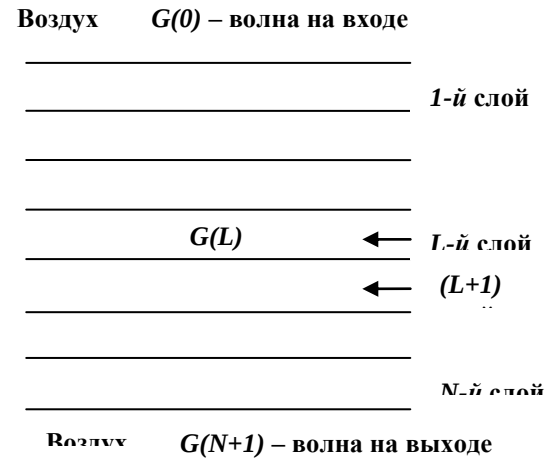


Рис.2.14. Распространение через структуру с разными оптическими характеристиками слоев электромагнитной волны с комплексной амплитудой.

Пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) со слоистой анизотропной структурой рассмотрены в [91, 94, 95] для создания ЖК устройств с заданными оптическими характеристиками [92, 120-123]. Зависимость поляризации в дифракционных порядках от слоистой оптически и диэлектрически анизотропной структуры среды описана в [106, 107]. Упомянутая структура представляется стопкой слоев в [88, 93], развивая метод [80, 81]. В [124], для расчета распространения света в анизотропных средах рекомендуется прямое интегрирование уравнений Максвелла как наиболее точное. В [96-100, 125-129] рекомендуется FDTD (finite-difference time-domain) [130, 131] для решения электродинамических задач и расчета дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Связь оптических и диэлектрических характеристик ЖК с характеристиками их поверхностного взаимодействия рассматривается в [132-140]. В [141-150] описано применение ЖК в фокусирующих и дифракционных элементах. В данной работе как для прошедшего сквозь дифракционную решетку, так и для отраженного от дифракционной решетки светового потока теоретически смоделированы дифракционные интенсивности методом, расчета дифракции на анизотропных решетках с периодическим микрорельефом, описанным в [96-100].

§13. ЖК-композиты, содержащие сферические капли ЖК

Впервые использованы в оптике ЖК-композиты на основе боросилоксана (получен по методике из патента РФ [151]) и нематического жидкого кристалла ЖК-1282. Композиты имеют выраженную двухфазную природу, где ЖК-фаза заключена в каплях размером от единиц до десятков микрон (рис.2.15), как показали микроскопические исследования.

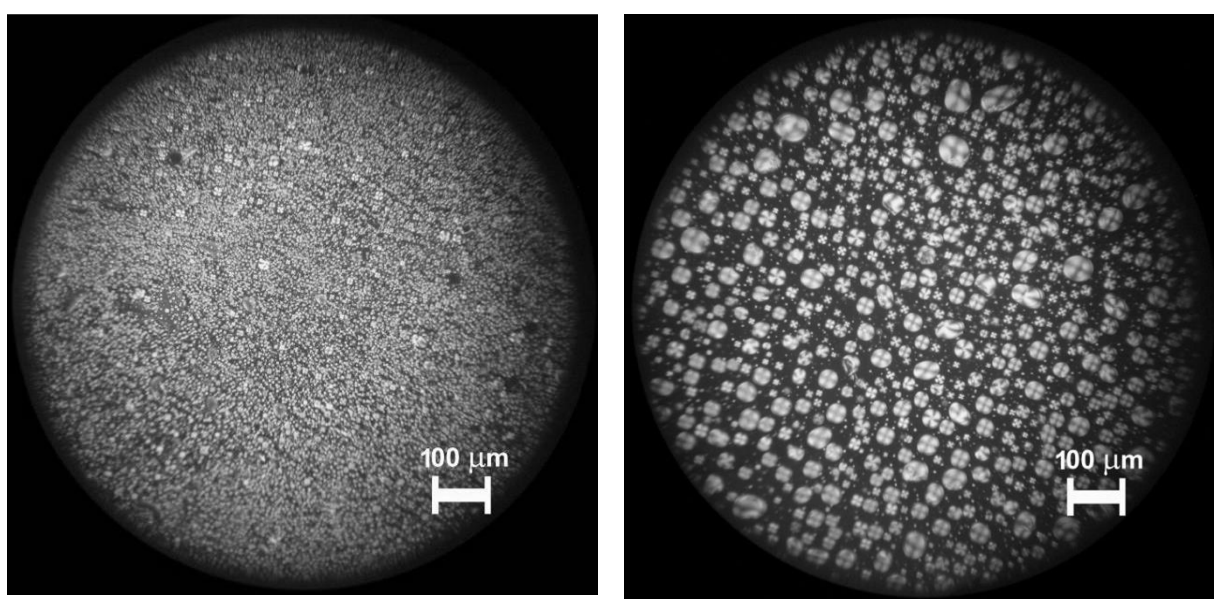


Рис.2.15. Микроскопический снимок образца ЖК-композита на основе боросилоксана и ЖК-1282 в скрещенных поляроидах.

Боросилоксан (БС) интересен в качестве матрицы ЖК-композита, так как он обладает уникальными механическими свойствами дилатантной жидкости, сохраняя все достоинства силиконовых материалов. Получают БС реакцией силоксанов с соединениями бора. ЖК-композиты были получены с помощью метода SIPS (Solvent-Induced Phase Separation) индуцированного испарением растворителя фазового разделения. Процессы многократной вытяжки чередуются с перемешиванием (рис.2.16), БС легко насыщается ЖК вплоть до концентрации в 40 мас. % [151].

Структура такова, что, обволакивая и смачивая ЖК во внутреннем объеме, на поверхности композитов постоянно присутствует только силиконовый материал. Количество ЖК, которое растворяется в боросилоксане при комнатной температуре, по-видимому, 2,13 %, т.к. композит с содержанием ЖК 41,2 мас. % имеет показатель преломления на уровне концентрации ЖК в материале 2,13 мас. %. С нашими экспериментальными данными в целом хорошо согласуется растворимость в силиконах ЖК близкого химического состава, которая обычно составляет около 4 мас. % [152].

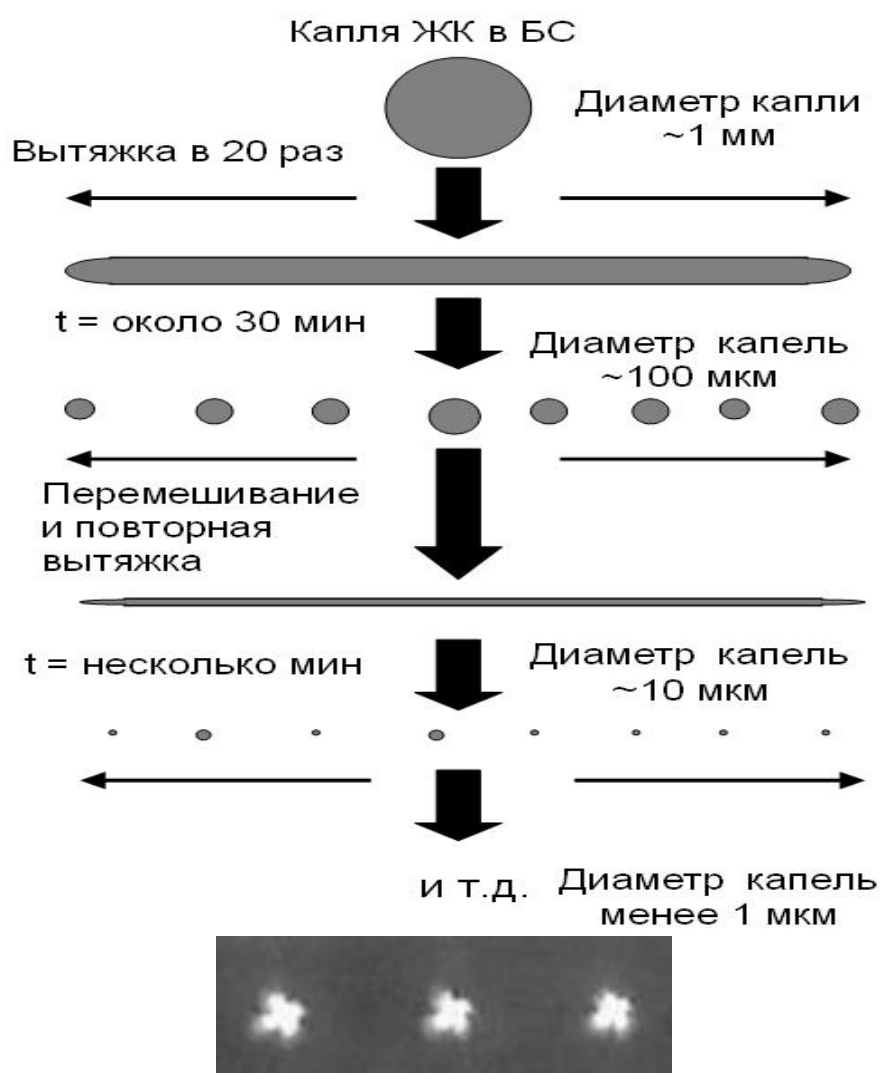


Рис.2.16. БС легко насыщается ЖК, процессы многократной вытяжки чередуются с перемешиванием

Технология формирования микрокапель жидкого кристалла (ЖК) заданной формы размера разработана, математически смоделирована,

экспериментально апробирована. Показана возможность получения сферических капель ЖК с размерами от микронов до десятков микрон. Могут быть использованы различные подходы по трехмерной сшивке материала матрицы, с образованием гелеподобных систем, для фиксирования формы капель ЖК. При помощи заранее введенного в небольших количествах УФ-сшиваемого акрилового агента может быть осуществлена сшивка самого ЖК. Стандартными сшивающими системами, широко применяемыми при производстве и применении стандартных силиконовых герметиков, может быть осуществлена сшивка полидиметилсилоксанового материала, с концевыми гидроксильными группами, из которого формируется матрица.

Два фундаментальных явления, относящихся к физике и механике сложных жидкостей лежат в основе разработанной технологии: Образование характеризующихся неньютоновской природой протяженных относительно долгоживущих мостов жидкостей; Самопроизвольный, вызванный неустойчивостью Релея-Тейлора, распад образовавшихся мостов на капли.

Наряду с привычным свойством жидкостей — текучестью, для формирования протяженных относительно долгоживущих мостов жидкость должна обладать еще свойствами эластичного тела - упругостью, то есть характеризоваться неньютоновскими свойствами. Время жизни жидкой тонкой нити радиуса r определяется, в соответствии с теорией Рэлея, плотностью ρ , поверхностным натяжением α и вязкостью μ жидкости, актуальны два характерных времени: вязкое $\tau_{\text{вязк}}$ и инерционное $\tau_{\text{ин}}$.

$$\tau_{\text{ин}} = \left(\frac{\rho r^3}{\alpha} \right)^{1/2}, \quad \tau_{\text{вязк}} = \frac{6\mu r}{\alpha} \quad (2.4)$$

Одно из самых известных применений явления образования Релеевских мостов жидкости - это прядение волокон из растворов полимеров. Также и образование эмульсий двух несмешивающихся жидкостей происходит через стадию образования вытянутых цилиндров. С растягивания капли диспергируемой жидкости до формы близкой к цилиндру (нити) начинается

механическое диспергирование двух жидкостей, цилиндр самопроизвольно распадается на капли, т.к. становится неустойчивым. В качестве диспергирующей среды использован боросилоксан, а в качестве диспергируемой жидкости использован ЖК.

Микрокапли ЖК заданной формы могут являться активной оптической средой, боросилоксан обладает высокой прозрачностью и диэлектрическими свойствами, такая система, обладающая возможностью управления свойствами при помощи полей различной природы, может быть использована в оптоэлектронике и дисплейной технике.

Были экспериментально получены образцы с микрокаплями ЖК, выстроенным вдоль одной линии. Разработанная технология позволяет сформировать целые ансамбли капель, от нескольких штук до десятков, которые могут найти новые применения в оптике, дисплейной технике.

§14. ЖК-композиты, содержащие цилиндрические нити ЖК

Поликапролактон использован в качестве матрицы ЖК-композита. С помощью оригинального метода осуществлено изготовление ЖК-композита поликапролактон-7ЦБ. Образец композита, как показали микроскопические исследования в скрещенных поляризаторах, представляет собой полимерную нить (рис.2.17), включающую протяженный микроцилиндр с 7СВ.

Поликапролактон расплавляли и помещали в его объем микрокаплю 7СВ, затем формировали полимерную композитную нить, сочетая торсионные и одноосные деформации. Охлаждением поликапролактона до комнатной температуры фиксировали ЖК-композит. Поперечное сечение нити, как показали исследования в проходящем свете, имеет внутреннюю полость овальной формы, заполненную ЖК (рис.2.18). Двулучепреломление различной интенсивности наблюдается как в в цилиндре, наполненном ЖК, так и в полимерном образце (за счет кристаллической структуры полимера).

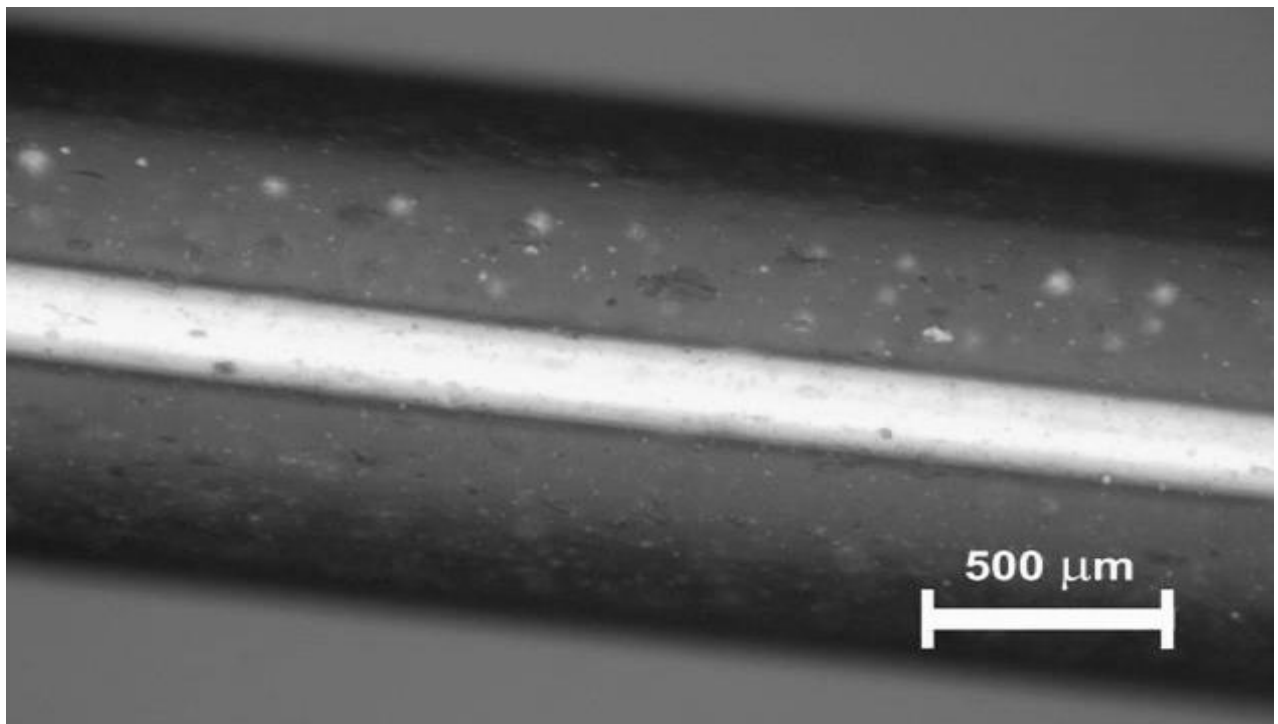


Рис.2.17. Полимерную нить, включающая ЖК-микроцилиндр.

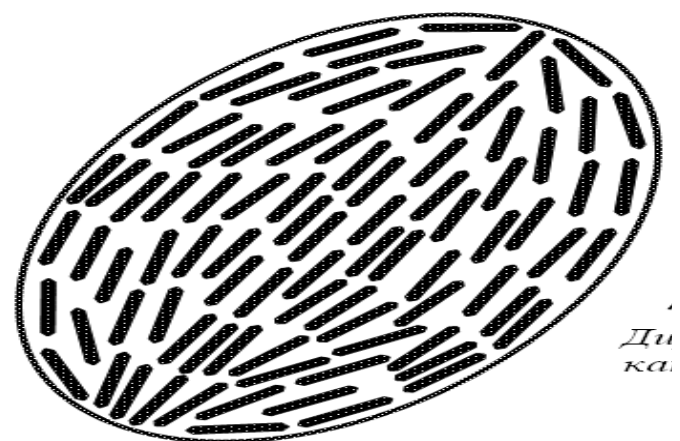
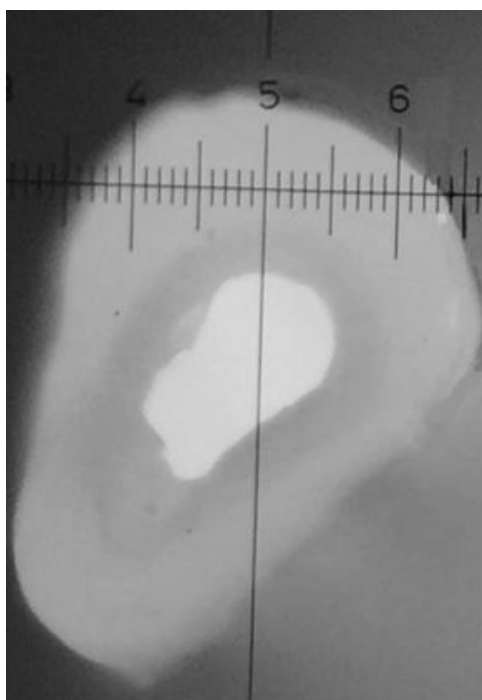


Рис.2.18. Микроскопические снимки в скрещенных поляризаторах образца ЖК-композита. Поперечное сечение. Цена деления составляет 10 мкм.

Глава 3. Оптические и ориентационные свойства ЖК слоев с произвольным приповерхностным углом наклона и различным пространственным распределением директора

Часть 1. Оптические свойства ЖК ячеек

§ 1. Жидкокристаллическая ячейка

Гибридная ориентация ЖК ячеек. Структура типичной жидкокристаллической ячейки (рис.3.1.1), с нанесенными на внутреннюю сторону подложек прозрачными электродами и ориентирующими слоями, и процедура изготовления описаны в Главе 1 и Главе 2.

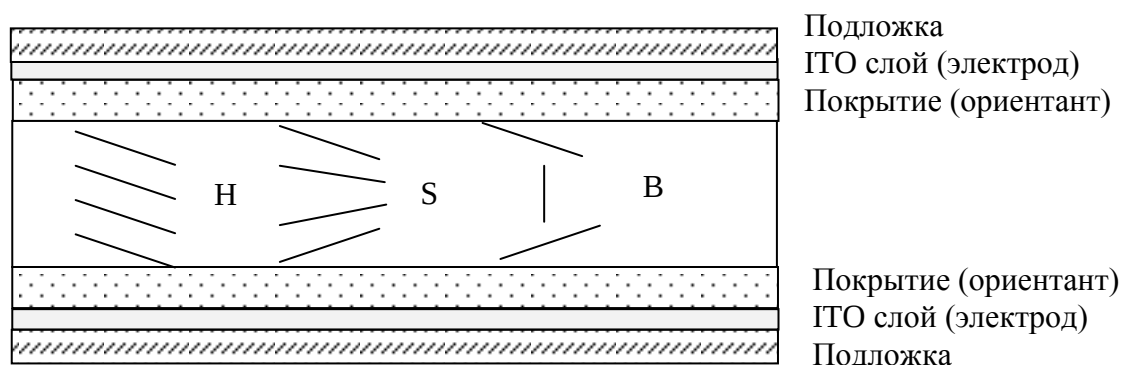


Рис.3.1.1. Структура ЖК ячейки.

Для изготовления гибридной ориентации ЖК ячеек наносят различные (на противоположных подложках) ориентирующие покрытия, подвергают их различной механообработке, обеспечивая для директора ЖК заданные приповерхностные углы наклона, как показано на рис.3.1.2.

Оптический эквивалент весьма сложной картины (рис.3.1.3.) распределения директора ЖК по толщине можно получить, пропуская луч света последовательно через различные сорта двулучепреломляющего полимера или стопку ячеек ЖК с меньшими угловыми диапазонами.

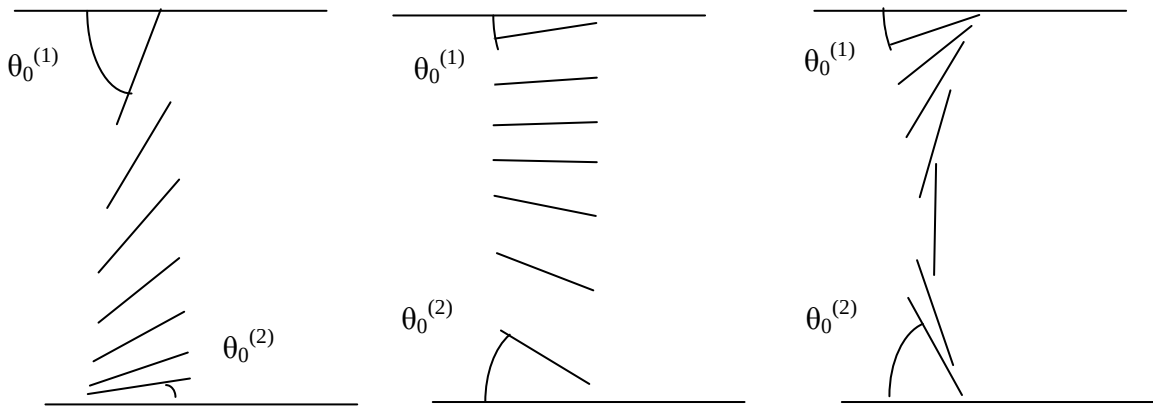


Рис.3.1.2. Разносторонние ЖК ячейки. Слева направо: *Hyb90°*, *HybS*, *HybB* с несимметричными углами преднаклона директора ЖК.

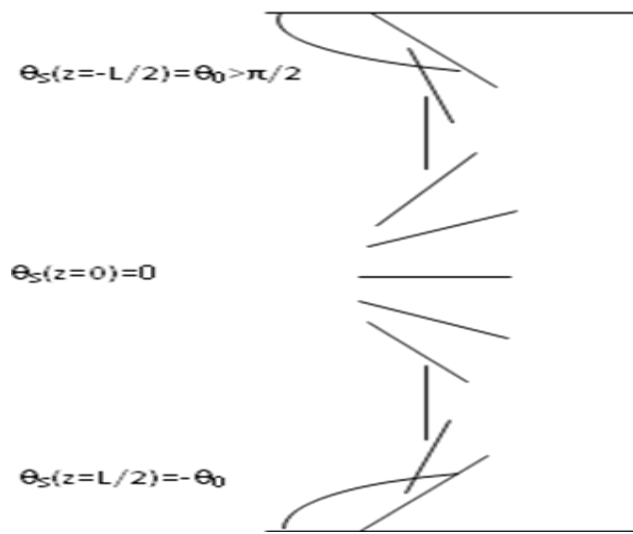


Рис.3.1.3. Сложное распределение директора ЖК по толщине.

§2. Распределение по толщине ячейки угла наклона директора ЖК

Для упрощения расчетов использовалось одноконстантное приближение (для нематических ЖК константы упругости Франка $K_{11}=K_{33}$) в теоретической модели. При планарной начальной ориентации нематика в ЖК ячейке и при условии, что поле перпендикулярно поверхности ячейки, эффект Фредерикса в магнитном поле описывается уравнением (т.н. «условие равновесия»):

$$\frac{d}{dz} \left[\left(K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta \right) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \chi_a H^2 \sin^2 \theta \right] = 0 \quad (3.1.1)$$

Если поле равно нулю и при вышеупомянутом условии $K_{11}=K_{33}$ принимая во внимание, что $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$, то $d\theta/dz = \text{const}$. Это верно, если $\theta(z) = \text{const} \cdot z + \text{const}_2$ и означает линейное распределение угла наклона директора

ЖК по перпендикулярной поверхностям ЖК ячейки оси координат. Приведена структура типичной жидкокристаллической ячейки как с симметричным (рис.3.1.1), так и с асимметричным (рис.3.1.2) распределением директора ЖК по толщине ячейки. От координаты по толщине ячейки угол (в диапазоне от 0° до 90°) зависит линейно, так как при одноконстантном приближении, от локального угла наклона директора упругая энергия ЖК не зависит.

При координате по толщине ячейки, равной половине от толщины слоя ЖК в ячейке, ячейки с S распределением (закон распределения для S ячеек был предложен: $\theta = \theta_0 - 2\theta_0 z/L$) характеризуются равным нулю углом наклона директора ЖК. При координате по толщине ячейки, равной половине от толщины слоя ЖК в ячейке, ячейки с В распределением (закон распределения для В ячеек был предложен: $\theta = \theta_0 + (\pi - 2\theta_0)z/L$) характеризуются равным $\pi/2$ углом наклона директора ЖК.

§3. Для ячеек с различными типами неоднородных распределений зависимость нормированной разности фаз $\Phi(\theta_0)$ от угла преднаклона

Двулучепреломление ЖК $\Delta n = n_e - n_o$. Максимальное значение разности фаз $\Delta\Phi_{\max} = 2\pi\Delta n L/\lambda$, достижимо в ячейках с планарной ($\theta_0^{(1)} = \theta_0^{(2)} = 0$) ориентацией. Нормированная разность фаз $\Phi = \Delta\Phi/\Delta\Phi_{\max}$ введена для ячеек с различными законами распределения угла наклона по толщине ячейки ЖК и количественно определена зависимость нормированной разности фаз Φ и разности фаз $\Delta\Phi$ от угла преднаклона θ_0 .

Три типа ячеек с симметричными (рис.3.1.1) граничными условиями были исследованы: однородная, или Н, или НубН; с продольным изгибом, или В, или «bend», или НубВ; с поперечным изгибом, или S, или «splay» или НубS. Типичная зависимость $\Phi(\theta_0)$ для Н, В и S распределений на рис.3.1.4 изображена при различных значениях n_e и постоянной величине n_o . На рис.3.1.2 обозначены как $\theta_0^{(1)}$ и $\theta_0^{(2)}$ неодинаковые углы преднаклона на каждой из

подложек ячейки для случаев Н-, S- или В-распределения с несимметричными граничными условиями, о них в следующем параграфе.

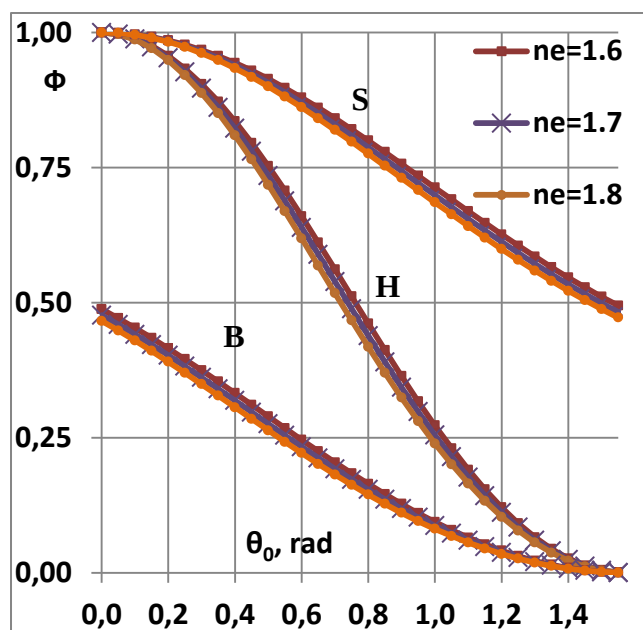


Рис.3.1.4. Зависимость $\Phi(\theta_0)$ для (сверху вниз): S, H и В симметричных распределений, $n_o=1,5$, $n_e=1,6; 1,7; 1,8$.

На рис.3.1.4 зависимость $\Phi(\theta_0)$ представлена для ЖК с положительным двулучепреломлением, на рис.3.1.5, рис.3.1.6 с отрицательным (для $n_o=1.5$ и $n_e=1.3; 1.35; 1.4; 1.45$). Зависимости $\Phi(\theta_0)$ для ЖК с $\Delta n < 0$ подобны тем, что для ЖК с $\Delta n > 0$, однако для них характерно увеличенное значение Φ , возрастающее по мере убывания n_e . Для зависимости $\Phi(\theta_0)$ на рис.3.1.6 это наглядно видно вблизи $\theta_0 \approx \pi/4$ (квазилинейная часть).

Аналогичные закономерности выявлены и для остальных законов распределения, рассмотренных в данной работе. С ростом n_e Φ убывает (при постоянных остальных параметрах). Если Δn постоянное, то (при фиксированном θ_0) Φ практически не зависит от n_o , для разных n_o при типичных для ЖК значениях. Разность фаз $\Delta\Phi$ определяется выражением (1.3).

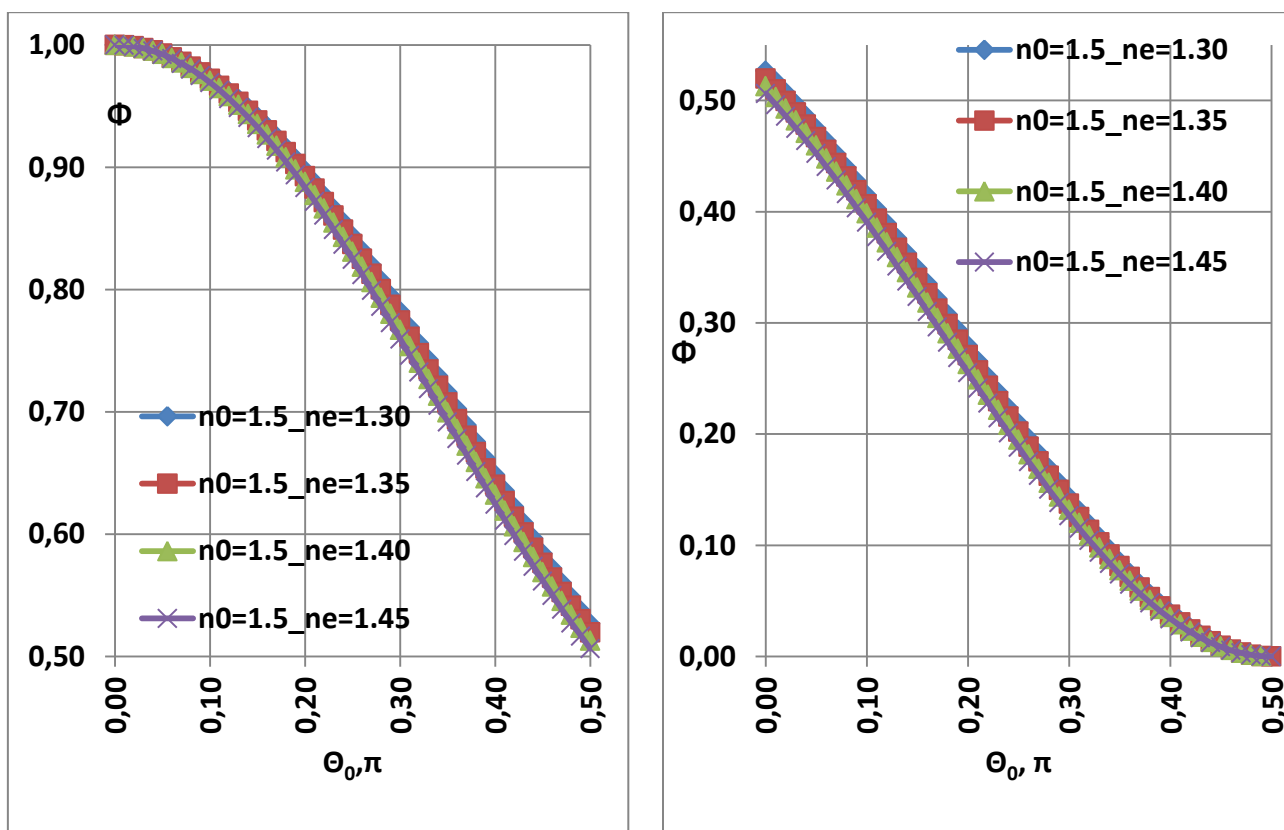


Рис.3.1.5. $\Phi(\theta_0)$ для ЖК с $\Delta n < 0$. Слева: S. Справа: B.

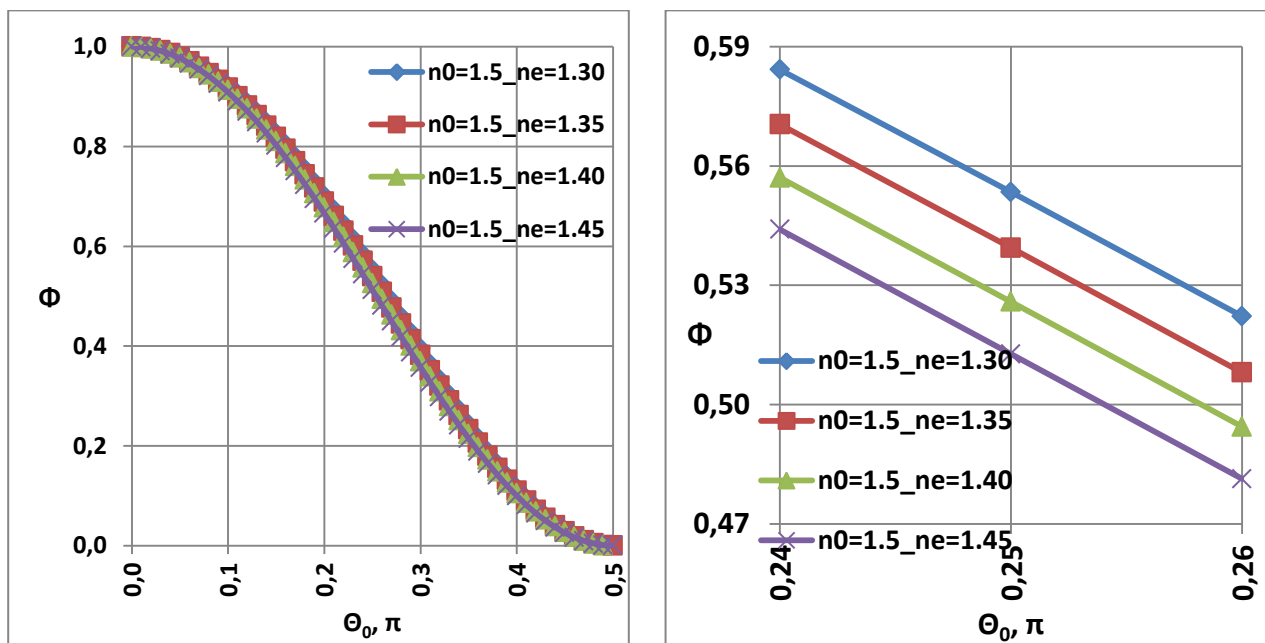


Рис.3.1.6. $\Phi(\theta_0)$ для Н. Справа то же при $\theta_0 \approx \pi/4$.

Напомним: константы упругости $K_{11}=K_{33}$, свет падает нормально. $\Delta\Phi_{\max}=2\pi\Delta nL/\lambda$, где $\Delta n=n_e-n_o$. Нормированная разность фаз $\Phi=\Delta\Phi/\Delta\Phi_{\max}$. Зависимость $\Delta\Phi(\theta_0)$ для однородного (Н) распределения:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n_0 L}{\lambda} \left(\frac{n_e}{(n_0^2 \cos^2 \theta_0 + n_e^2 \sin^2 \theta_0)^{1/2}} - 1 \right) \quad (3.1.2)$$

Для Н распределения зависимость $\theta_0(\Delta\Phi)$ при $\Delta n > 0$:

$$\theta_0 = \arccos \left\{ \frac{n_e^2}{n_e^2 - n_0^2} \left[1 - \left(1 + \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Phi_{\max}} \frac{\Delta n}{n_0} \right)^{-2} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.1.3a)$$

Для Н распределения зависимость $\theta_0(\Delta\Phi)$ при $\Delta n < 0$:

$$\theta_0 = \arccos \left\{ \frac{n_0^2}{n_0^2 - n_e^2} \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Phi_{\max}} \frac{\Delta n}{n_e} \right)^{-2} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.1.3b)$$

В Табл.3.1.1 приведены позволяющие аналитически рассчитать зависимость $\Phi(\theta_0)$ формулы для нескольких практически важных случаев (углы наклона $0, 45^\circ, 90^\circ$).

Таблица 3.1.1.

Зависимости $\Phi(\theta_0)$ для S- и В-конфигураций ЖК.

	$\theta_0 \ll 1$			$\delta_0 \ll 1$	
Н	$\Phi(\theta_0) = \left[n_e \left(1 - \frac{\theta_0^2}{4} \left(\frac{2n_e^2}{n_0^2} - 1 \right) \right) - n_0 \right] / (n_e - n_0)$	$1 - 3.9\theta_0^2$	Н	$\Phi(\delta_0) = -\frac{\delta_0^2}{4} \left(\frac{2n_0^2}{n_e^2} - 1 \right) \frac{n_0}{n_e - n_0}$	$-1.6\delta_0^2$
В	$\Phi(\theta_0) = \left[n_e \left(1 - \frac{\theta_0^2}{12} \left(\frac{2n_e^2}{n_0^2} - 1 \right) \right) - n_0 \right] / (n_e - n_0)$	$1 - 1.2\theta_0^2$	S	$\Phi(\delta_0) = -\frac{\delta_0^2}{12} \left(\frac{2n_0^2}{n_e^2} - 1 \right) \frac{n_0}{n_e - n_0}$	$-0.54\delta_0^2$

Можно получить зависимости $\Delta\Phi(\theta)$, $\Delta\Phi(\delta)$ при малом значении угла наклона на поверхности θ_0 или отклонения его от вертикального положения δ_0 , позволяющие оценить, насколько велик по сравнению с однородной конфигурацией вклад неоднородной ориентации директора в величину $\Delta\Phi$.

При $\theta \rightarrow 0$ или $\theta \rightarrow \pi/2$, при одном и том же угле наклона, отклонение зависимости $\Phi(\theta_0)$ для S- и В-конфигураций ЖК директора в три раза меньше, чем для случая однородной ориентации, как следует из приведенных в Табл.3.1.1 выражений. Напротив, значительной разнице определяемых из эксперимента углов наклона соответствует одно и то же значение разности фаз у ячеек с разной конфигурацией.

Квазилинейная часть зависимости $\Phi(\theta_0)$ (рис.3.1.6.), если угол $\theta_0 \sim \pi/4$ (45°), описывается уравнением (3.1.4.) для ячейки с однородным распределением директора:

$$\Phi(\theta_0) = \frac{1}{n_e - n_o} \left[\frac{\sqrt{2} n_e n_o}{(n_e^2 + n_o^2)^{1/2}} \left(1 + \frac{\pi}{4} \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2 + n_o^2} \right) - n_o - \theta_0 \frac{\sqrt{2} n_e n_o}{(n_e^2 + n_o^2)^{1/2}} \frac{n_e^2 - n_o^2}{n_e^2 + n_o^2} \right] \quad (3.1.4)$$

При $n_e=1,6$ и $n_o=1,5$ $\Phi(\theta_0)=1,253-0,997\theta_0=0,470$.

Может быть получена, при постоянном угле θ_0 , из выражения (3.1.4.) зависимость Φ от коэффициентов преломления. Пусть $x=n_e/n_o$. Тогда из (3.1.4) получим (3.1.5.)

$$\Phi(\theta_0) = \frac{1}{x-1} \left[\frac{\sqrt{2} x}{(x^2+1)^{1/2}} \left(1 + \frac{\pi}{4} \frac{x^2-1}{x^2+1} \right) - 1 - \theta_0 \frac{\sqrt{2} x(x^2-1)}{(x^2+1)^{3/2}} \right] \quad (3.1.5)$$

Изображенному на рис.3.1.4-3.1.6: убывание $\Phi(\theta_0)$ при возрастании $x=n_e/n_o$, слабая зависимость угла наклона графика $\Phi(\theta_0)$ от двулучепреломления - соответствует выражение (3.1.5). Выражение (3.1.5), если величина Δn мала, то есть ($x=1+\alpha$, $\alpha \ll 1$), можно представить в виде (3.1.6):

$$\Phi(\theta_0) = \frac{1}{8} \left[4 + 2\pi - \pi\alpha - \theta_0 \left(1 - \frac{1}{2}\alpha \right) \right] \quad (3.1.6)$$

$\Phi(\theta_0)=1/2$ если $\alpha=0$ и $\theta_0=\pi/4$, в соответствии с данными на рис.3.1.6.

При постоянном значении θ_0 величина $\Phi(\theta_0)$ убывает с ростом двулучепреломления Δn , как следует из выражений (3.1.5) и (3.1.6). Для всех трех геометрий распределения по толщине ячейки угла наклона директора ЖК это верно. Если двулучепреломление меняет свой знак, зависимость $\Phi(\theta_0, x)$ не имеет разрыва при $\Delta n=0$ ($x=1$), она непрерывна. Поэтому как для дискотических ($\Delta n < 0$), так и для каламитических ЖК ($\Delta n > 0$) актуальны приведенные выше формулы.

Типичная ЖК ячейка со статическим распределением $0 \leq \theta_0 \leq \pi/2$ уже упоминалась выше. Распределение может быть **B** в гомеотропных ($\Delta n < 0$) и **S** в планарных ячейках ($\Delta n > 0$). Кроме того, используя двулучепреломляющие полимеры, нанеся их послойно на подложки ячейки, можно получить распределения с $\theta_0 > \pi/2$. Для трех конфигураций показана (рис.3.1.7.)

зависимость $\Phi(\theta_0)$ при широком диапазоне значений угла наклона директора ЖК.

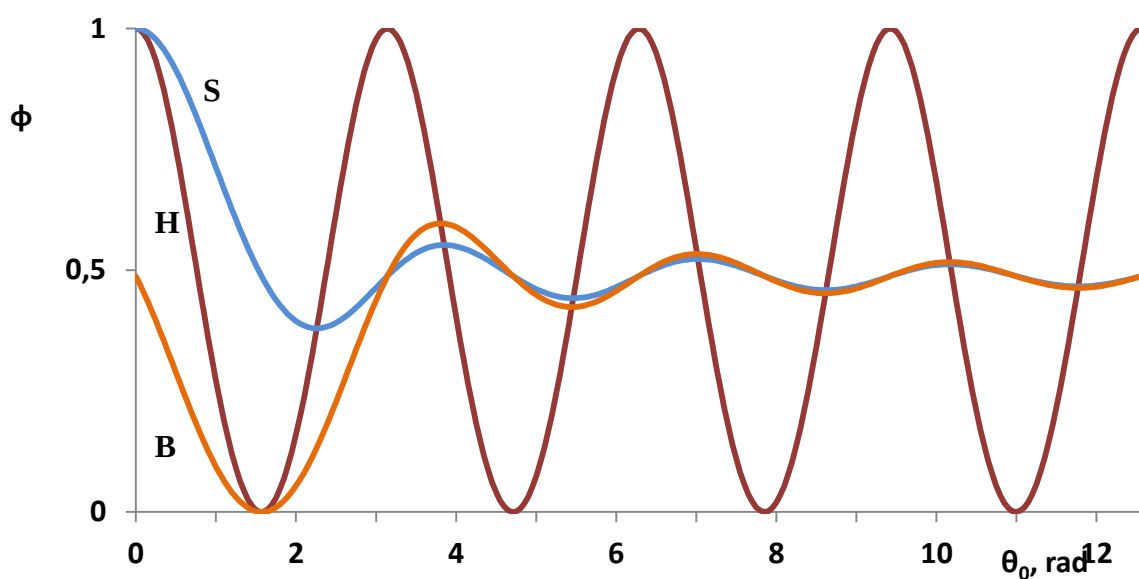


Рис.3.1.7. $\Phi(\theta_0)$ для расширенного диапазона θ_0 . $n_0=1,5$, $n_e=1,6$.

Возникает, как показано на рис.3.1.7 слева, чередование слоев с S и B распределениями. Данные, аналогичные рис.3.1.7, показаны на рис.3.1.8, но для различных ($n_0=1,5$, n_e от 1,55 до 1,8) значений показателей преломления.

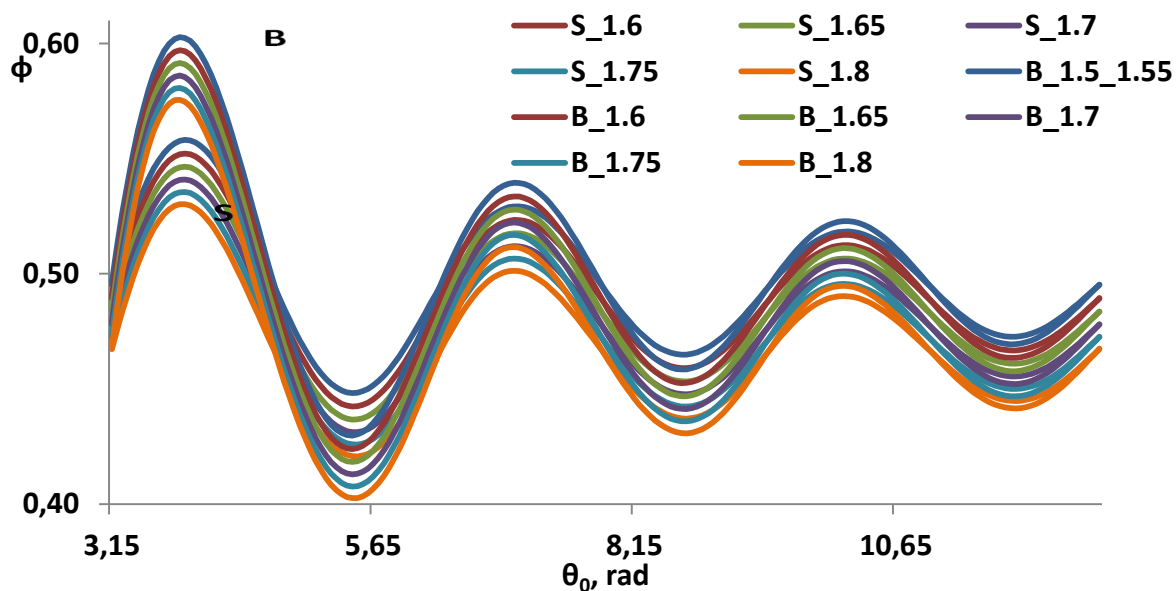


Рис.3.1.8. Зависимость $\Phi(\theta_0)$ для расширенного диапазона значений угла θ для различных значений показателей преломления. $n_0=1,5$, n_e от 1,55 до 1,8.

При значениях угла θ около 4π , как показано на рис.3.1.9, зависимость $\Phi(\theta)$ для S- и В- ячеек ЖК, для различных значений показателей преломления, совпадает (при одинаковых значениях оптической анизотропии).

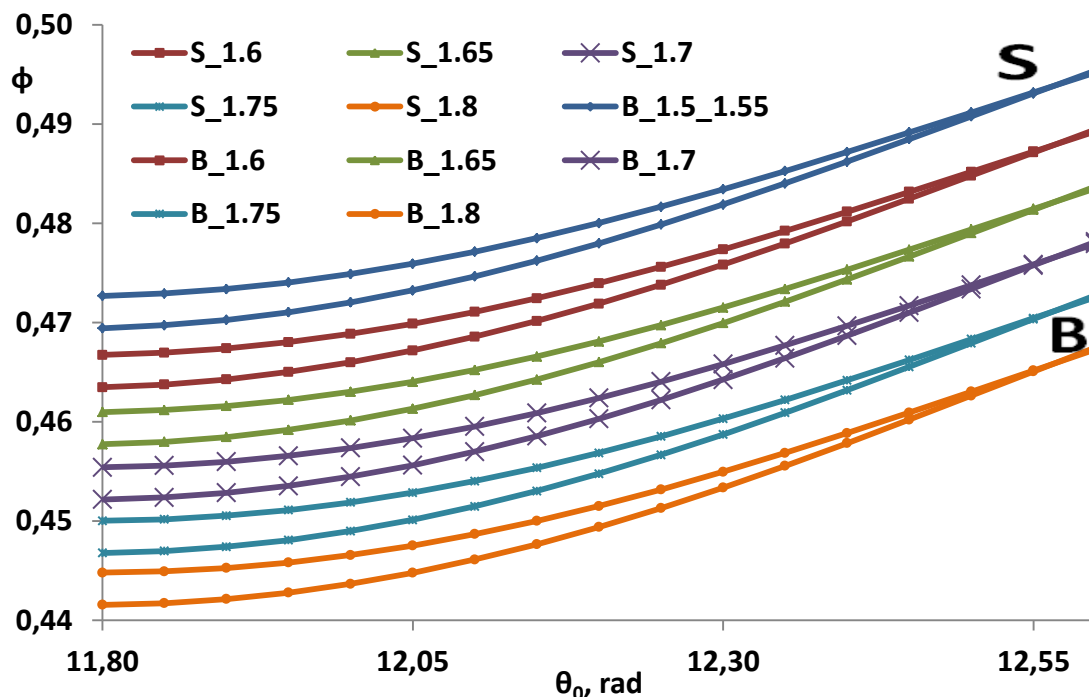


Рис.3.1.9. Зависимость $\Phi(\theta_0)$ для значений угла θ около 4π для различных значений показателей преломления. $n_o=1,5$, n_e от 1,55 до 1,8.

Становится неважно для неоднородных ячеек при больших углах (многих поворотах ЖК директора), принадлежит ли она к В или к S ячейкам, то есть как ориентирован директор в тонком слое ЖК посередине ячейки, как хорошо заметно на рис.3.1.9, по мере роста угла нормированная разность фазовых задержек постепенно стремится к значению $\Phi=0,5$.

Однородные четко периодичны, в отличие от неоднородных ячеек, и по величине Φ эквивалентны обычным (малоугловым) однородным ячейкам, то есть $\Phi(\theta_0+2\pi N)=\Phi(\theta_0)$ для однородных ячеек. Характер зависимости, как видно, остается тот же самый. Величина фазовой задержки становится меньше с ростом положительной оптической анизотропии, для углов вида $n\pi/2+\pi/4$. Все значения разности фаз для S-, В- ячеек совпадают при углах вида $n\pi/2+\pi/2$ при любых значениях коэффициентов преломления, и становятся все ближе к 0,5 с ростом угла.

§4. Зависимость нормированной разности фаз $\Phi(\theta_0)$ от комбинации углов преднаклона для ячеек с различными типами неоднородных распределений угла наклона директора ЖК

Для различных типов ячеек ЖК с неоднородным распределением угла наклона директора результаты компьютерного моделирования зависимости $\Phi(\theta_0)$ от комбинации углов преднаклона представлены ниже (рис.3.1.10). Выше рассмотрены ячейки трех разных типов под обозначениями: Нуб90°, НубS, и НубВ с несимметричными углами наклона директора на противоположных сторонах. Приповерхностные углы неодинаковые, однако они сходны с показанными на рис.3.1.2. Углы $\theta_0^{(1)}$, $\theta_0^{(2)}$ изменяются от 0° до 90° в каждом из этих случаев. Угол наклона директора $\theta(z)$ изменяется от $\theta_0^{(1)}$ до $\theta_0^{(2)}$ в случае Нуб90° и, при небольшом угловом диапазоне значений θ , распределение может быть сопоставимо с однородным при одинаковых приповерхностных углах. Такая аналогия уже неприемлема по мере роста углового диапазона (вплоть до 90°). Диапазон, в котором изменяется угол наклона, в случаях НубS и НубВ может приближаться к 180°. Угловой диапазон может быть многократно больше (рис.3.1.7.), если использовать полимерные двулучепреломляющие материалы.

Распределение угла $\theta(z)$ по толщине ячейки, в случае НубS, таково, что угол наклона в средней части (относительно тонком слое) ячейки равен нулю. Распределение угла наклона директора $\theta(z)$ от толщины ячейки, в случае НубВ, таково, что угол равен 90° в некотором тонком слое ЖК. По толщине ячейки распределение угла линейное. Диапазон изменения нормированной разности фаз Φ в случае Нуб90° (рис.3.1.10) около 0.5, величиной n_e обусловлены отклонения от 0.5. Относительно кривой, соответствующей $\theta_0^{(2)}=0.25\pi$, кривые на рис.3.1.10 (справа) несимметричны.

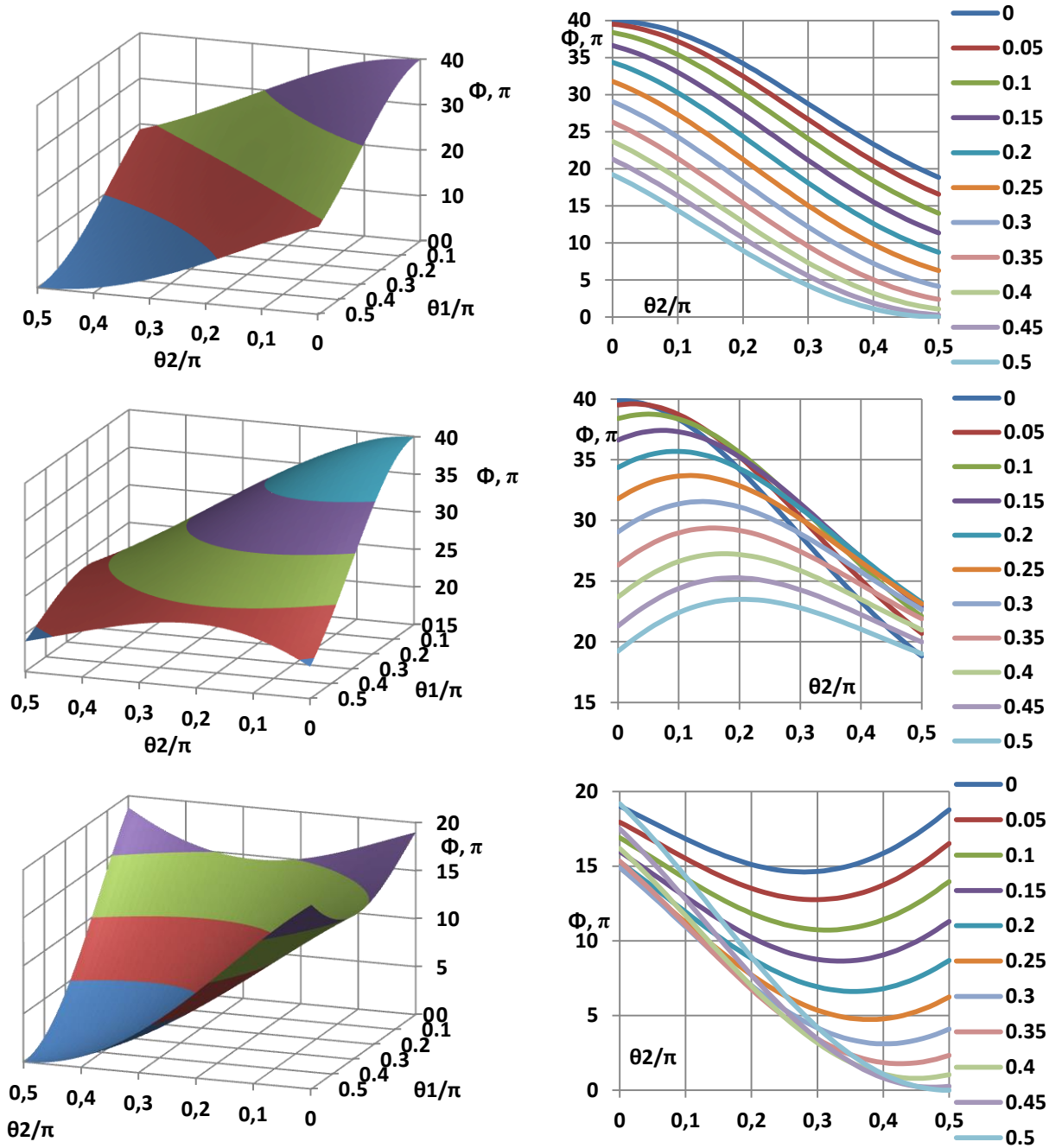


Рис.3.1.10. $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$. Сверху вниз: Hyb90°, HybS, HybV. $n_o=1,5$, $n_e=1,7$.
Справа $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ при постоянном значении $\theta_0^{(1)}$.

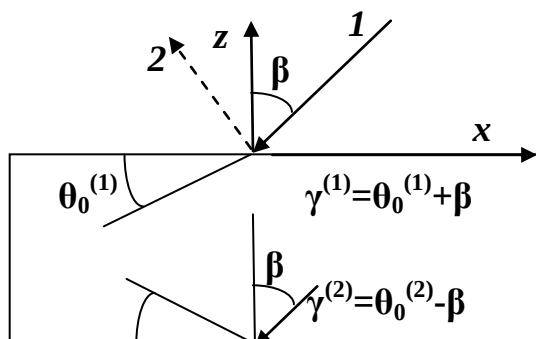
Данные кривые показывают, как, при постоянном угле на противоположной стороне, изменяется Φ при изменении одного из приповерхностных углов от 0° до 90° . Приведена при таких же показателях преломления на рис.3.1.4 кривая для $\Phi(\theta_0^{(1)}=\theta_0^{(2)})$ для случая однородного распределения директора ЖК в ячейке. Она показывает, что, по мере возрастания θ_0 , Φ изменяется от 0 до 1. Изменение Φ , таким образом, приблизительно вдвое меньше для разносторонней ячейки при паре

приповерхностных углов 0° и 90° , чем для рассмотренной выше симметричной ячейки с углами 0° (то есть планарной). При $\theta_0^{(2)} \sim 0.5\pi$ (HybS) и при малых значениях $\theta_0^{(2)}$ (HybB) наблюдаются для HybS, HybB основные различия зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)})$ от Hyb 90° .

1.2. Оптические свойства ЖК ячеек при падении света наклонно

§1. Методика

Определяющий угловые характеристики ЖК устройств отображения информации случай наклонного падения света имеет практическое значение. Также в некоторых измерительных методах используется наклонное падение света. Для поляризованного пучка света, случай наклонного падения рассмотрим на рис.3.1.2.1. Плоскость падения 12 параллельна плоскости директора ЖК ячейки xz , угол падения равен β . Тогда перпендикулярен этой плоскости вектор электрического поля световой волны. Такая геометрия эквивалентна гибридной ячейке с углами преднаклона на противоположных подложках $\gamma^{(1)} = \theta_0^{(1)} + \beta$ и $\gamma^{(2)} = \theta_0^{(2)} - \beta$, соответственно. При этом увеличивается в $1/\cos\beta$ раз эквивалентная толщина ячейки. Это ведет к увеличению, по сравнению со случаем нормального падения света, величины нормированной разности фазовых задержек $\Phi = \Delta\Phi/\Delta\Phi_{\max}$.



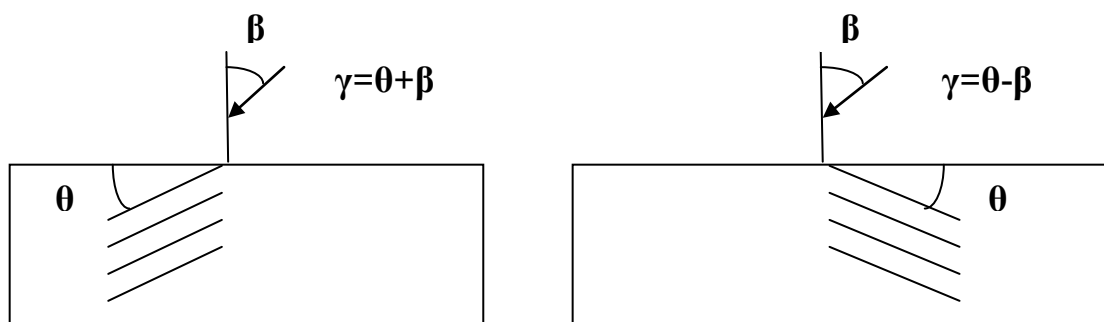


Рис.3.1.2.1. Геометрия наклонного падения света на ЖК ячейку с несимметричными граничными условиями. Луч света в плоскости директора.

§2. Результаты расчета для наклонного падения света, случай *Нyb90*

Смоделированные при наклонном падении луча света зависимости нормированной разности фаз от углов наклона на разных сторонах ячейки показаны на рис.3.1.2.2., представлен случай *Нyb90*. Толщина слоя ЖК 20 мкм. Внешняя среда – воздух ($n=1$). Показатели преломления $n_o=1,5$, $n_e=1,7$. Угол падения положительный, то есть как на верхней подложке, на рис.3.1.2.1., где $\gamma=\theta+\beta$. Слева на каждом из рисунков 3.1.2.2.а-в показана зависимость $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$. Справа, при фиксированном другом приповерхностном угле, показана зависимость $\Phi(\theta)$.

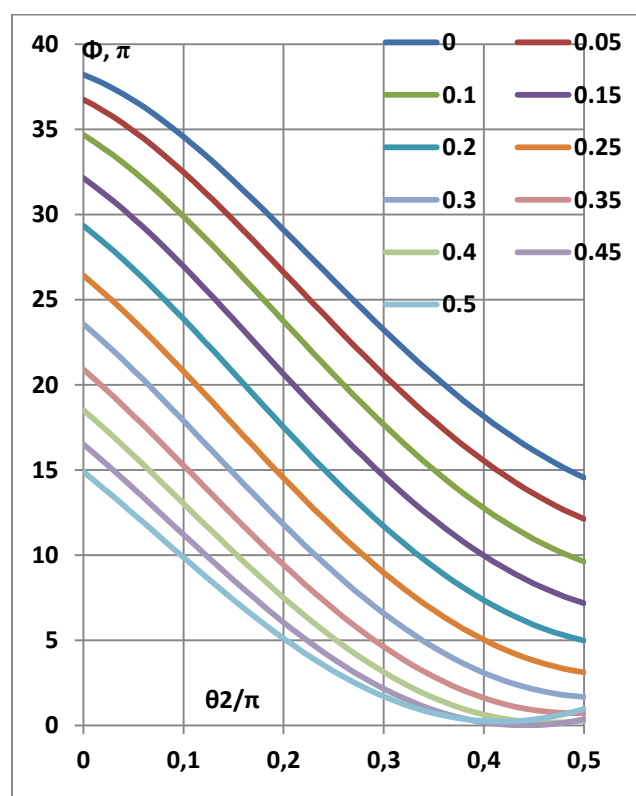
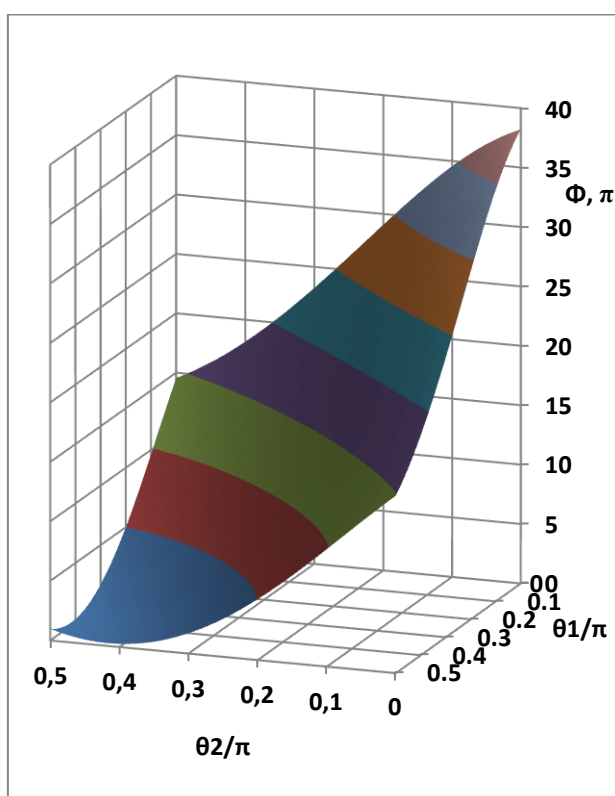
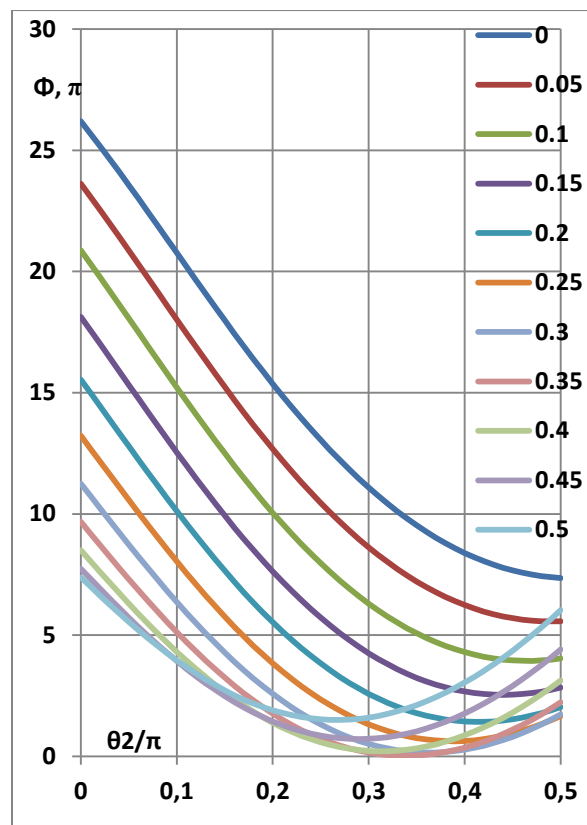
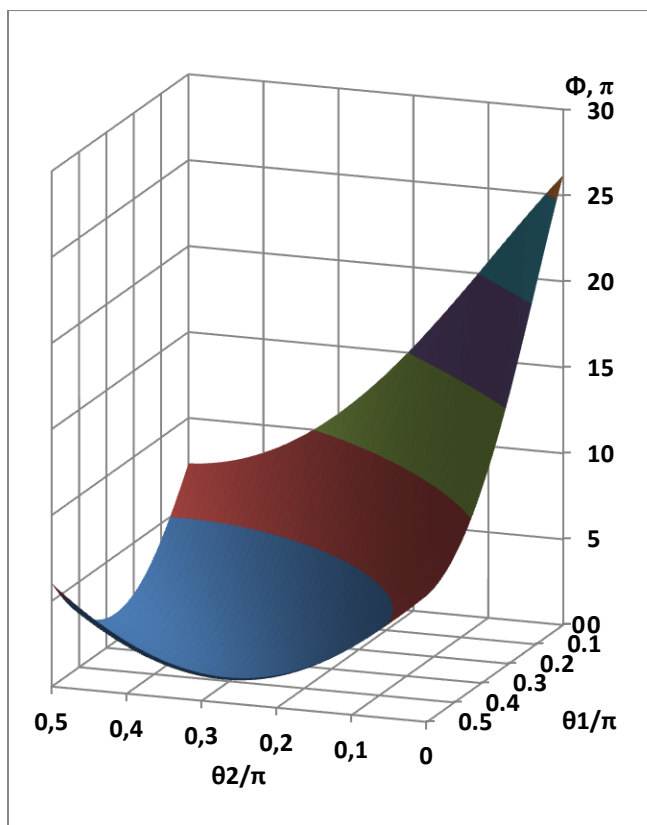
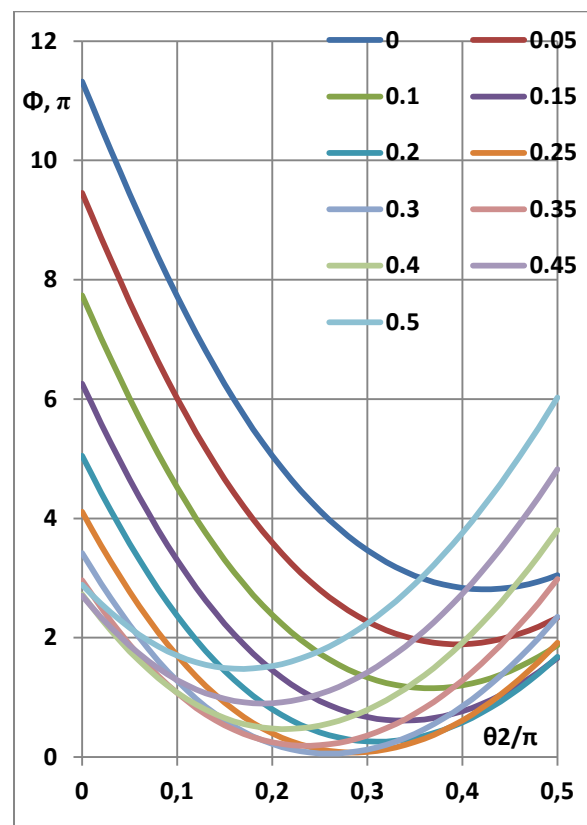
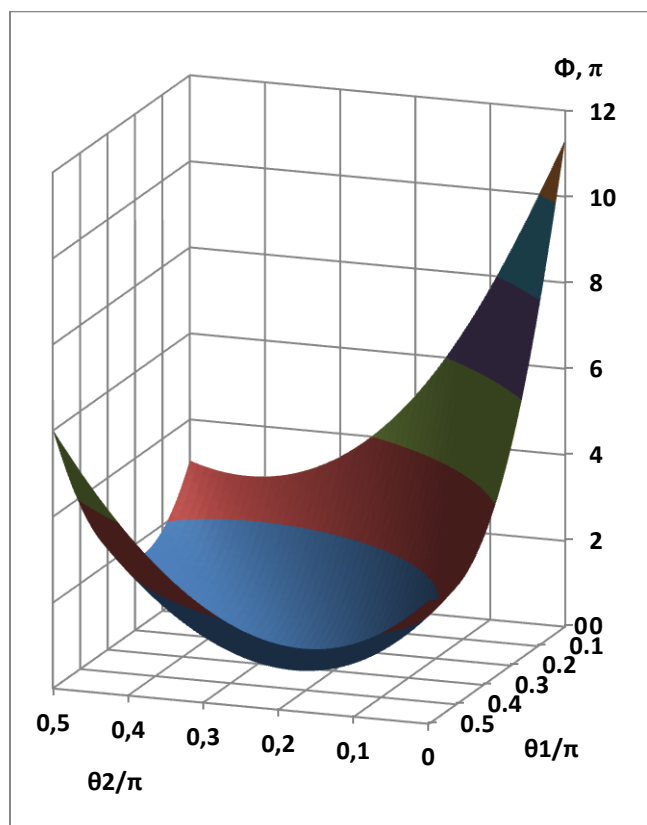


Рис.3.1.2.2.а. Угол падения β равен 15° . Нуб90Рис.3.1.2.2.б. Угол падения β равен 45° . Нуб90Рис.3.1.2.2.г. Угол падения β равен 75° . Нуб90

Характер изменений от угла падения света зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ хорошо виден. Область на координатной плоскости $(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$, где находится минимум Φ , смещается по мере возрастания угла. Она соответствует такому сочетанию угла директора ЖК и луча света, в соответствии с рис.3.1.2.1, при котором было бы аналогично, при нормальном падении луча света, гомеотропной ЖК ячейке. Как видно из рис.3.1.2.2, для каждого угла падения β максимальное значение Φ изменяется. Можно понять характер этого изменения, если для случая Нуб90 и рис.3.1.2.1. рассмотреть рис.3.1.10. Тогда становится очевидно, что, для каждого угла падения β , максимальное значение Φ на рис.3.1.2.2 соответствует на рис.3.1.2.2 углам $(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$, таким, что им эквивалентны углы на рис.3.1.10 с такой же величиной $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$, с учетом изложенного на рис.3.1.2.1. В принципе для каждого из значений Φ (каждой точки графика $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ на рис.3.1.2.2) верны такие же рассуждения.

Случай Нуб90 представлен так же на рис.3.1.2.3. Угол падения как на рис.3.1.2.1 (случай на нижней подложке, где $\gamma=\theta-\beta$), то есть отрицательный.

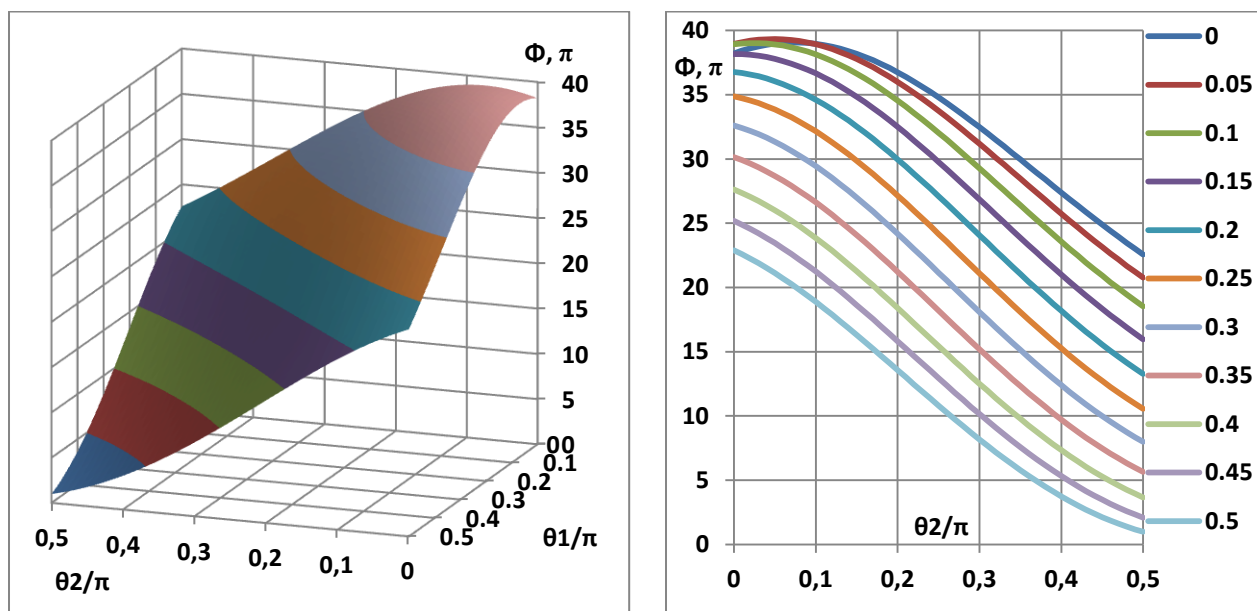


Рис.3.1.2.3.а. Угол падения β отрицательный, равен 15° . Нуб90

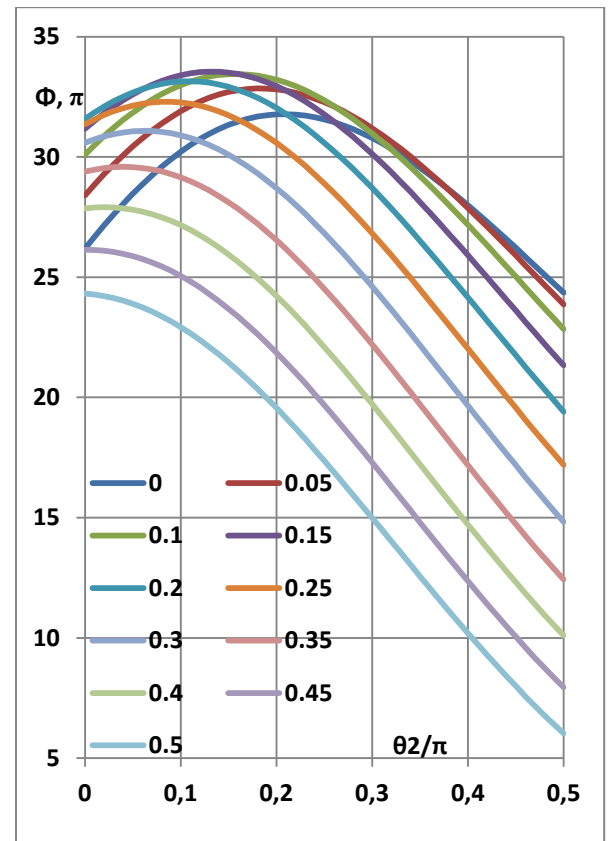
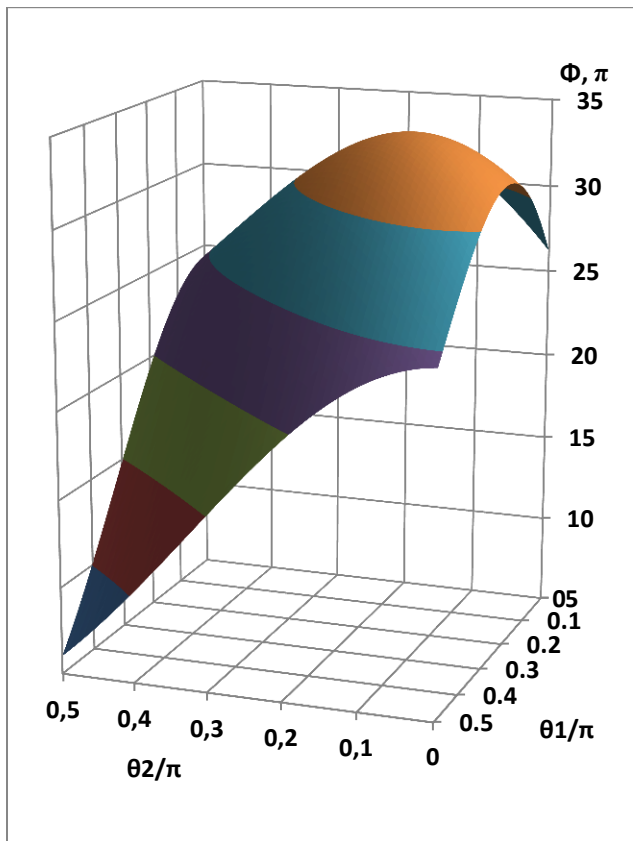


Рис.3.1.2.3.б. Угол падения β отрицательный, равен 45° . *Нуб90*

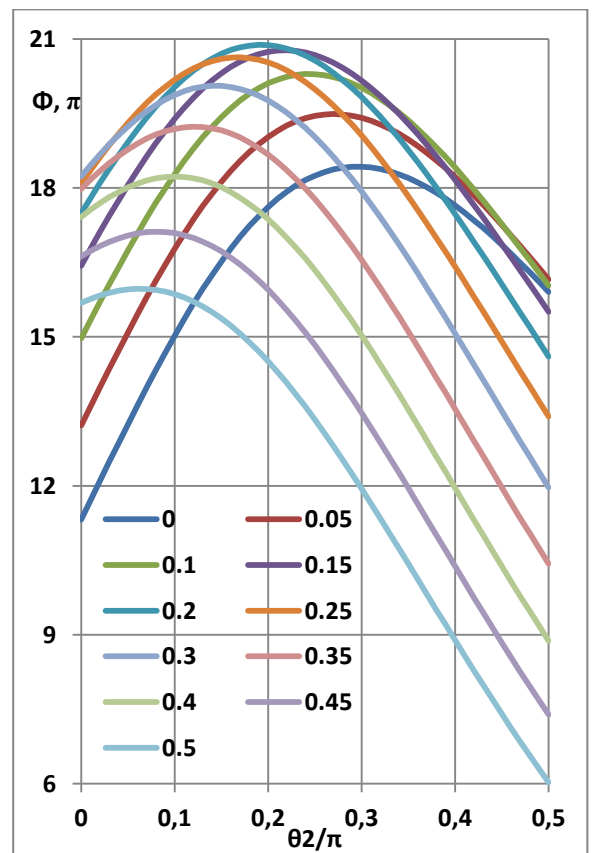
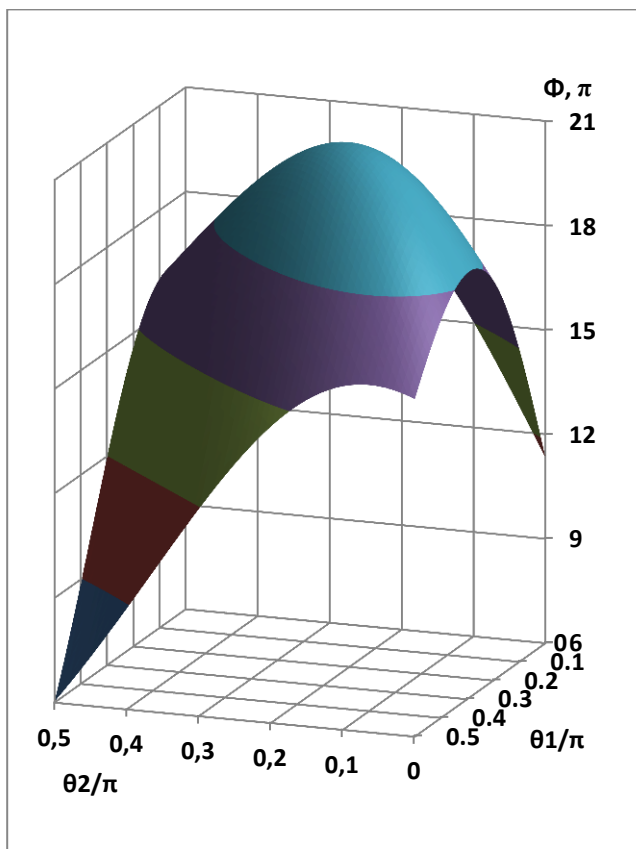


Рис.3.1.2.3.в. Угол падения β отрицательный, равен 75° . *Нуб90*

Характер изменений от угла падения света зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ хорошо виден. Смещается область, где находится максимум Φ на координатной плоскости $(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$, по мере возрастания угла. Она соответствует такому сочетанию угла директора ЖК и луча света, в соответствии с рис.3.1.2.1, при котором при нормальном падении луча света было бы аналогично планарной ЖК ячейке. Проанализируем зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$, приведенные на рис.3.1.2.2, 3.1.2.3. С ростом угла падения β прежде всего, изменяется амплитуда значений Φ . Если величина Φ для всех углов преднаклона меняется при нормальном падении от 0 до 40 Пи, то амплитуда уменьшается по мере роста угла падения. Увеличение угла β сказывается, при фиксированном угле преднаклона на одной из подложек, на виде зависимостей $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$.

§3. Результаты расчета для наклонного падения света, случай *HybS*

Смоделированные при наклонном падении луча света зависимости нормированной разности фаз от приповерхностных углов наклона на разных сторонах *HybS* ячейки показаны на рис.3.1.2.4. Толщина слоя ЖК 20 мкм. Внешняя среда – воздух ($n=1$). Показатели преломления $n_o=1,5$, $n_e=1,7$. Угол падения как на рис.3.1.2.1, где на верхней подложке случай $\gamma=\theta+\beta$, то есть положительный. На нижней ее подложке, поскольку ячейка неоднородная, будет так же, как на рис.3.1.2.1 на нижней подложке, где $\gamma=\theta-\beta$.

Справа на каждом из рисунков 3.1.2.4.а-в показана, при фиксированном другом краевом угле, зависимость $\Phi(\theta)$. Зависимость $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ показана слева.

При возрастании угла β сначала (до 45 градусов включительно) диапазон значений Φ для *HybS* ячейки не изменяется по ширине (25 Пи), но смещается ниже, а при больших значениях угла падения сужается и стремится локализоваться ниже 0,5 максимальной Φ , то есть становится близок к случаю *HybB* ячейки на рис.3.1.10.

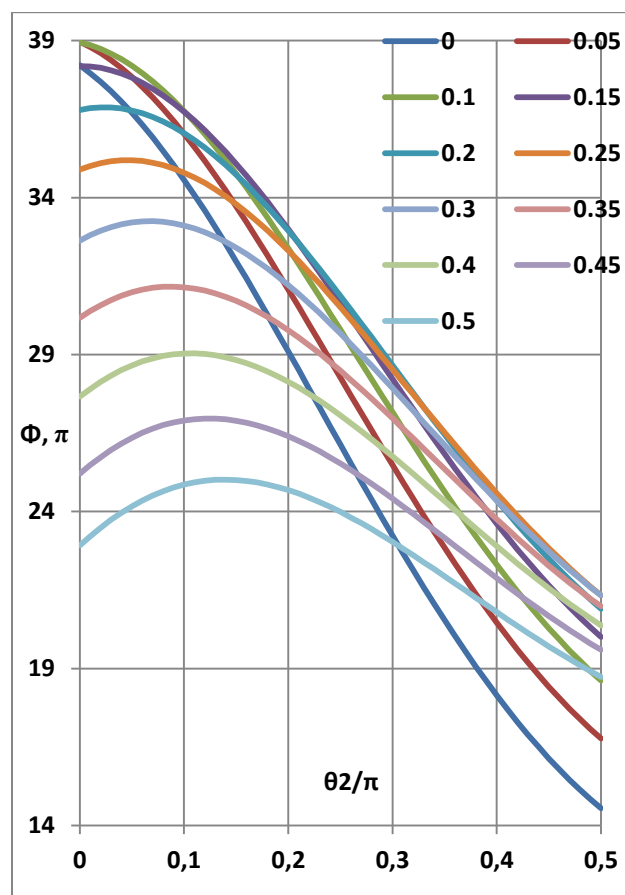
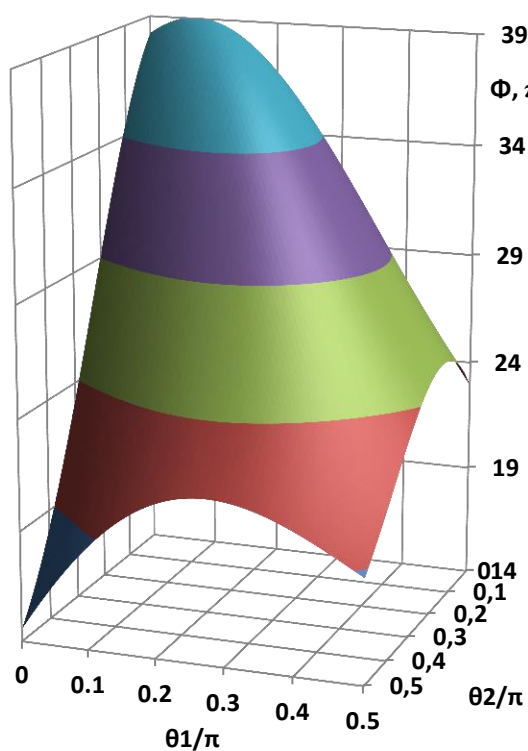


Рис.3.1.2.4.а. Угол падения β равен 15° . *HybS*

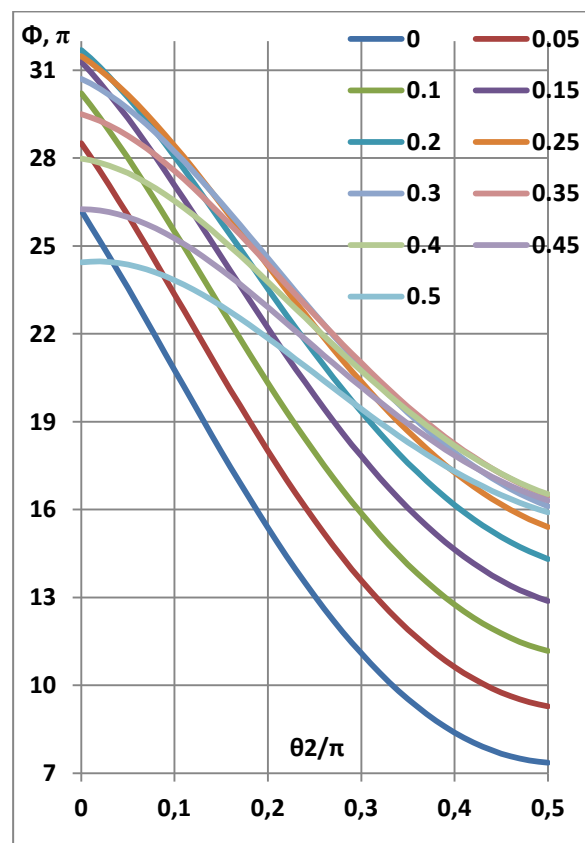
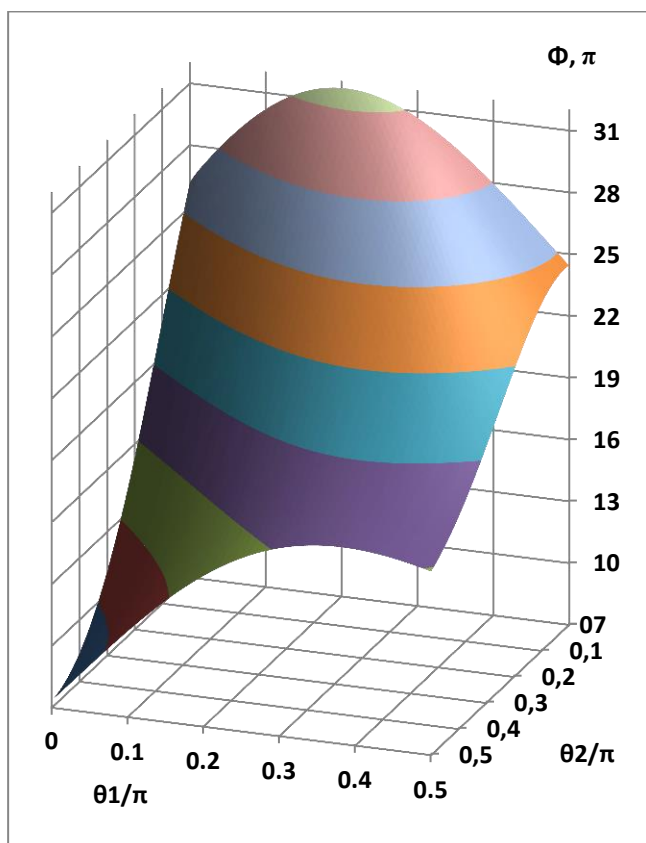


Рис.3.1.2.4.б. Угол падения β равен 45° . *HybS*

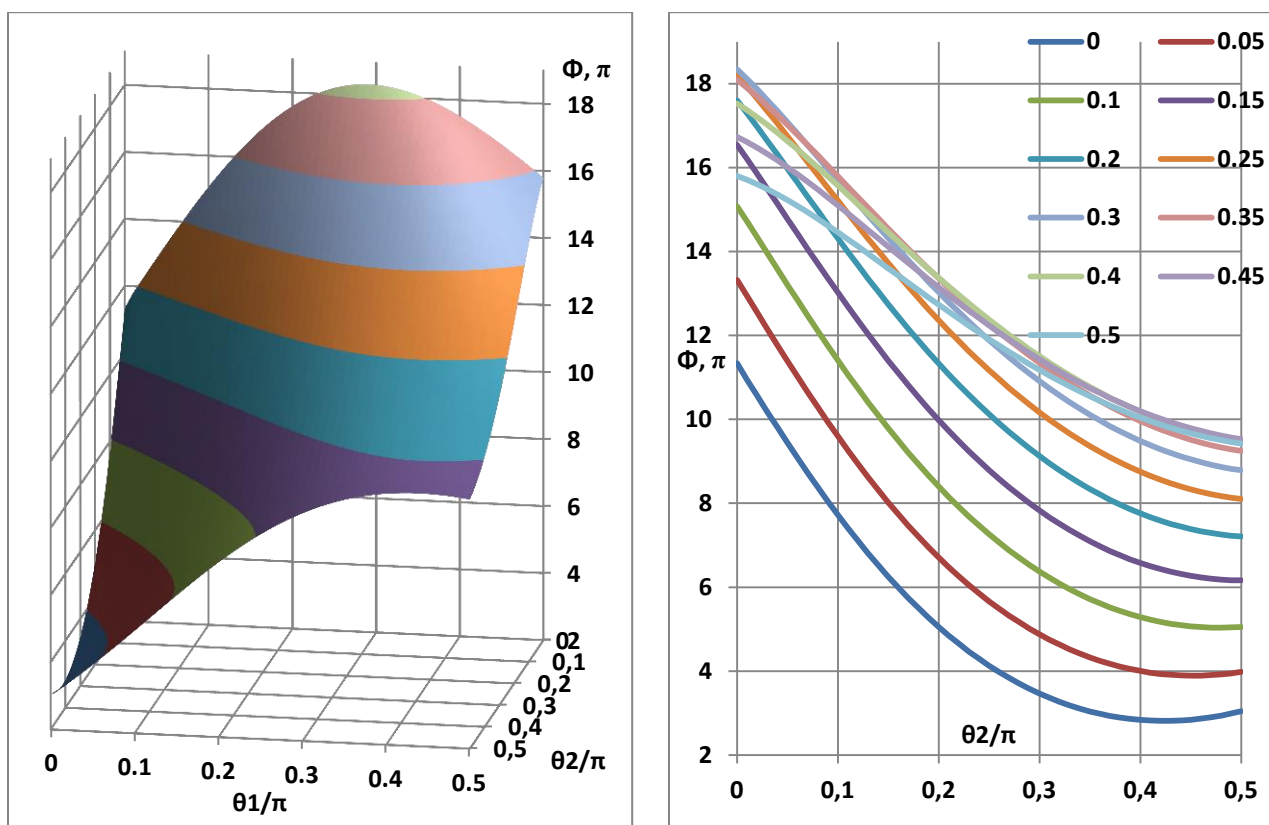


Рис.3.1.2.4.в. Угол падения β равен 75° . HybS

Проанализируем зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ приведенные на рис.3.1.2.4. Крутизна зависимости Φ от угла падения света важна для применения в оптических устройствах (например, в компенсаторе) HybS ячейки. Представляется наиболее перспективной для использования в оптических устройствах такая ЖК ячейка HybS, которая наименее зависит от угла падения света. Такие кривые (справа на рисунках) есть.

Случай HybS представлен на рис.3.1.2.5., отрицательный угол падения.

Рассмотрим приведенные на рис.3.1.2.5 результаты моделирования. Обращает на себя внимание, что есть на многих графиках, для HybS ячейки, кривые плавно изменяющейся величины Φ от угла падения. С ранее полученными данными для аналогичной ячейки (рис.3.1.2.4) это согласуется при положительных углах падения света. Таким образом, в оптических устройствах, требующих наименьшего изменения Φ от угла падения, HybS ячейку с соответствующими парами приповерхностных углов директора можно рекомендовать для применения.

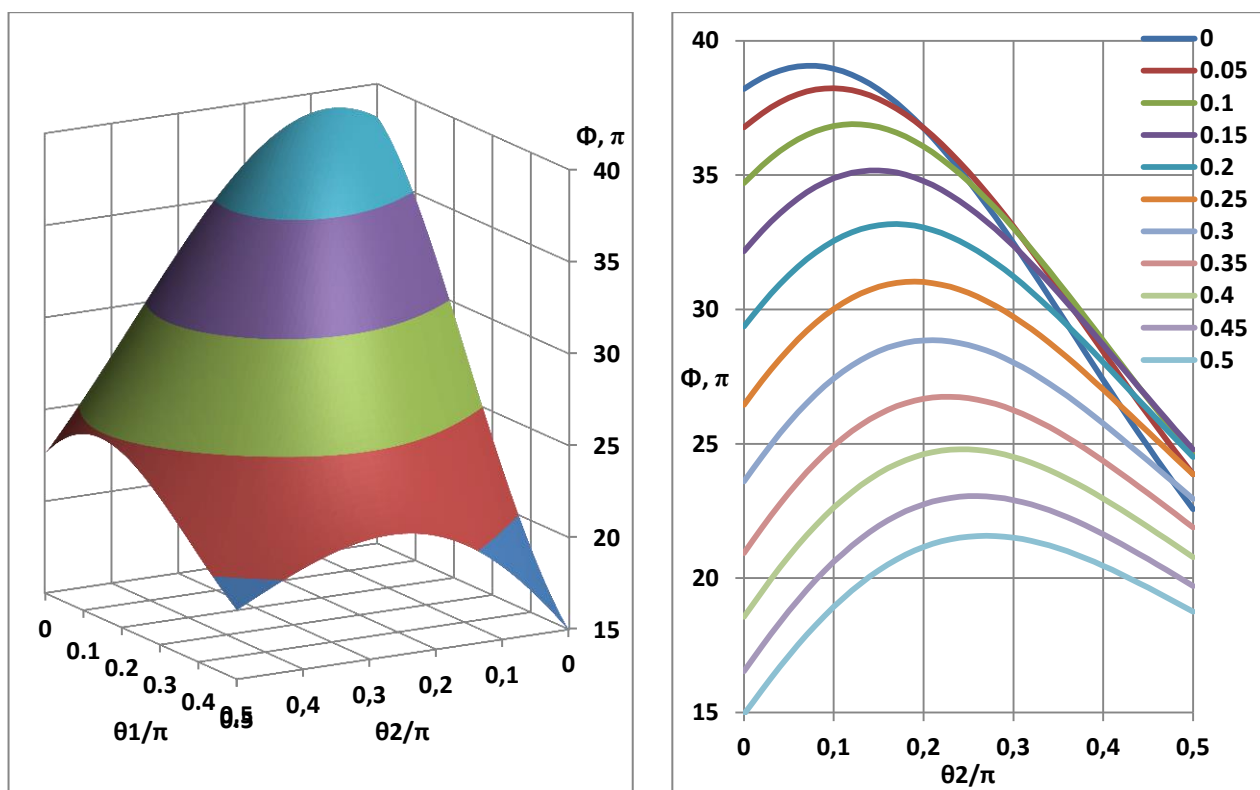


Рис.3.1.2.5.а. Угол падения β отрицательный, равен 15° . *HybS*

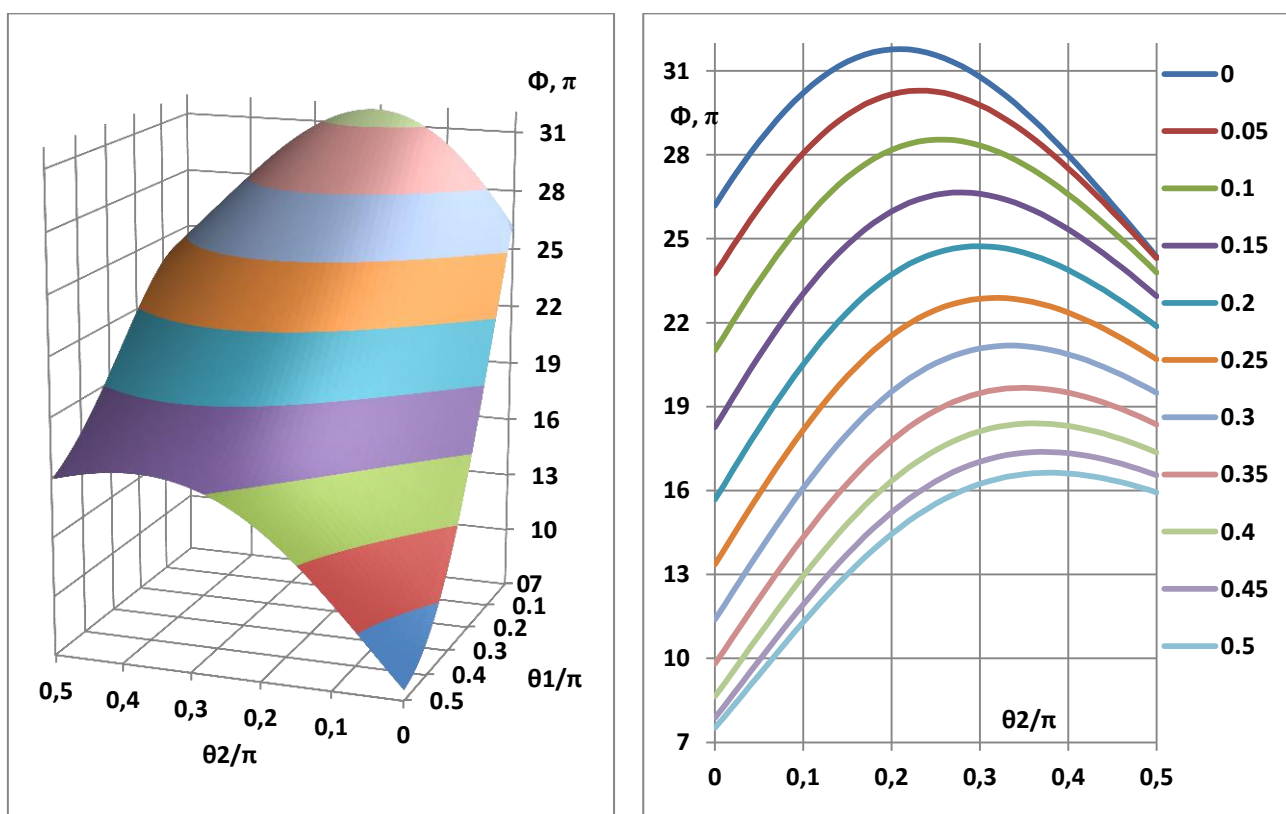


Рис.3.1.2.5.6. Угол падения β отрицательный, равен 45° . *HybS*

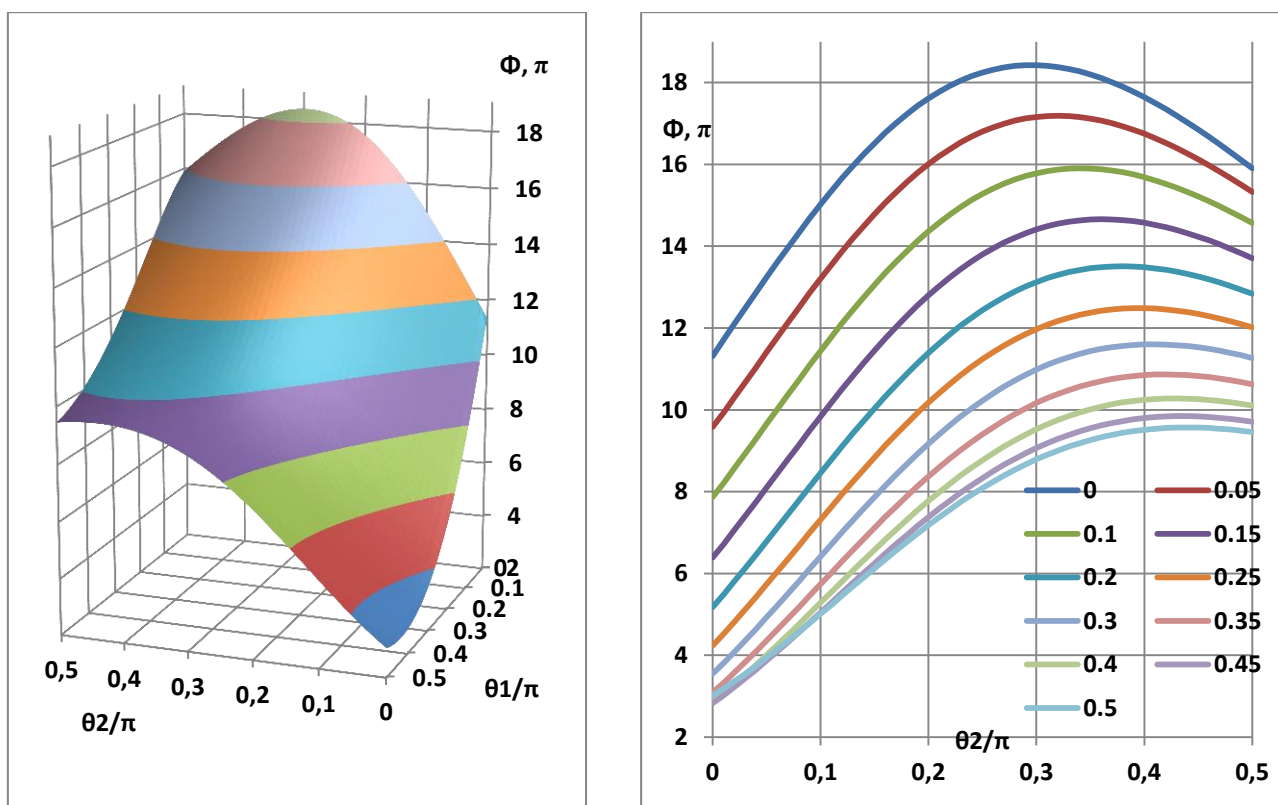
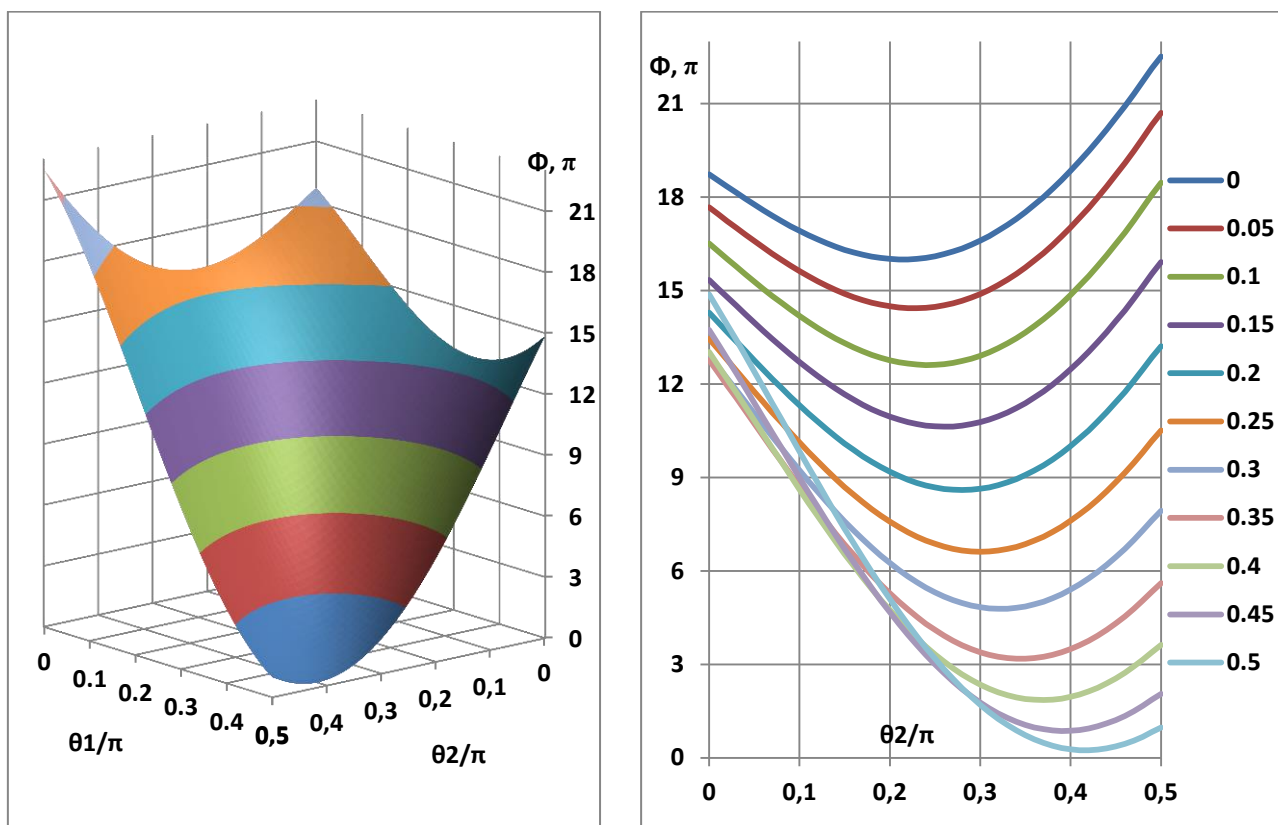
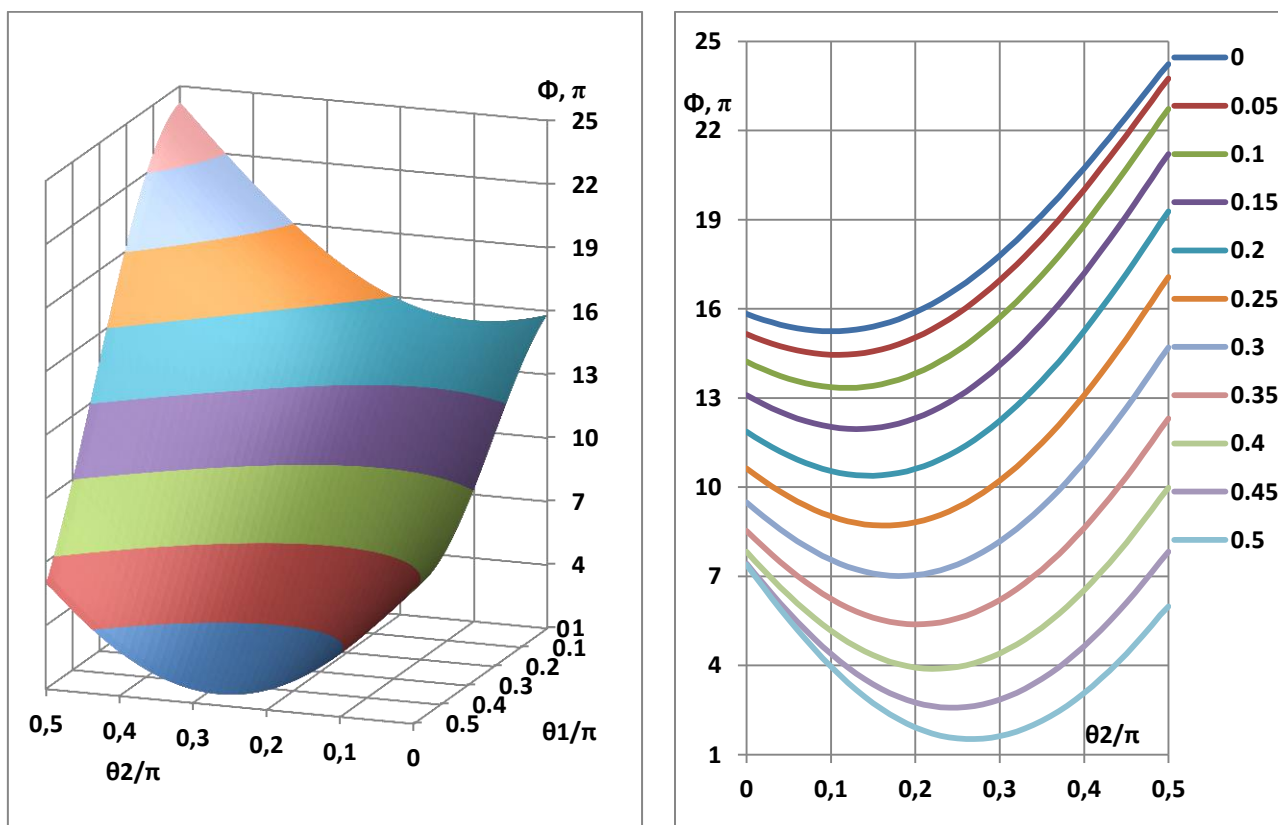


Рис.3.1.2.5.в. Угол падения β отрицательный, равен 75° . *HybS*

§4. Результаты расчета для наклонного падения света, случай *HybB*

Смоделированные зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ от углов наклона на разных сторонах *HybB* ячейки показаны на рис.3.1.2.6. Угол падения, как на рис.3.1.2.1, положительный. Зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ для *HybB*, приведенные на рис.3.1.2.6, проанализируем. С ростом угла падения β , прежде всего, область изменения значений Φ немного смещается вверх, а затем как бы возвращается к прежнему диапазону значений. Величина Φ для всех углов преднаклона, при нормальном падении, меняется от 0 до 0,5 от максимальной. Увеличение угла β при фиксированном угле наклона на одной из подложек сказывается на виде зависимостей $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$. При углах падения света в *HybB* ячейке, отличающихся от нормального, ни минимум, ни максимум практически не могут достигнуть крайних значений Φ (0 и 1, соответственно). Эти данные могут быть использованы как для разработки оптических компенсаторов для расширения углов обзора ЖК дисплеев, так и для измерения углов наклона ЖК на подложках.

Рис.3.1.2.6.а. Угол падения β равен 15° . *НубВ*Рис.3.1.2.6.б. Угол падения β равен 45° . *НубВ*

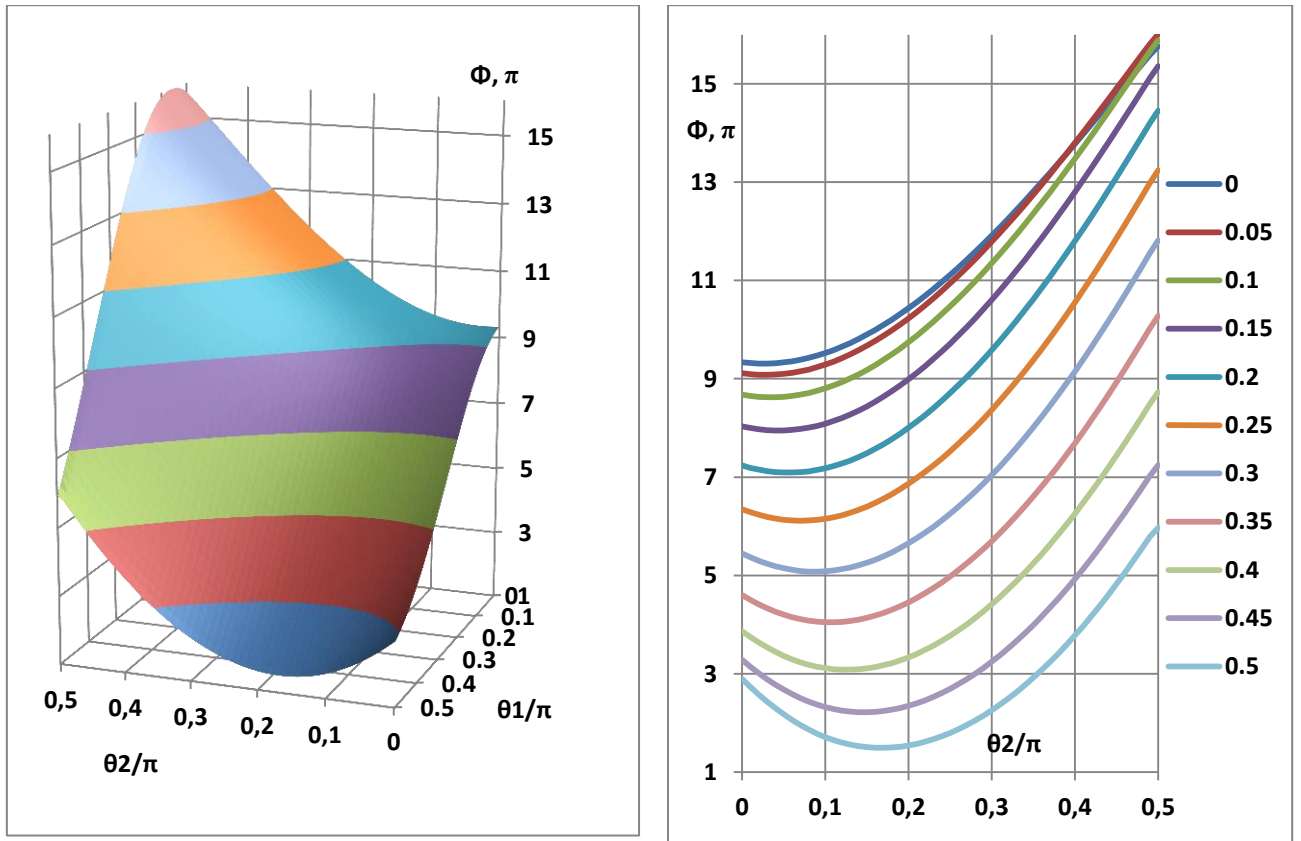


Рис.3.1.2.6.в. Угол падения β равен 75° . *НубВ*

На рис.3.1.2.7 показаны для *НубВ* ячейки, угол отрицательный (как на рис.3.1.2.1).

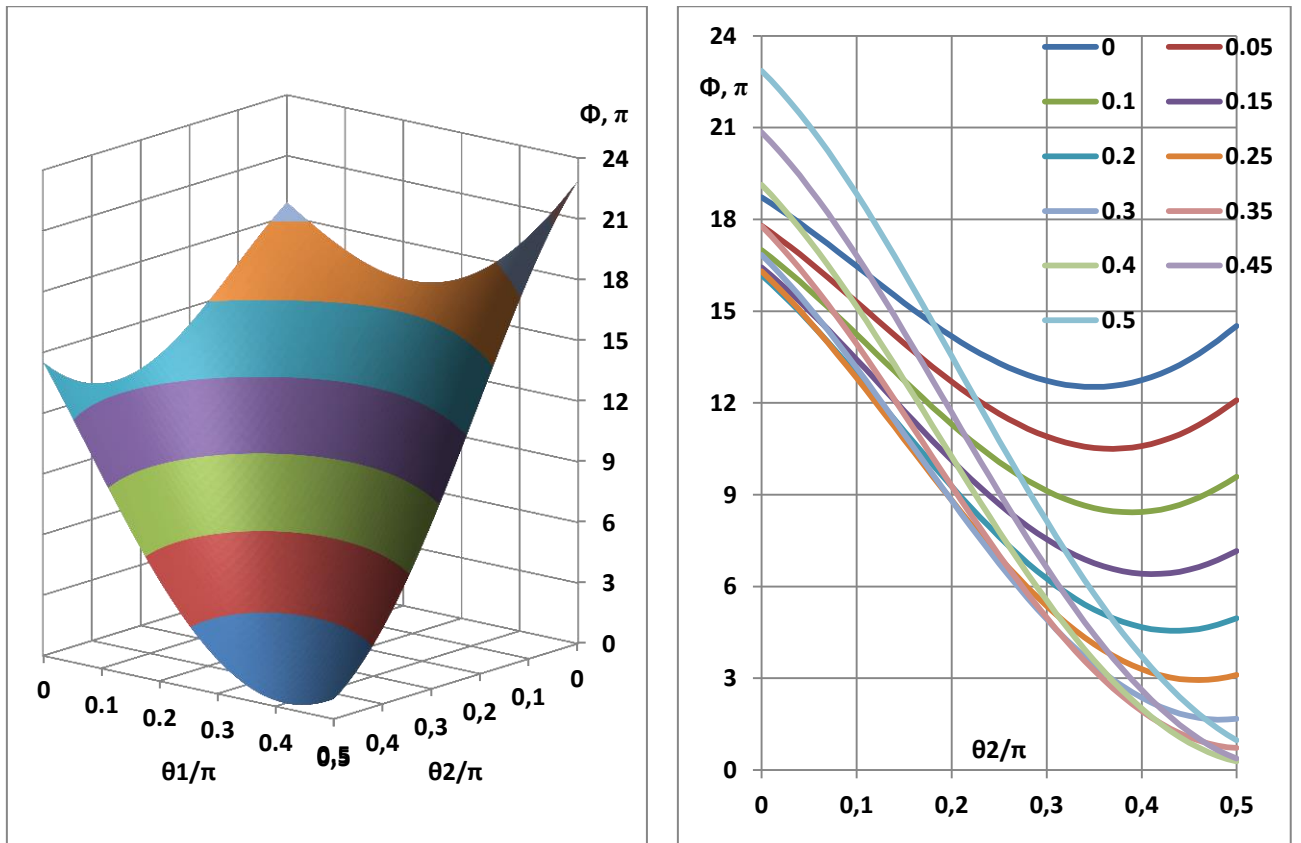
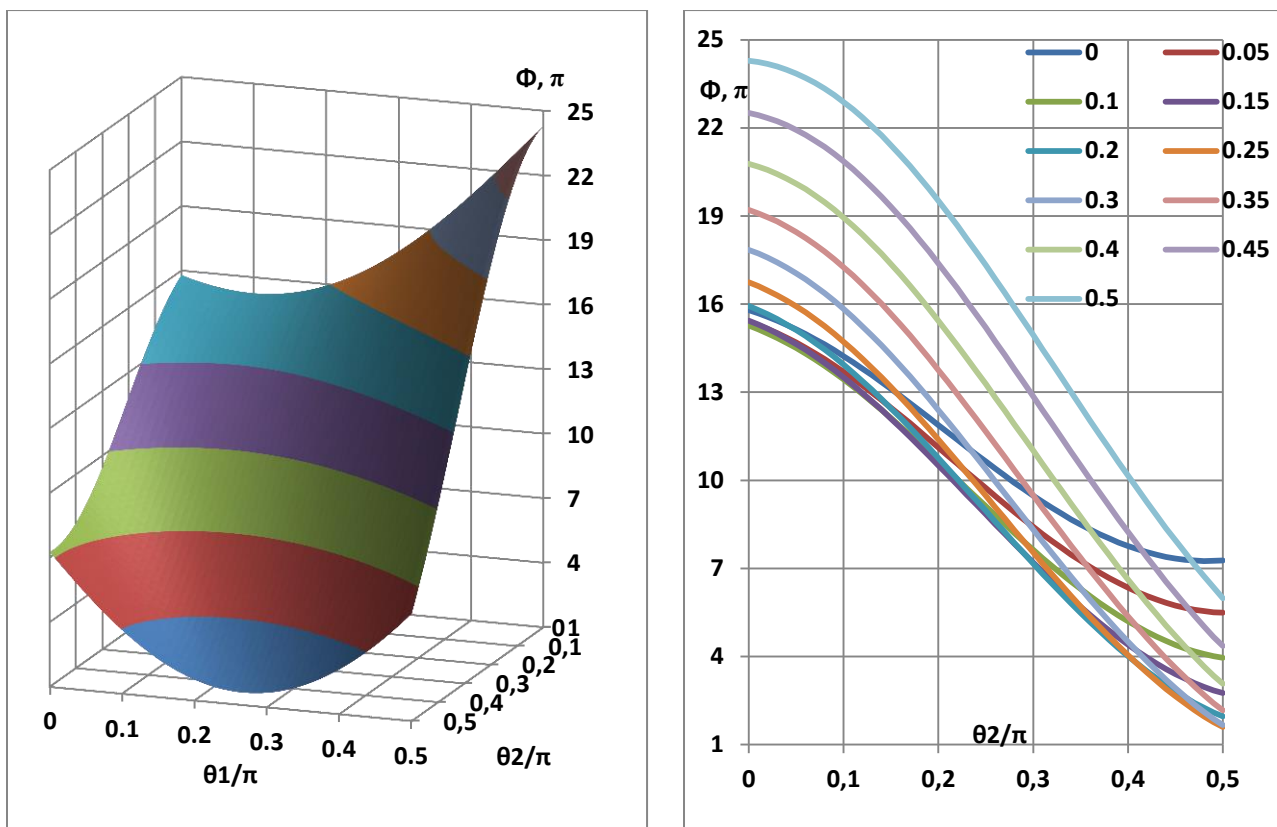
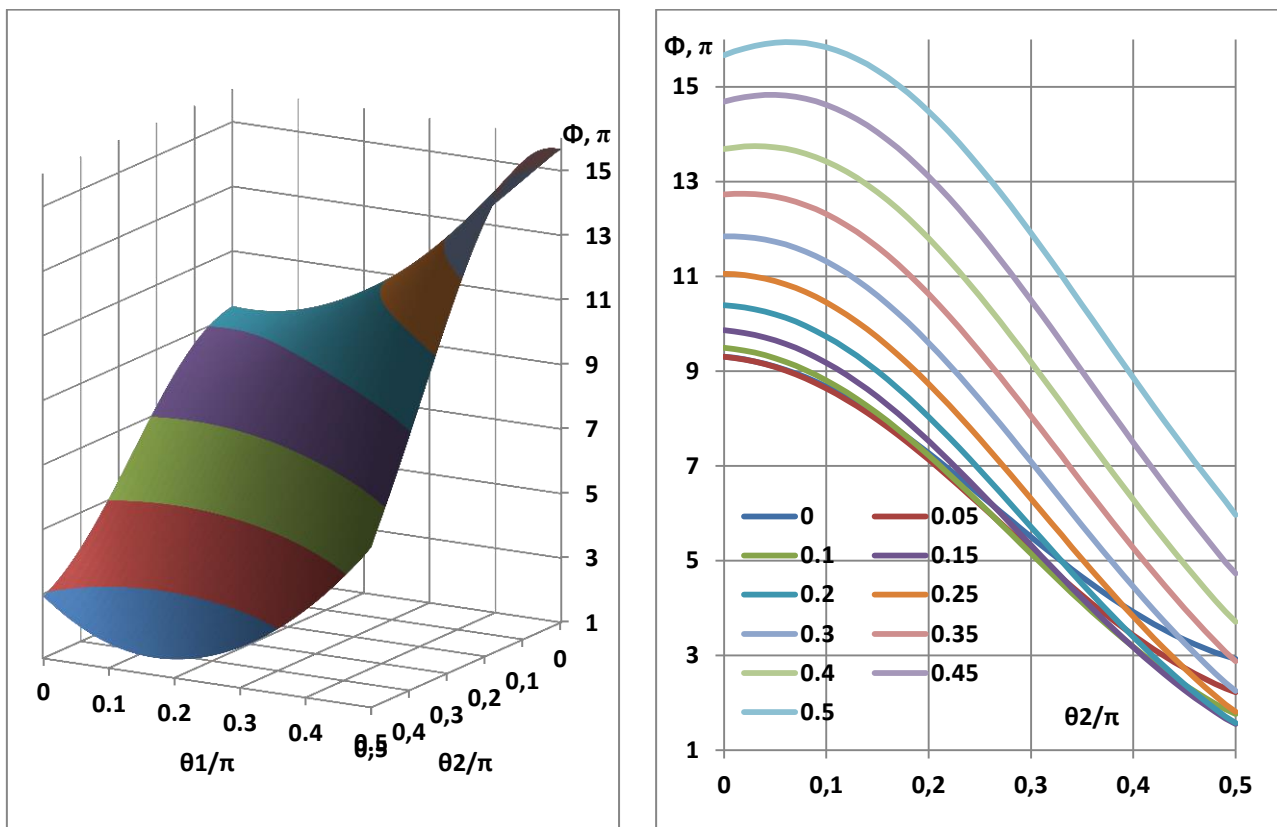


Рис.3.1.2.7.а. Угол падения β отрицательный, равен 15° . *НybB*Рис.3.1.2.7.б. Угол падения β отрицательный, равен 45° . *НybB*Рис.3.1.2.7.в. Угол падения β отрицательный, равен 75° . *НybB*

§5. Оптические свойства ЖК ячеек при падении света под углом к плоскости директора ЖК

Рассмотрим, когда плоскость падения пучка 12 составляет угол φ с плоскостью директора ЖК ячейки xz , случай наклонного падения поляризованного пучка света (Рис.3.1.2.8). Угол падения равен β . Тогда по отношению к этой плоскости вектор электрического поля световой волны составляет угол $\pi/2 + \varphi$.

Смоделированные при углах падения луча света, относящихся к случаям, отличным от нормального падения ($\beta = 15^\circ$) и варьировании угла φ от 15° до 30° , зависимости нормированной разности фаз от углов наклона на разных сторонах *HybS* ячейки показаны на рис.3.1.2.9. Для каждого угла падения света, при изменении угла φ , область значений $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ поднимается вверх и одновременно ее амплитуда уменьшается, однако видно, что вид набора зависимостей $\Phi(\theta_0^{(1)})$ при разных $\theta_0^{(2)}$ мало изменяется. Аналогично для случаев *Hyb90* и *HybB* при изменении угла φ будет изменяться вид набора зависимостей $\Phi(\theta_0^{(1)})$ при разных $\theta_0^{(2)}$, для каждого угла падения света.

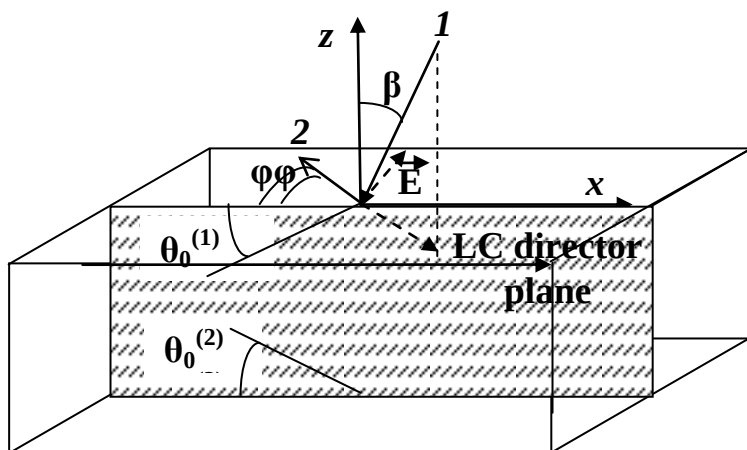


Рис.3.1.2.8. Наклонное падение поляризованного пучка света с несовпадающими плоскостями падения пучка и плоскости директора ЖК ячейки.

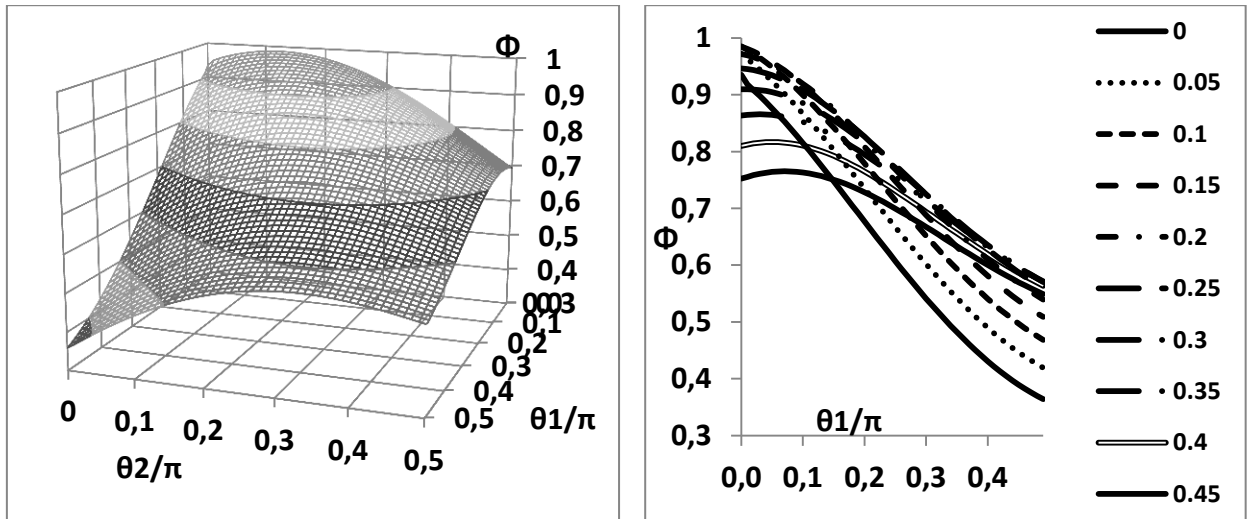
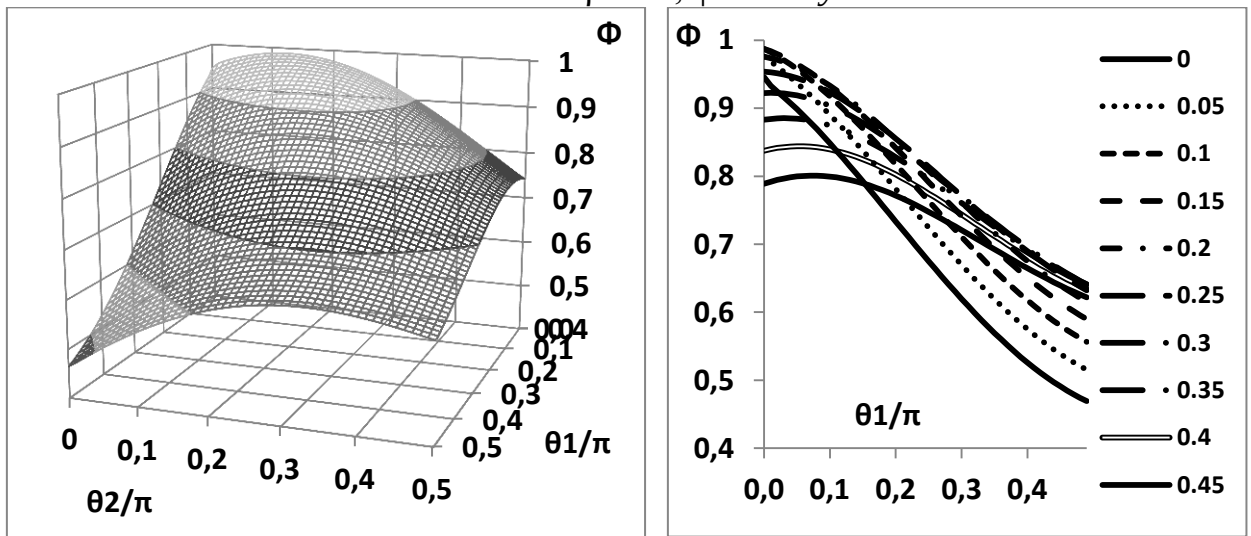
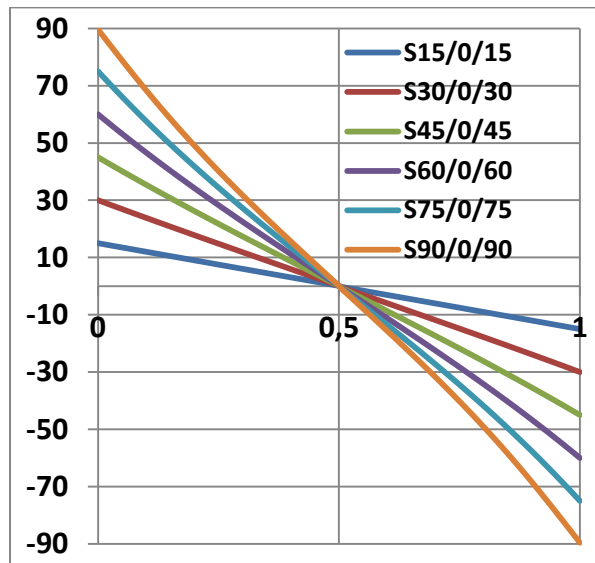
Рис.3.1.2.9.а. $\beta=15^\circ$, $\varphi=15^\circ$ HybSРис.3.1.2.9.б. $\beta=15^\circ$, $\varphi=30^\circ$ HybS

Рис.3.1.2.9. Смоделированные зависимости $\Phi(\theta_0^{(1)}, \theta_0^{(2)})$ от углов наклона на разных сторонах HybS ячейки при угле падения луча света $\beta=15^\circ$ и варьировании угла φ от 15° до 30° .

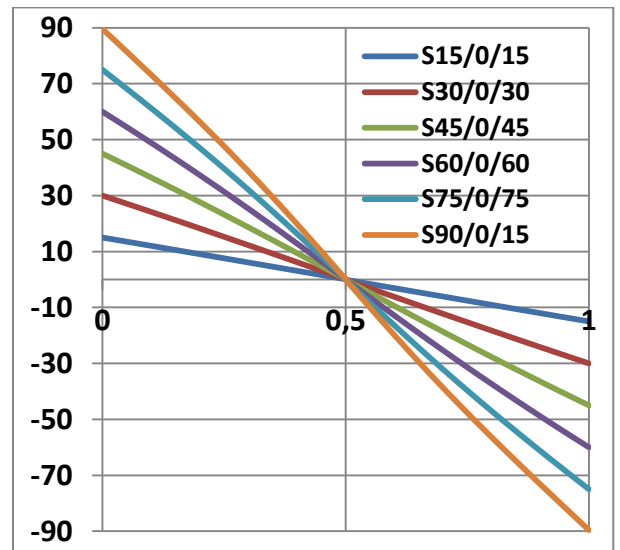
Часть 2. Оптические и ориентационные свойства нематических ЖК ячеек при $K_{11} \neq K_{33}$

§1. Распределение угла наклона директора ЖК по толщине ячейки

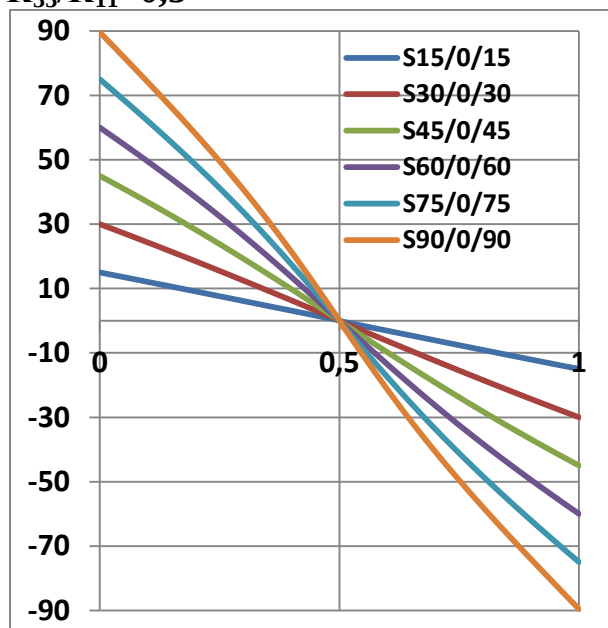
Смоделированное распределение директора ЖК по толщине S ячейки, для случая нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$, с соотношениями коэффициентов упругости K_{33}/K_{11} от $K_{33}/K_{11}=0,5$ до $K_{33}/K_{11}=3$, с симметричными краевыми углами показано на рис.3.2.1, при краевых углах от 15° до 90° .



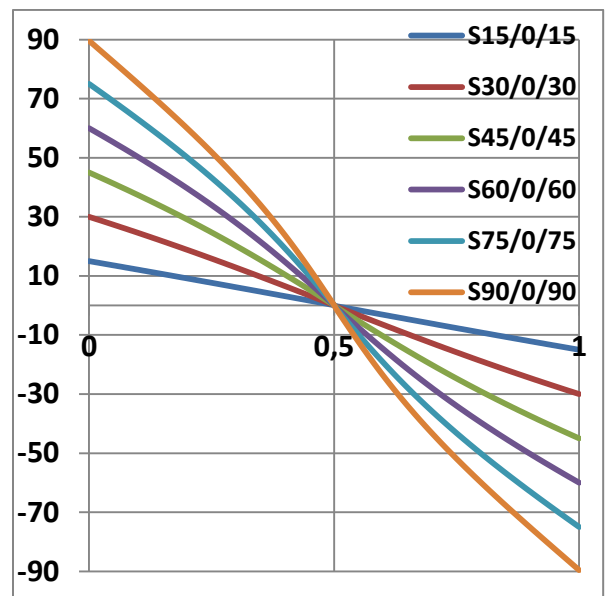
$K_{33}/K_{11}=0,5$



$K_{33}/K_{11}=1,5$



$K_{33}/K_{11}=2$



$K_{33}/K_{11}=3,0$

Рис.3.2.1. Зависимость угла наклона директора ЖК от относительной толщины для S ячейки с краевыми углами от 15° до 90° (симметричными), K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3

Случай нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$ важен в практическом применении (для приборов обработки и отображения информации). Необходимо уточнить в связи с этим, каковы диапазоны, при которых актуальны модели и методики, разработанные в данной диссертационной работе, параметров ячеек нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$. На рис.3.2.2 показаны ячейки с В распределением с K_{33}/K_{11} от $K_{33}/K_{11}=0,5$ до $K_{33}/K_{11}=3$ и симметричными приповерхностными углами от 15° до 90° .

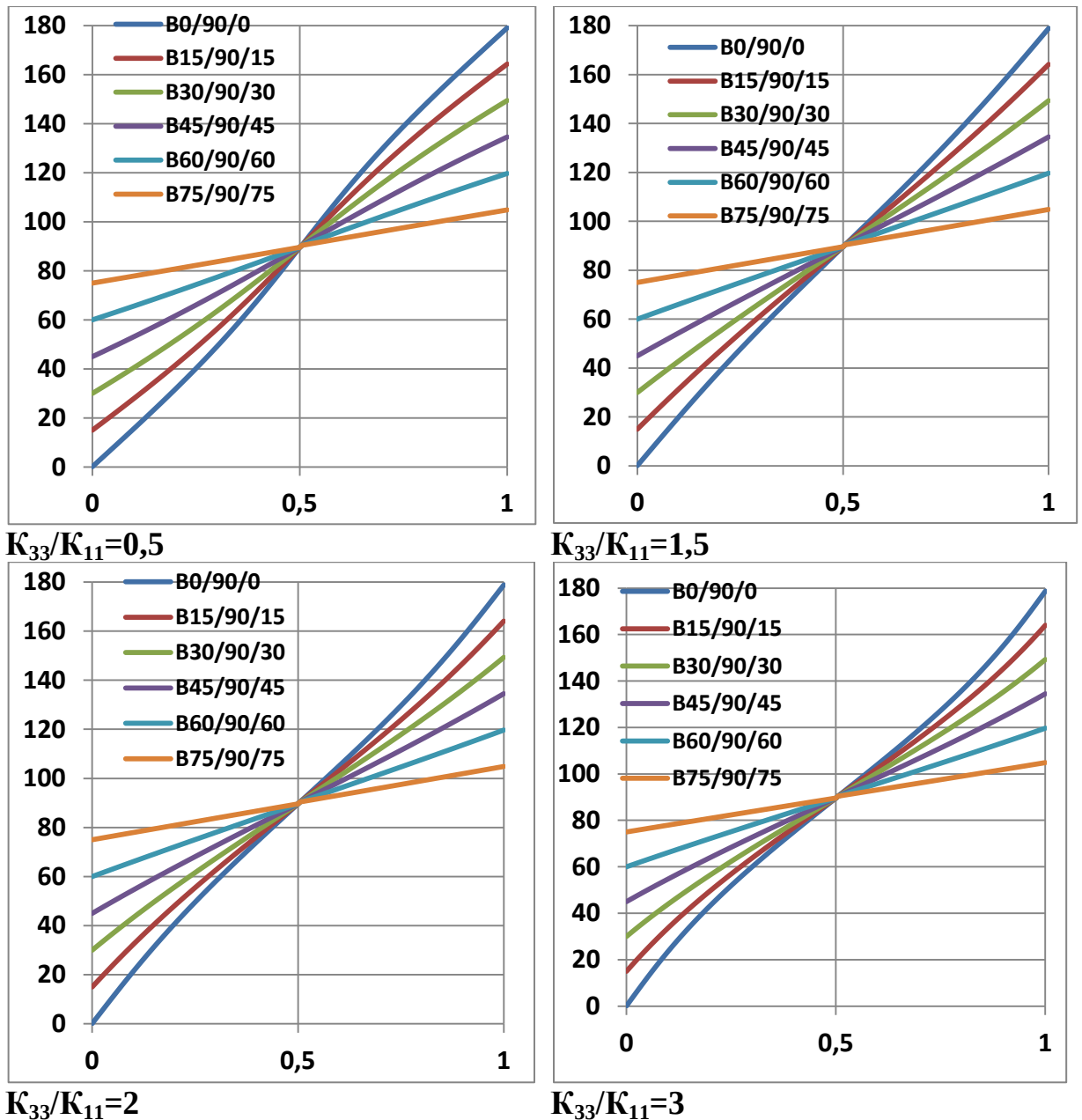


Рис.3.2.2. Зависимость угла наклона директора ЖК от относительной толщины для В ячейки с краевыми углами от 15° до 90° (симметричными), K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3

На рис.3.2.3 показаны ячейки с Нуб90 распределением и несимметричными приповерхностными углами, с $K_{33}/K_{11} = 0,5$, и на рис.3.2.4 при $K_{33}/K_{11} = 3$, при углах, изменяющихся от 0° до 90°

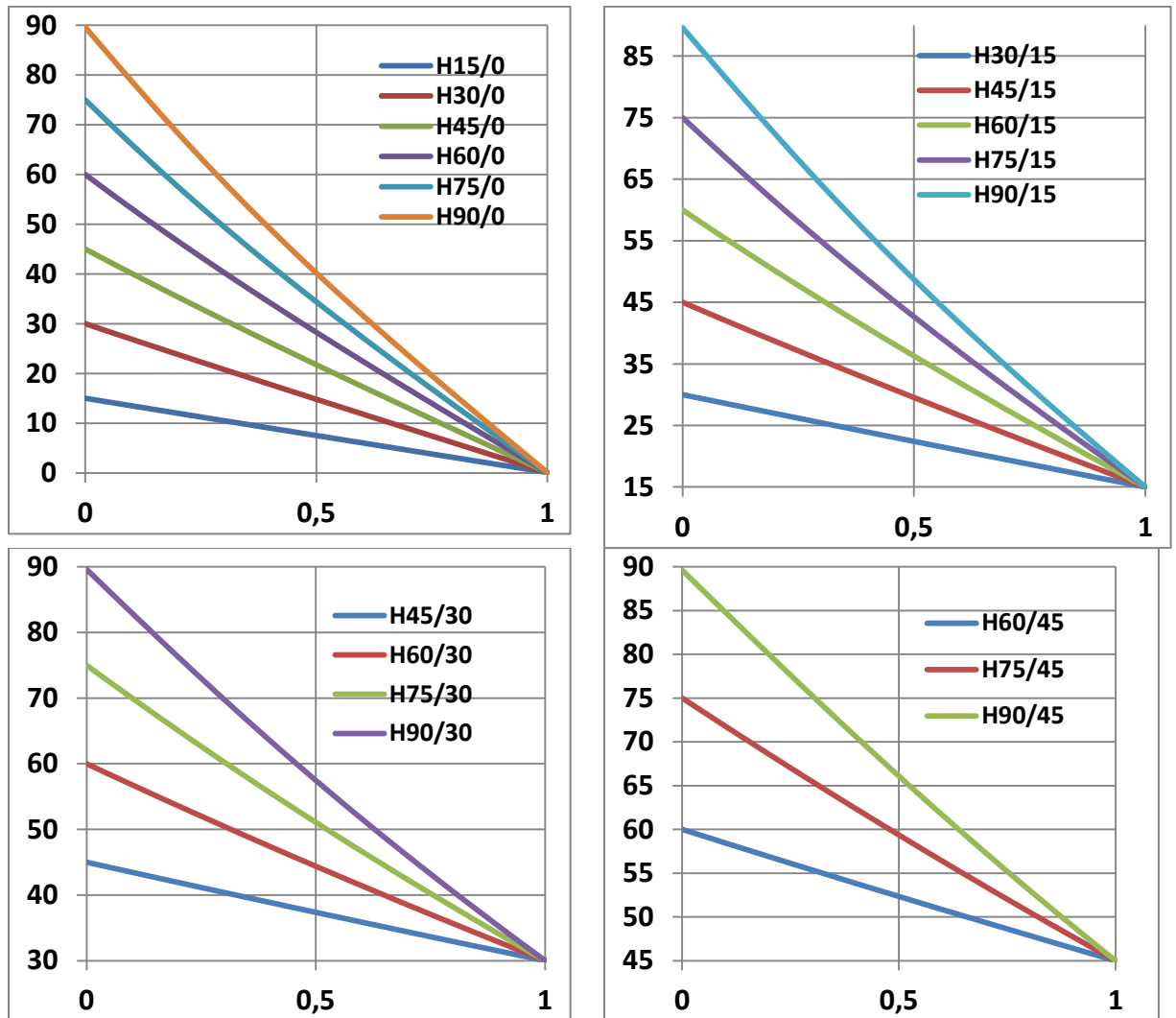


Рис.3.2.3. Зависимость угла наклона директора ЖК от относительной толщины для Нуб90 ячейки с краевыми углами от 0° до 90° (несимметричными), $K_{33}/K_{11}=0,5$.

Распределение директора ЖК по толщине показано: Нуб90 ячейки при угле директора от 0° до 90° с несимметричными приповерхностными углами (рис.3.2.5.а); НубS ячейки при приповерхностных углах 90° с симметричными приповерхностными углами (рис.3.2.5.б); НубВ ячейки при приповерхностных углах 0° с симметричными приповерхностными углами (рис.3.2.5.в). K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3 для всех рис.3.2.5.

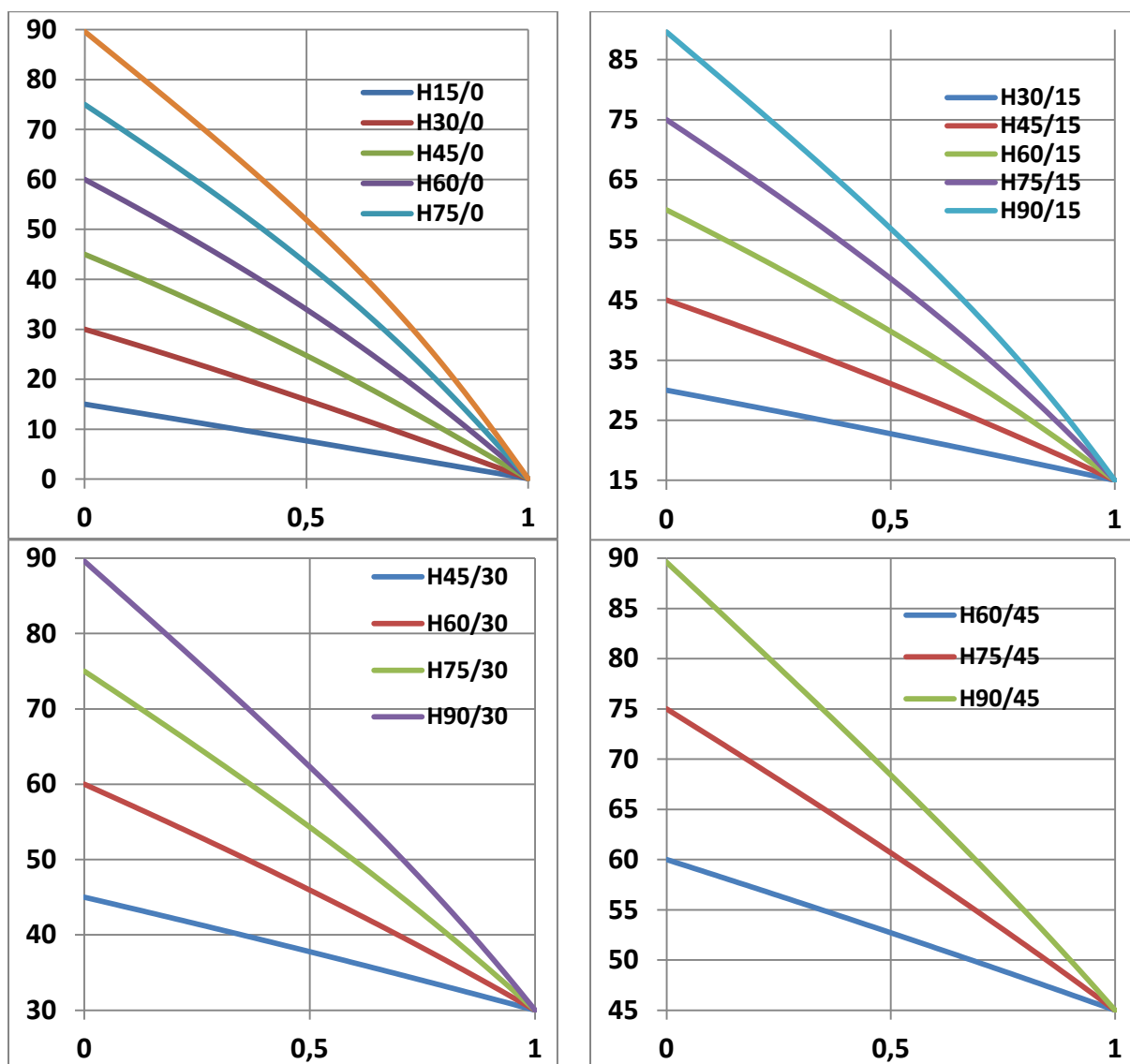


Рис.3.2.4. Зависимость угла наклона директора ЖК от относительной толщины для Нуб90 ячейки с краевыми углами от 0° до 90° (несимметричными), $K_{33}/K_{11}=3$.

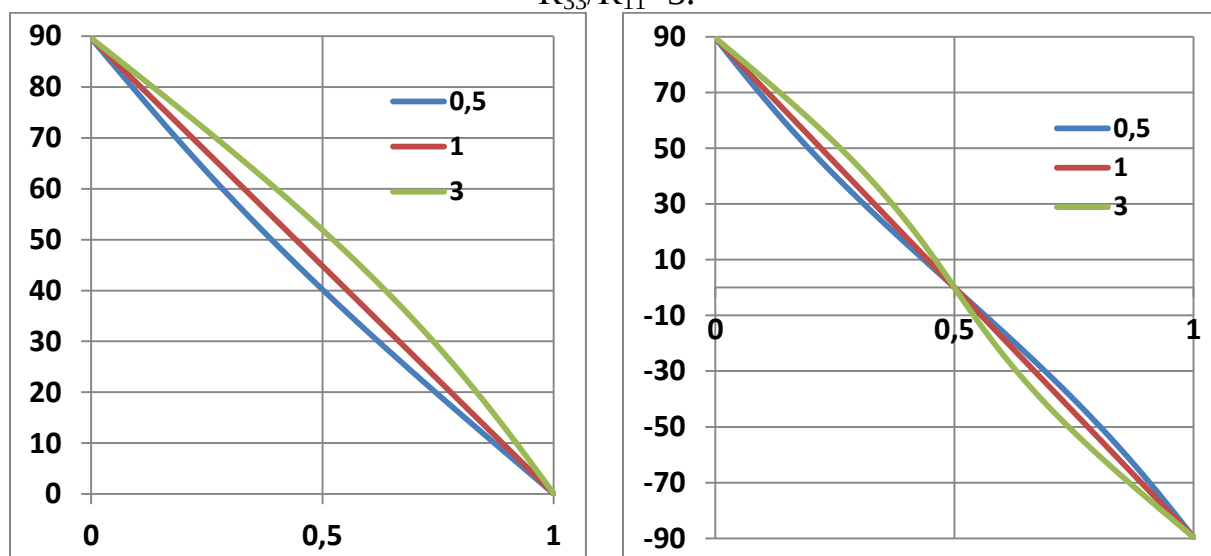


Рис.3.2.5.а. Зависимость угла наклона директора ЖК от

Рис.3.2.5.б. Зависимость угла наклона директора ЖК от

относительной толщины для Нуб90 ячейки с краевыми углами от 0° до 90° (несимметричными), K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

относительной толщины для НубS ячейки с краевыми углами 90° (симметричными), K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

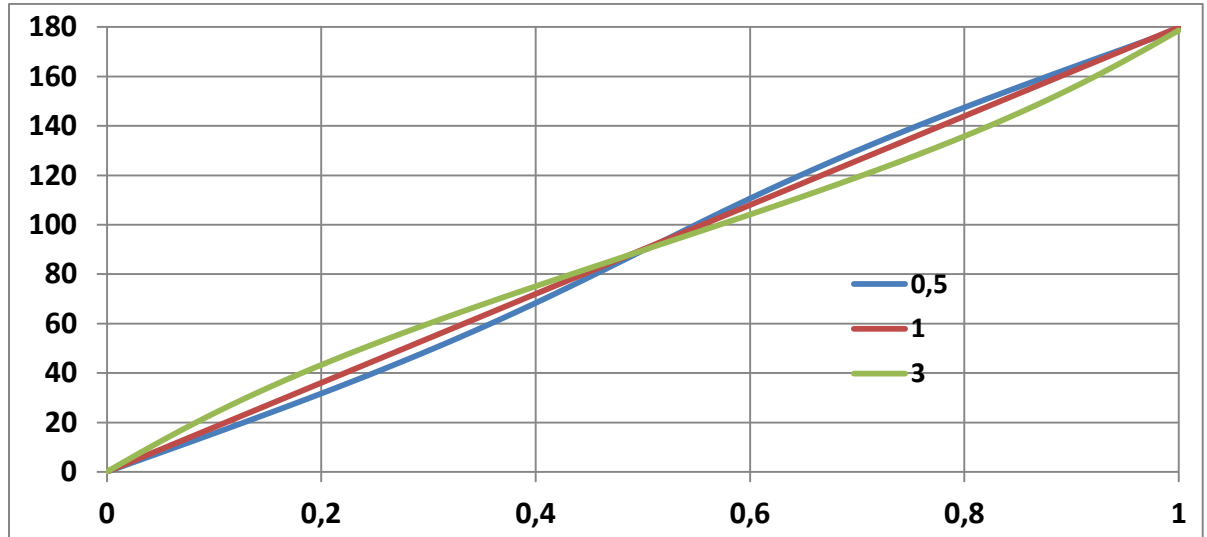


Рис.3.2.5.в. Зависимость угла наклона директора ЖК от относительной толщины для НубВ ячейки с краевыми углами 0° (симметричными), K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

§2. Зависимость разности фаз от краевого угла

На рис.3.2.6, рис.3.2.7 и рис.3.2.8 изображена типичная для S, В и Нуб90 распределений зависимость $\Phi(K_{33}/K_{11})$, где нормальное падение из внешней среды воздуха ($n=1$) луча света с длиной волны 630 нм, толщина 20 мкм, $n_o=1.5$, $n_e=1.7$.

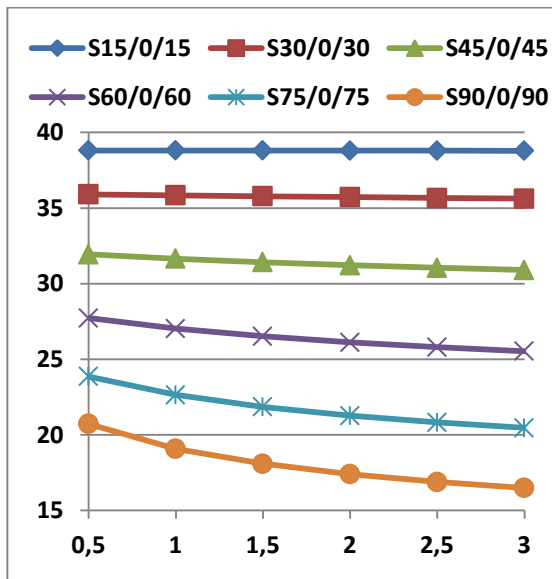


Рис.3.2.6. $\Phi(K_{33}/K_{11})$ для S распр.-я с

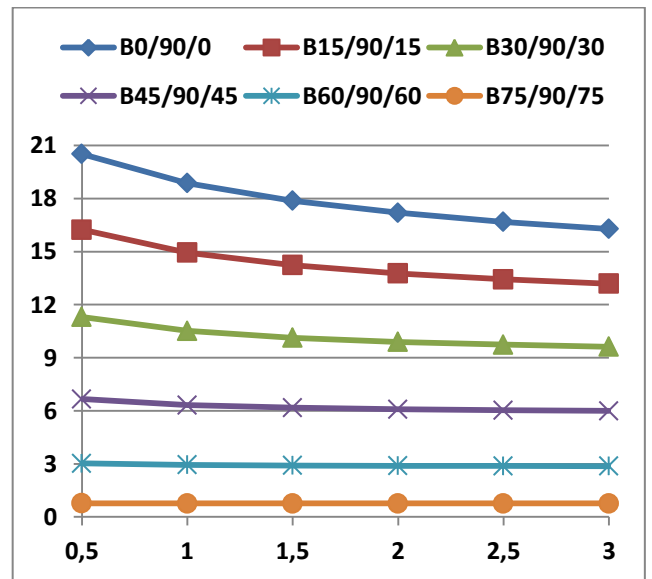
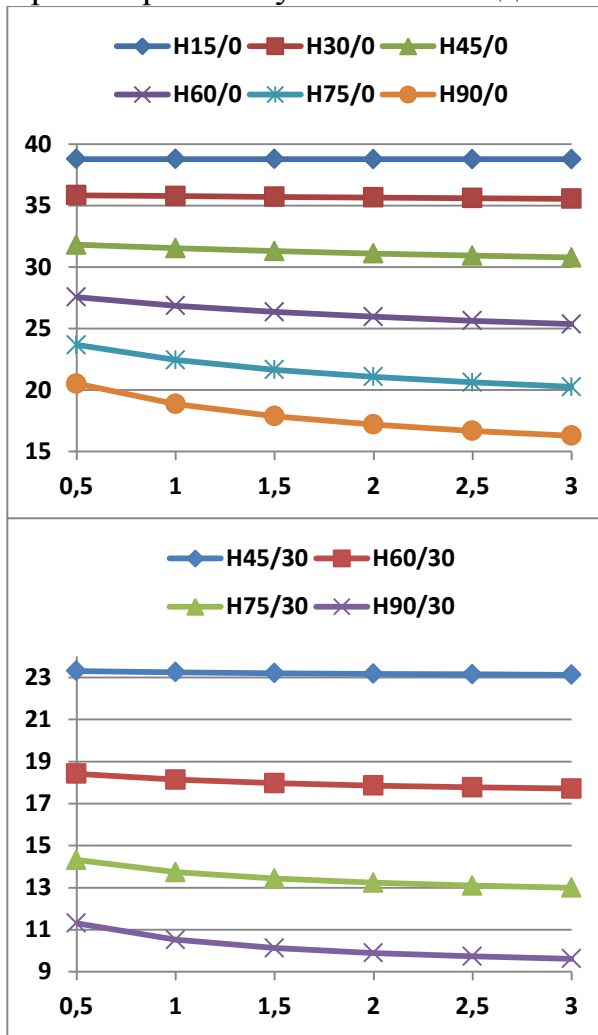


Рис.3.2.7. $\Phi(K_{33}/K_{11})$ для В распр.-я с

K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3 и симметр.-ми
приповерхн.-ми углами от 15° до 90° .



K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3 и симметр.-ми
приповерхн.-ми углами от 0° до 75° .

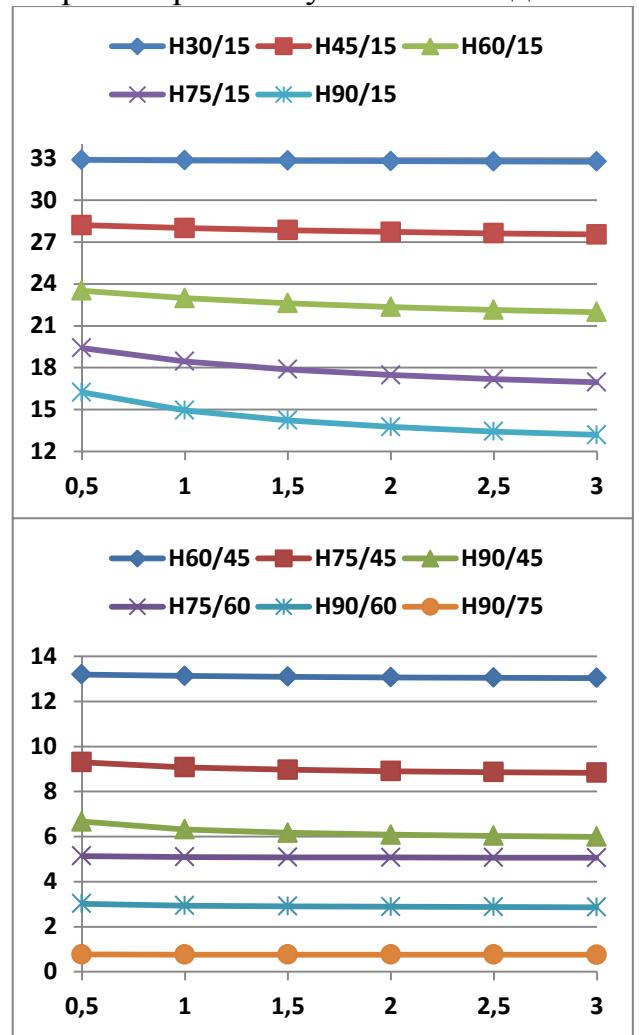


Рис.3.2.8. $\Phi(K_{33}/K_{11})$ для Nub90 распределения с K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3 и несимметр.-ми приповерхностными углами от 0° до 90° .

Для многих смоделированных распределений хорошо видно из распределений, изображенных на рис.3.2.6, рис.3.2.7, рис.3.2.8, что разность фаз остается близка к случаю $K_{33}/K_{11}=1$. Из этого можно сделать вывод, что использованная модель (одноконстантная) вполне пригодна при разнице приповерхностных углов (для Nub90) до 30° или приповерхностных и угла посередине слоя ЖК в ячейке до 30° . Можно рассматривать слой ЖК в S, В ячейках на основании полученных данных как оптически аналогичный паре Nub90 ячеек, на одной стороне которых угол 0 или 90° (в соответствии с углом посередине S или В ячейки), а на другой стороне угол, равный приповерхностному углу для S, В ячеек.

Часть 3. Ориентационные и оптические свойства односторонне ограниченных слоев жидкого кристалла

§1. Описание

ЖК ячейку с симметричными приповерхностными углами можно представить в виде двух симметричных (относительно плоскости посередине толщины ячейки) слоев ЖК, если это ячейка S- или В- типов. Такие слои ЖК будут односторонне ограничены ориентирующей поверхностью, а с другой стороны они ограничены условной границей по толщине рассматриваемого слоя (половина толщины ячейки). Подобный подход можно применить и к гибридной ЖК ячейке, но тогда уже можно говорить о двух разных (по толщине и по приповерхностному углу) слоях ЖК, аналогичных вышеописанным.

ЖК ячейки при достаточно сильном поле, приложенном к ячейке, образуют в средней (по толщине) части ячейки гомеотропную (случай положительной диэлектрической анизотропии) область или планарную (случай отрицательной диэлектрической анизотропии). Такие ячейки можно условно разбивать на три слоя: средний, аналогичный однородной ячейке по своим оптическим свойствам, и два других слоя, аналогичных по своим оптическим свойствам ЖК ячейкам с углами наклона директора от заданного угла наклона для вышеупомянутой рассматриваемой в данном случае ячейки, и до планарного или гомеотропного, в зависимости от знака диэлектрической анизотропии ЖК.

При правильном учете толщины этих слоев и профиля распределения директора ЖК в них, такой подход может быть применен при моделировании свойств как ориентационных, так и ориентационно-оптических, в том числе для расчета зависимости упомянутых свойств от приложенного поля. Упомянутые переходные слои ЖК в литературе описаны, их толщина названа длиной когерентности или параметром де Жена [13]. Важное значение при разработке, совершенствовании и исследовании характеристик приборов обработки и

отображения информации имеет возможность управлять параметрами этих слоев как с помощью ориентирующих покрытий, задающих определенный заранее угол приповерхностного наклона директора ЖК, так и с помощью поля, приложенного к ячейке.

Смоделирован слой ЖК с управляемыми свойствами:

ориентационными, ориентационно-оптическими заданием краевого угла на ориентированной стороне ячейки;

электроориентационными, электрооптическими управляемыми полем.

В частности, в работах Коньяра [63] рассмотрены неориентирующие покрытия. Одна из сторон ячейки ЖК покрыта неориентирующим покрытием не оказывает существенного ориентирующего влияния, а другая сторона ячейки покрыта ориентантом, обеспечивающим заданный приповерхностный угол директора. Для гибридных ЖК ячеек оригинального типа выполнен расчет ориентационных характеристик.

Такую ячейку фактически можно считать реализацией упомянутого выше односторонне ограниченного слоя ЖК. В тексте односторонней названа ячейка ЖК с одной ориентирующей стороной. В тексте не ориентирующая поверхность названа свободной. Директор ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией, при наличии приложенного к ячейке потенциала (ориентирующего электрического поля), будет распределяться от заданного приповерхностного угла и до планарного (параллельного стенке ячейки). Директор ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией будет распределяться от заданного угла и до гомеотропного (перпендикулярного стенке ячейки). Длинной когерентности или параметром де Жена [13] называется толщина такого слоя, достаточная для переориентации ЖК по полю.

Разработана модель и предложен метод расчета в односторонней ячейке, в зависимости от толщины ячейки и угла наклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом, распределения директора ЖК как с отрицательной, так и с положительной диэлектрической анизотропией.

Использовалось, как и в предыдущих главах данной работы, одноконстантное приближение $K_{11}=K_{33}$. Во всем объеме ячейки, включая ее границы, считалось, что изменение директора происходило в одной плоскости, перпендикулярной подложкам. При планарной начальной ориентации нематика в ЖК ячейке и при условии, что поле перпендикулярно поверхности ячейки, эффект Фредерикса в магнитном поле описывается уравнением (т.н. «условие равновесия»)

$$\frac{d}{dz} \left[\left(K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta \right) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \chi_a H^2 \sin^2 \theta \right] = 0 \quad (3.3.1)$$

где z относительная толщина ячейки, L толщина ячейки. Для слоя ЖК, отстоящего на величину X от той поверхности ячейки, относительно которой ведется отсчет относительной толщины z , величина $z=X/L$. Отсюда следует что

$$\left\{ 2 \left(\frac{d^2 \theta}{dz^2} \right) (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) + 2 \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 ((K_{33} - K_{11}) \sin \theta \cos \theta) + 2 \chi_a H^2 \sin \theta \cos \theta \right\} \left(\frac{d\theta}{dz} \right) = 0 \quad (3.3.2)$$

Если рассмотреть вариант $\frac{d\theta}{dz} = \text{const}$, то из него следует, что в ячейке линейное распределение угла наклона директора ЖК. Это верно при отсутствии поля. Но при наличии поля распределение уже не будет линейным. И при одноконстантном приближении ($K_{11}=K_{33}$) верно следующее

$$\left\{ \left(\frac{d^2 \theta}{dz^2} \right) K_{11} + \chi_a H^2 \sin \theta \cos \theta \right\} = 0 \quad (3.3.3)$$

После элементарных преобразований, получим

$$\left(\frac{d^2 \theta}{dz^2} \right) = - \frac{\chi_a H^2 \sin \theta \cos \theta}{K_{11}} \quad (3.3.4a)$$

Или, что то же самое

$$\left(\frac{d\theta}{dz} \right) = \frac{\chi_a H^2 \cos^2 \theta}{2 K_{11}} \quad (3.3.4b)$$

Или, аналогично,

$$\left(\frac{d\theta}{dz} \right) = - \frac{\chi_{\alpha} H^2 \sin^2 \theta}{2 K_{11}} \quad (3.3.4в)$$

Аналогично, переходя к электрическому полю, получаем следующее. При одноконстантном приближении, для ячеек ЖК с положительной диэлектрической анизотропией верно следующее:

$$\frac{d\theta}{dz} = M \cos^2 \theta \quad (3.3.5а)$$

Для ячеек ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией верно:

$$\frac{d\theta}{dz} = M (-\sin^2 \theta) \quad (3.3.5б)$$

Где

$$M = \frac{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon E^2}{2 K_{11}} \quad (3.3.6)$$

Где $E=U/d$ напряженность поля при толщине ячейки, равной d . Параметр M , в зависимости от распределения поля по толщине ячейки, может быть задан как функция от координаты по толщине ячейки или постоянным.

§2. Результаты моделирования. Ячейка, заполненная ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией. Распределение директора ЖК в односторонне ограниченном слое

Ячейку, заполненную ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией, рассмотрим ниже. Она стремится, по мере нарастания поля, к планарной ориентации директора ЖК. Толщина слоя, где заметно влияние заданного ориентантом приповерхностного угла (длина когерентности), по мере нарастания поля уменьшается. В таблице 3.3.1 указано соответствие между рисунками и параметром M .

Таблица 3.3.1.

Распределения угла наклона директора ЖК по толщине ячейки показаны ниже на рисунках при следующих значениях параметра M :

Параметр M	Рисунок
$0,05 \cdot 10^6$	Рис.3.3.1а

$0,1 \cdot 10^6$	Рис.3.3.1б
$0,2 \cdot 10^6$	Рис.3.3.1в
$0,4 \cdot 10^6$	Рис.3.3.1г
$0,8 \cdot 10^6$	Рис.3.3.1д

На рис.3.3.1 изображено: посередине - распределение директора ЖК в односторонней ячейке, в зависимости от толщины ячейки и угла наклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом; слева - продольные (вдоль оси z , то есть по толщине ячейки) профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона на ориентирующей стороне ячейки; справа - изображен угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки в зависимости от толщины ячейки и угла наклона директора ЖК на ориентирующей стороне ячейки.

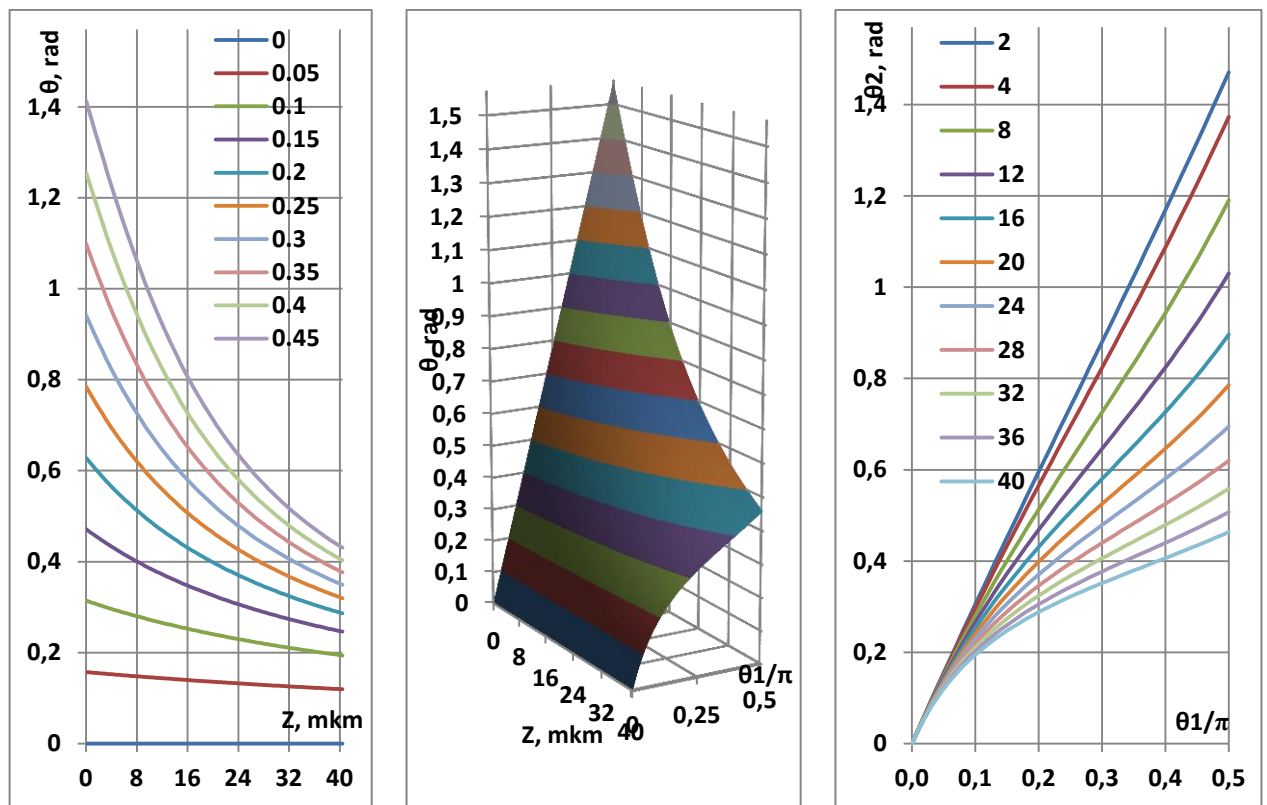
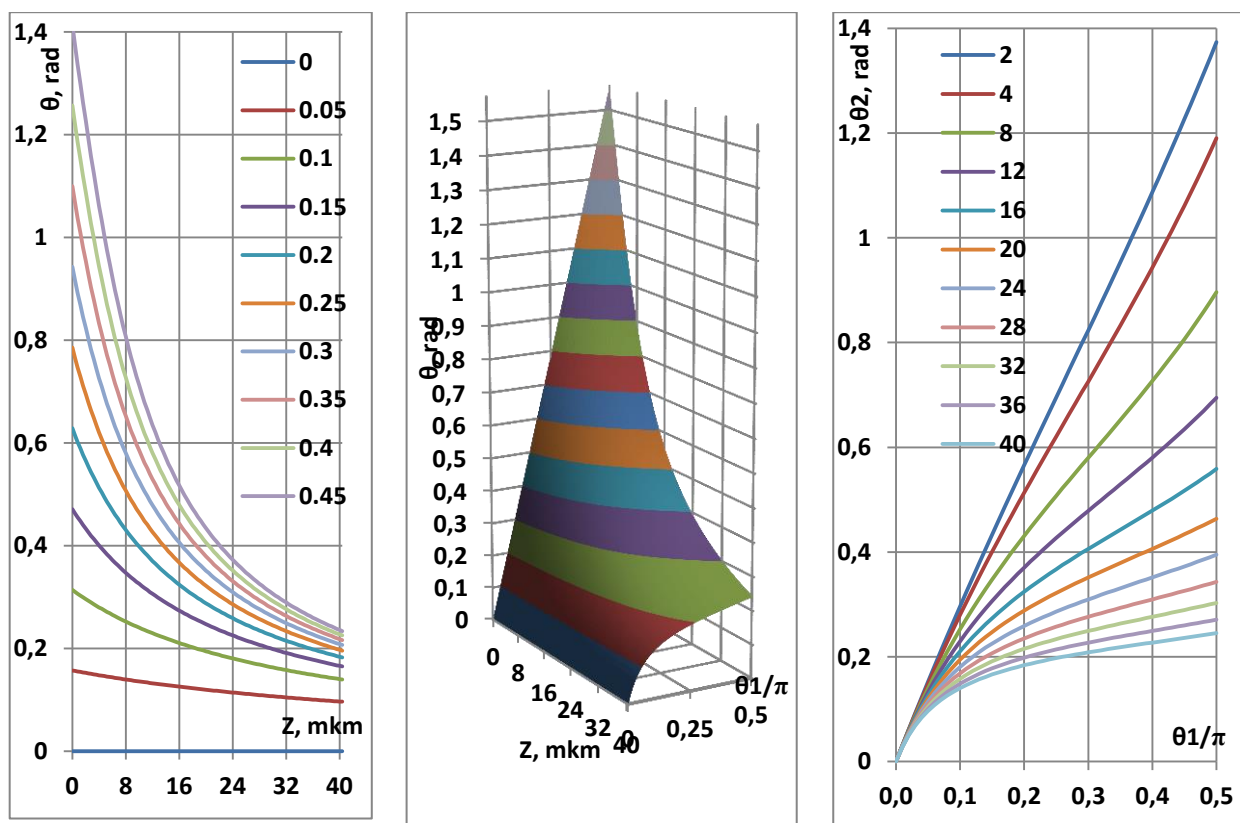
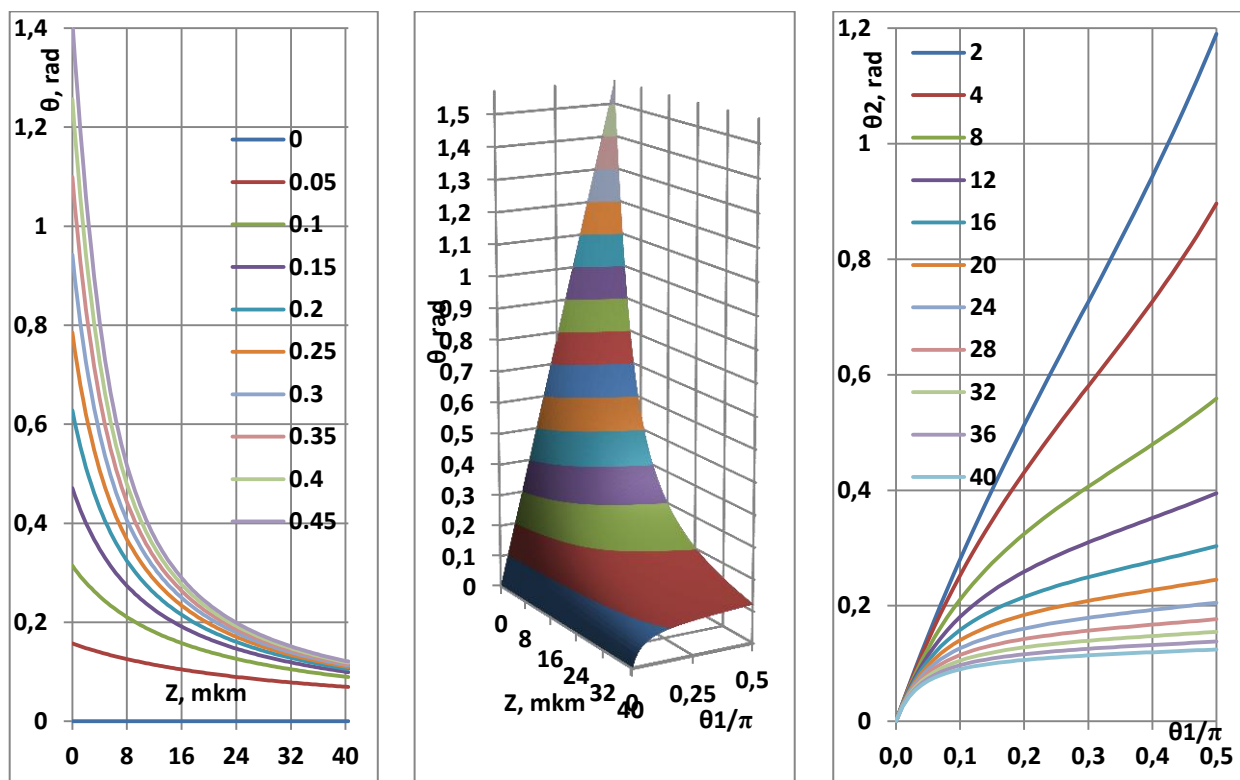
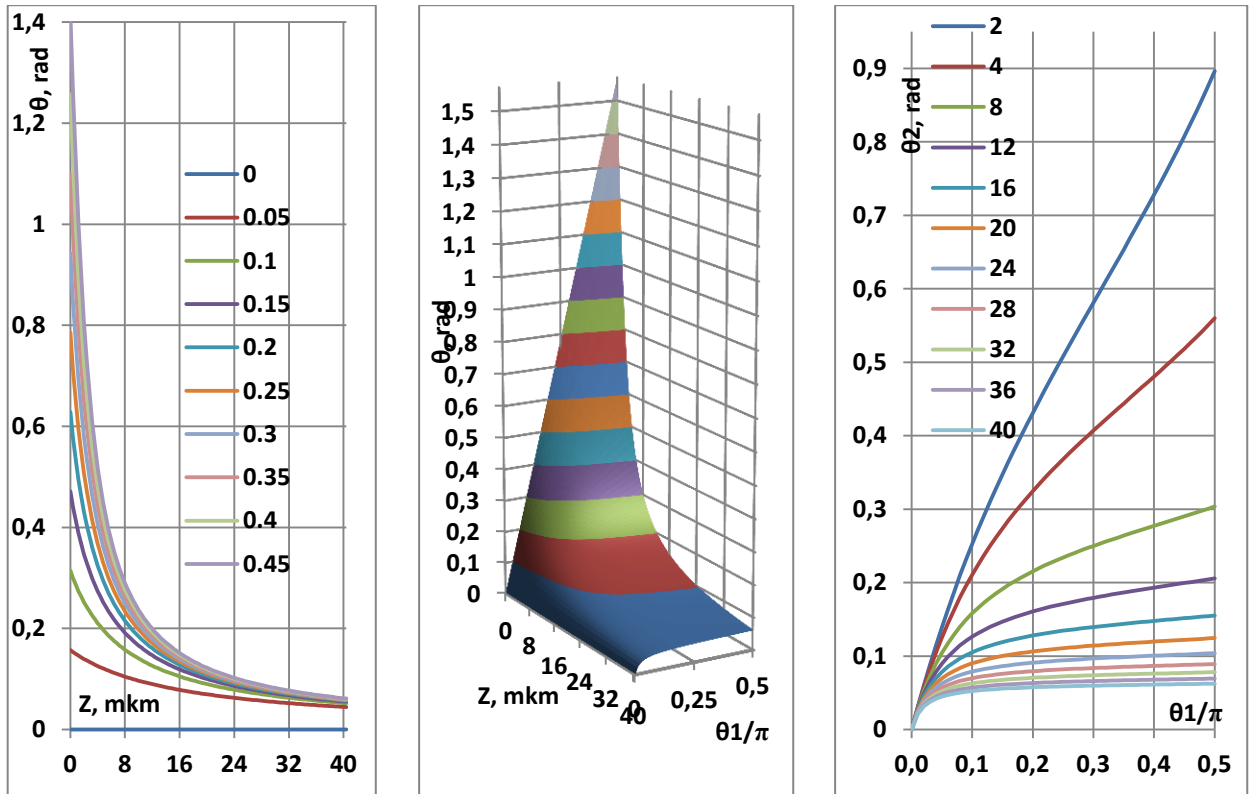
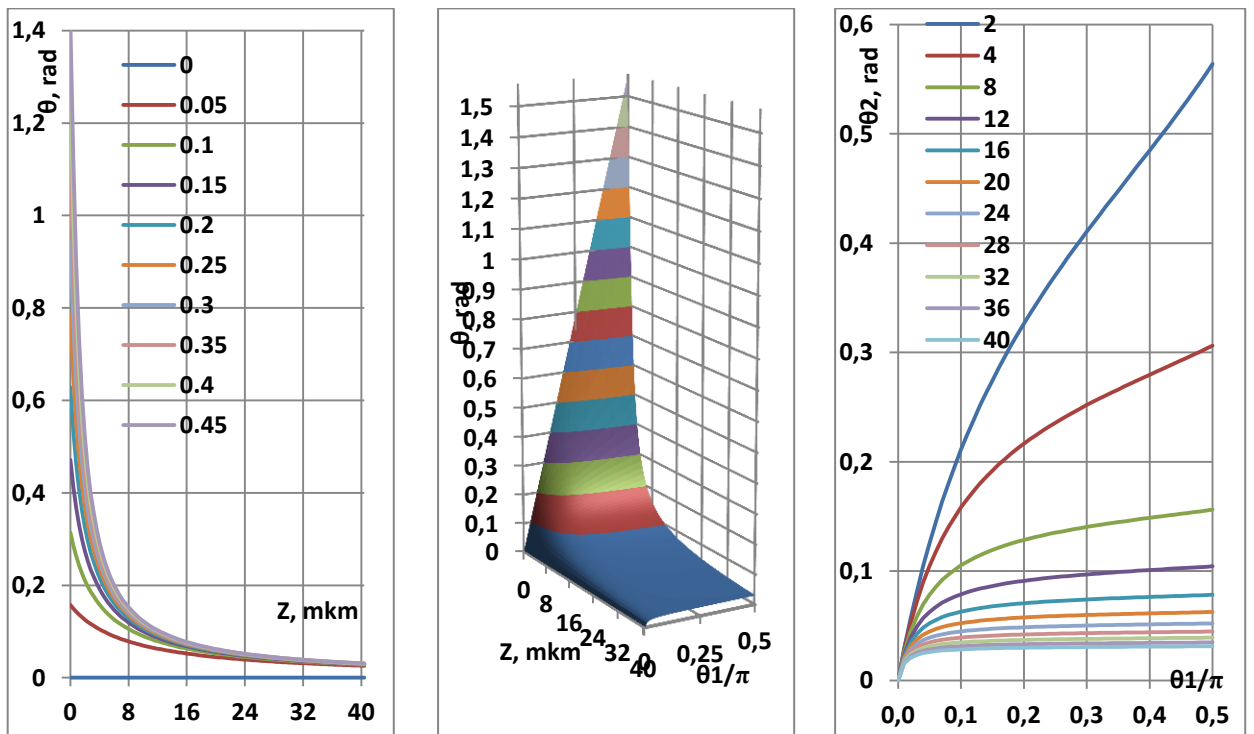


Рис.3.3.1.а. Параметр $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

Рис.3.3.1.б. Параметр $M=0,1 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.Рис.3.3.1.в. Параметр $M=0,2 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

Рис.3.3.1.г. Параметр $M=0,4 \cdot 10^6$. $\Delta \varepsilon < 0$.Рис.3.3.1.д. Параметр $M=0,8 \cdot 10^6$. $\Delta \varepsilon < 0$.

Как наглядно показано на рис.3.3.1, можно регулировать толщину переходного слоя (длину когерентности) ЖК, варьируя для этого комплексно параметры ячейки (угол преднаклона, связанный с поверхностной обработкой,

и толщину) и прилагаемое поле с учетом упругих и диэлектрических свойств ЖК. Можно регулировать распределение директора по толщине ячейки и приповерхностный угол на свободной стороне (назовем ее свободной стороной ячейки, так как на ней приповерхностный угол наклона директора ЖК свободен, в отличие от покрытой ориентантом стороны ячейки, которую будем называть ориентирующей стороной), варьируя для этого прилагаемое поле с учетом упругих и диэлектрических свойств ЖК и толщины ячейки. Это верно для различных типов ячеек ЖК, с положительной или отрицательной диэлектрической анизотропией.

Ранее в данной главе были рассмотрены неодноконстантные ЖК ($K_{11} \neq K_{33}$). Было отмечено, что, в основном, одноконстантная модель актуальна и для широкого диапазона неодноконстантных ЖК. Следовательно, можно при разработке средств отображения и обработки информации рассматривать ЖК ячейку как сумму трех слоев, двух приповерхностных и переориентировавшегося (планарного или гомеотропного) слоя между ними. В таком случае важно оценить, как это было показано на рис.3.3.1, какова толщина приповерхностного слоя с учетом ряда упругих и диэлектрических характеристик ЖК материала, а также учитывая прилагаемое поле. Тогда станет ясно, каков профиль распределения директора ЖК по толщине ячейки и можно будет рассчитать, как показано в данной работе, оптические и некоторые другие характеристики ЖК ячейки. Как показано выше, можно рассчитывать оптические характеристики для ячеек ЖК с разными углами на противоположных сторонах. Сами углы (от 0 до 90°) мы можем задавать разработанными в данной работе ориентантами. Таким образом, по мере нарастания поля, приложенного к ячейке, распределение директора по толщине ячейки, рассмотренное в данной главе для случая «без поля», то есть при поле меньше порогового, будет заменено сначала на два приграничных слоя, причем, возможно, разной толщины и с разным профилем, а уже затем на три слоя (приграничные и полностью ориентированный между ними). Следовательно, разработанная в данной работе и изложенная в данной части главы 3 модель

односторонней ячейки логично дополняет разработанные и изложенные в предыдущих главах методики и модели, методы применения ориентантов, методики определения контролируемых параметров (угла, энергии сцепления, параметров преломления, толщины, разности фаз в зависимости от поля). Комплексно они позволяют спроектировать ЖК ячейку (многослойную систему ЖК ячеек, например, с учетом компенсаторов) с заранее определенными ориентационными, оптическими, электрооптическими свойствами, как в отсутствие поля, так и для широкого диапазона прилагаемого к ячейке электрического поля. По мере увеличения поля, будет возрастать величина параметра M . Это означает, что последовательно будет идти переход от конфигураций, рассмотренных выше (поле меньше порогового) через все конфигурации, рассмотренные на рис.3.3.1, и до более высоких значений параметра M , если будет приложено более высокое поле. Оптические характеристики при этом будут последовательно изменяться.

§3. Результаты моделирования. Распределение директора ЖК с положительной диэлектрической анизотропией в односторонне ограниченном слое

Рассмотрим ячейку, заполненную ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. По мере нарастания поля она стремится к гомеотропной ориентации директора ЖК, а толщина слоя (длина когерентности), где заметно влияние заданного ориентантом приповерхностного угла, уменьшается. В таблице 3.3.2 указано соответствие между рисунками и параметром M .

Таблица 3.3.2.

Распределения угла наклона директора ЖК по толщине ячейки показаны ниже на рисунках при следующих значениях параметра M :

Параметр M	Рисунок
$0,05 \cdot 10^6$	Рис.3.3.2а
$0,1 \cdot 10^6$	Рис.3.3.2б
$0,2 \cdot 10^6$	Рис.3.3.2в
$0,4 \cdot 10^6$	Рис.3.3.2г
$0,8 \cdot 10^6$	Рис.3.3.2д

На рис.3.3.2 изображено: посередине (не на всех рисунках) - распределение директора ЖК в односторонней ячейке, в зависимости от толщины ячейки и угла преднаклона директора на той стороне ячейки, которая покрыта ориентантом; слева - продольные (вдоль оси z , то есть по толщине ячейки) профили распределения директора ЖК при различных начальных углах наклона на ориентирующей стороне ячейки; справа - угол на не покрытой ориентантом стороне ячейки (назовем ее свободной стороной ячейки) в зависимости от толщины ячейки и угла наклона директора ЖК на ориентирующей стороне ячейки.

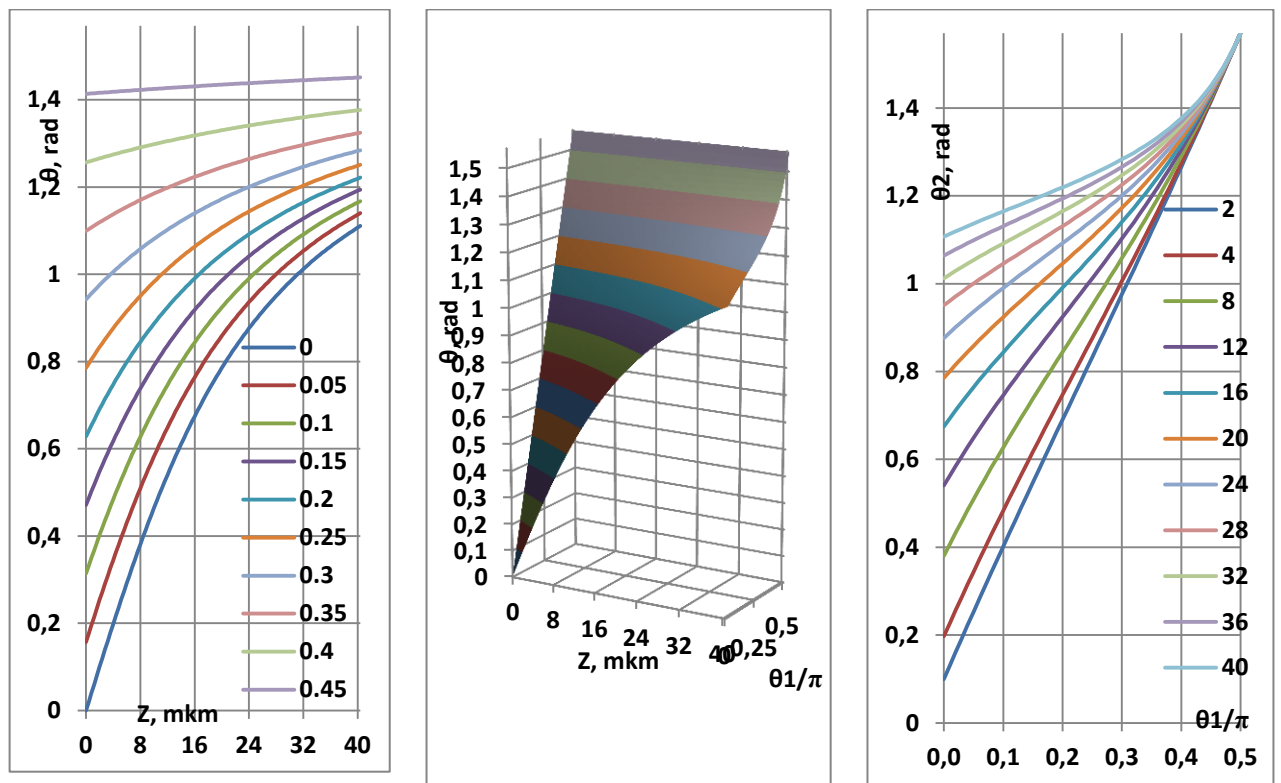
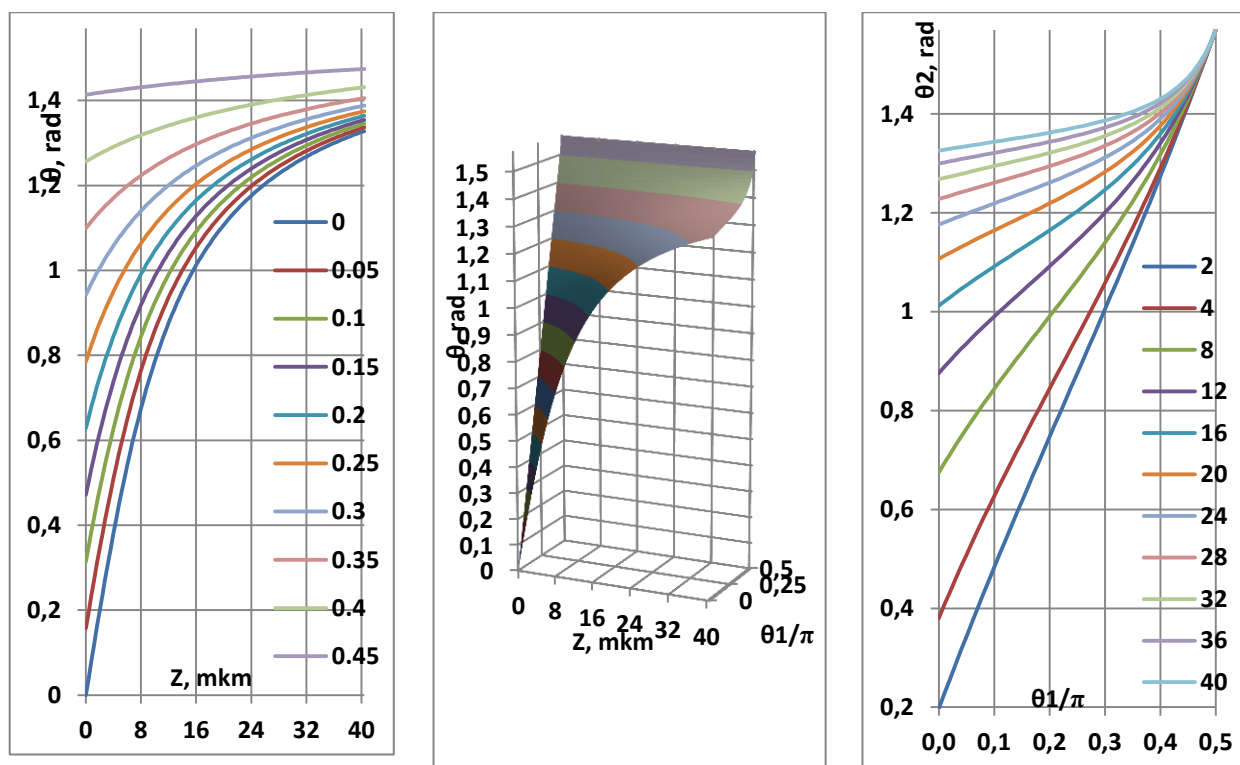
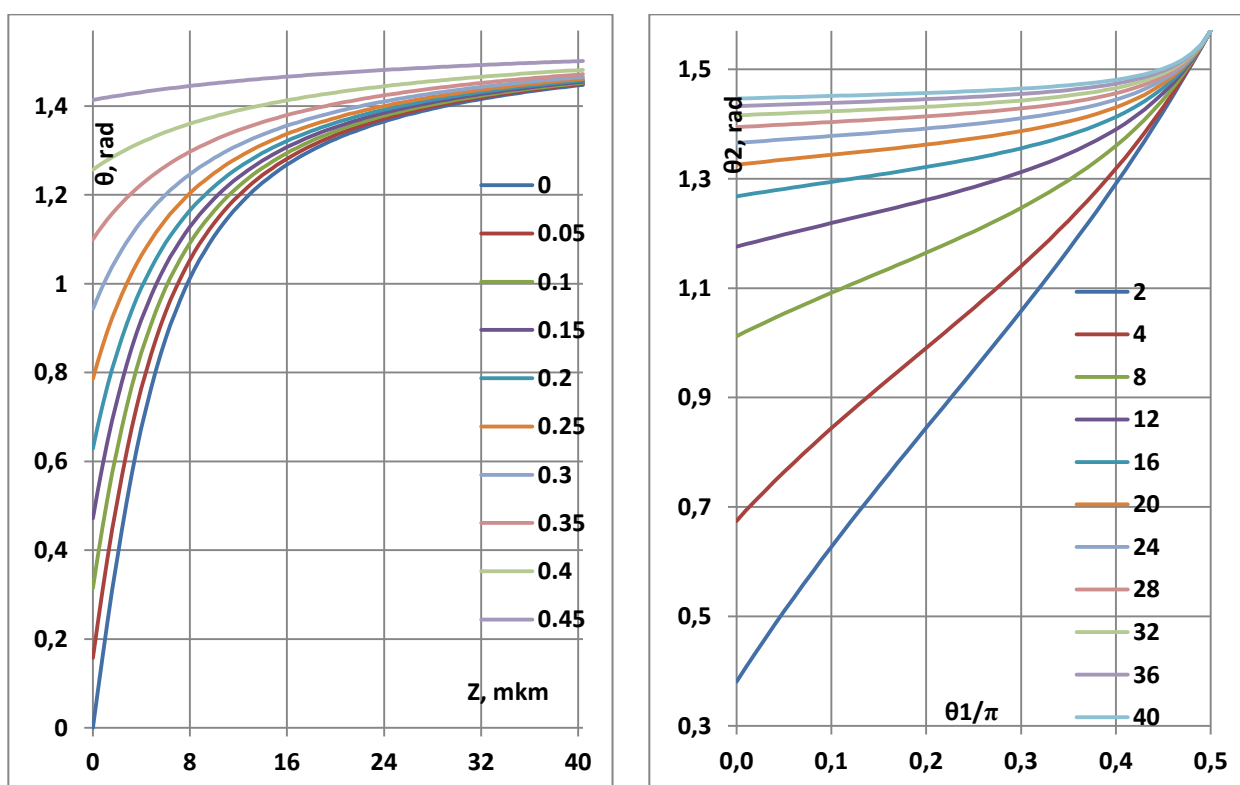
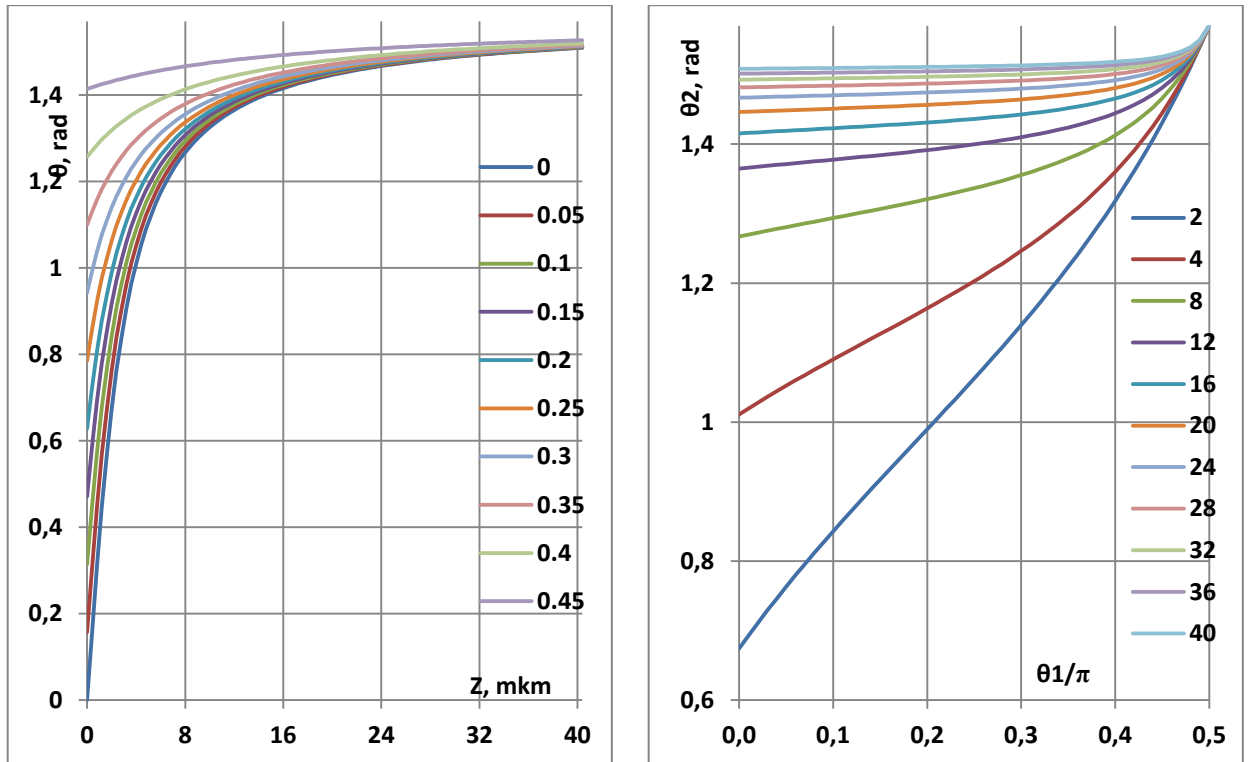
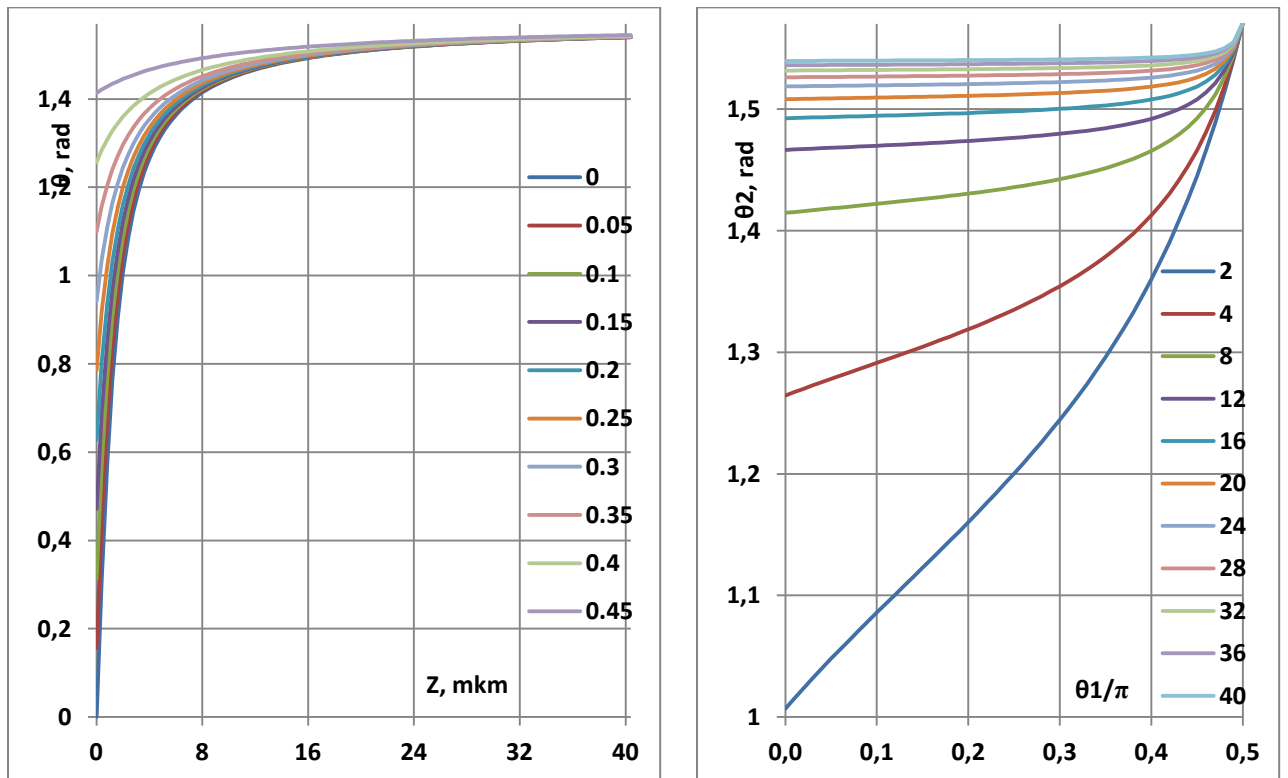


Рис.3.3.2.а. Параметр $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

Рис.3.3.2.б. Параметр $M=0,1 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.Рис.3.3.2.в. Параметр $M=0,2 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

Рис.3.3.2.г. Параметр $M=0,4 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.Рис.3.3.2.д. Параметр $M=0,8 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

Полученные результаты показывают, что по мере роста приложенного поля (вследствие чего растет параметр M) длина когерентности (параметр Де Жена) уменьшается нелинейно. Толщина ячейки ЖК, в которой будет

достаточно толстый полностью ориентированный под влиянием поля (планарно или гомеотропно, в зависимости от знака диэлектрической анизотропии) слой ЖК, выбирается заранее в зависимости от предполагаемой толщины переходного слоя. Полученные результаты позволяют заранее определять необходимую толщину ЖК ячеек, так как односторонняя ячейка аналогична полуячейке (от одной из поверхностей и до условной середины ячейки). Полученные результаты показывают зависимость толщины переходного слоя (длины когерентности) от свойств (как вязкоупругих, так и диэлектрических) вещества ЖК слоя в ячейке. Это позволяет выбирать толщину ячейки в зависимости от свойств ЖК и предполагаемого диапазона приложенного к ячейке поля.

Изложенный материал показывает, что можно достаточно точно регулировать толщину переходного слоя (длину когерентности) ЖК варьируя для этого комплексно параметры ячейки (угол приповерхностного наклона, связанный с поверхностной обработкой, и толщину) и прилагаемое поле с учетом упругих и диэлектрических свойств ЖК.

Таким образом, можно контролируемо создавать ячейку ЖК с заданными заранее ориентационными параметрами. Если требуется ряд заранее заданных значений разности фаз, например, при управлении элементом ЖК дисплея, то можно последовательно изменять поле, приложенное к ячейке, и проводить ее распределение директора через требуемые конфигурации.

Задав с помощью ориентирующего покрытия угол наклона, можно тем самым задать и последовательность конфигураций по мере роста поля.

Важное значение при разработке, совершенствовании и исследовании характеристик приборов обработки и отображения информации имеет возможность управлять параметрами этих слоев как с помощью ориентирующих покрытий, задающих определенный заранее угол приповерхностного наклона директора ЖК, так и с помощью поля, приложенного к ячейке.

§4. Ячейка, заполненная ЖК с отрицательной диэлектрической анизотропией. Оптические свойства слоя ЖК

Результаты расчета разности фаз Φ для гибридных односторонних ячеек с отрицательной диэлектрической анизотропией приведены на рис.3.3.3. Показаны случаи падения света, соответствующие положительному углу падения луча света. Параметр $M=0,05 \cdot 10^6$. Показатели преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.7$. $\Delta\epsilon < 0$.

На рис.3.3.3 слева показана зависимость $\Phi(z, \theta)$, справа показана зависимость $\Phi(z)$ при различных фиксированных значениях угла преднаклона θ на стороне, покрытой ориентантом. Внешняя среда воздух ($n=1$). Наблюдаемое с ростом угла падения луча света изменение области в координатах (z, θ) , в которой находится минимальное значение Φ , обусловлено причинами, показанными выше в данной работе.

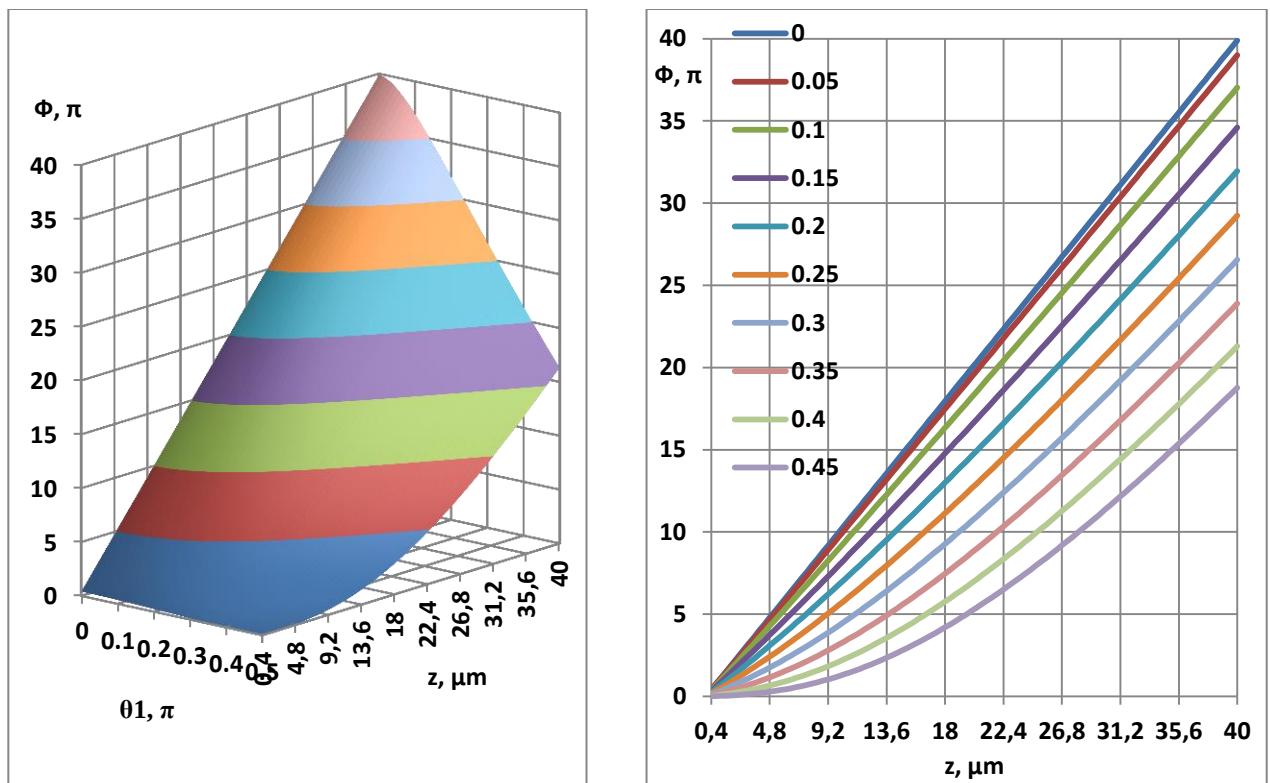


Рис.3.3.3.а. Угол падения света $\beta=0^\circ$, нормальное падение. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

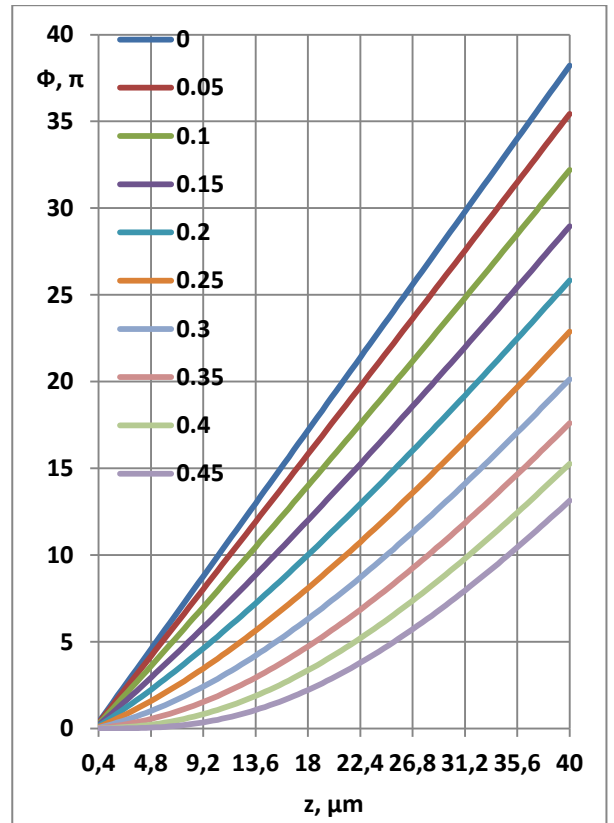
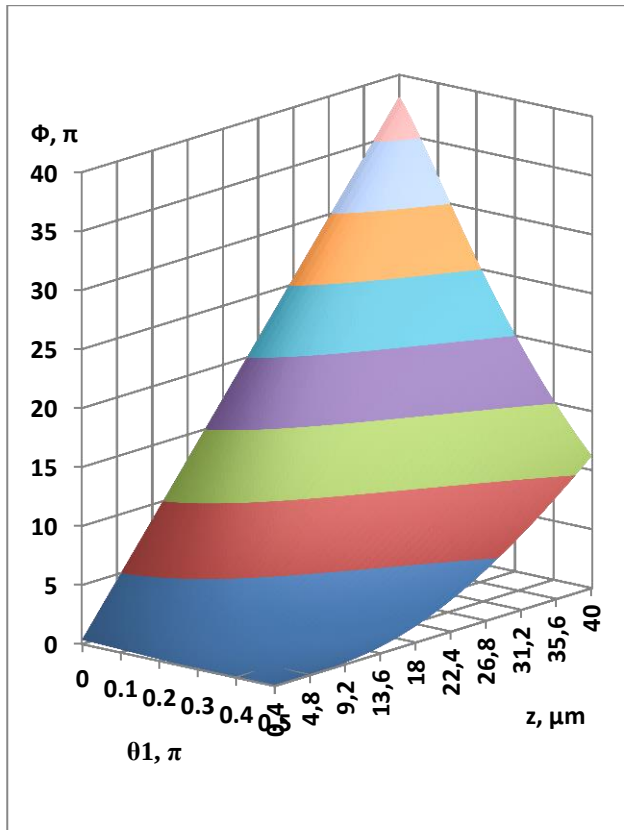


Рис.3.3.3.б. Угол падения света (положительный) $\beta=15^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

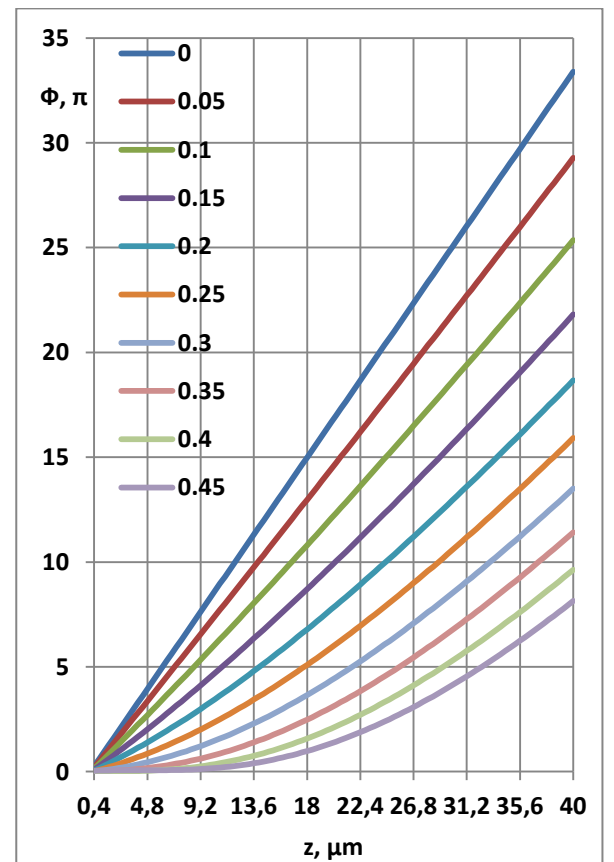
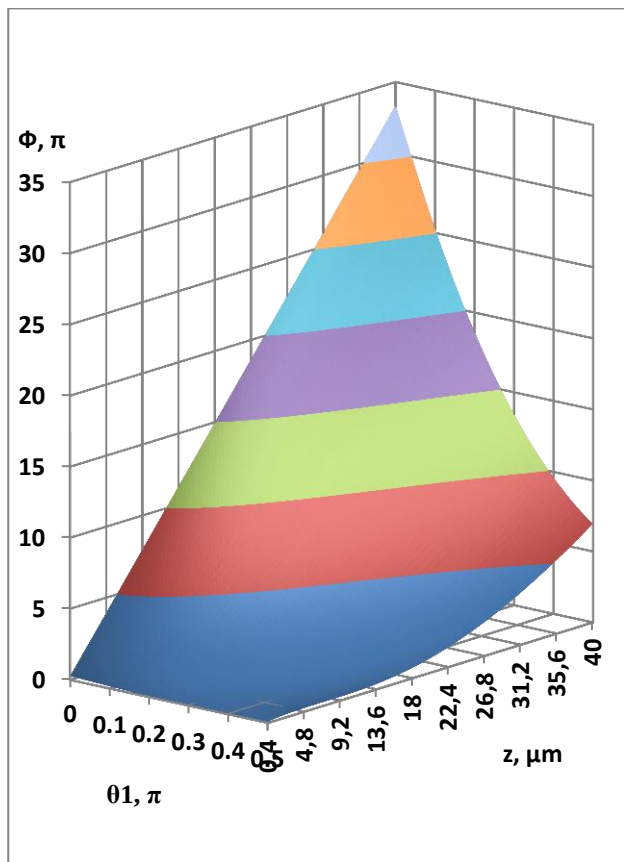


Рис.3.3.3.в. Угол падения света (положительный) $\beta=30^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

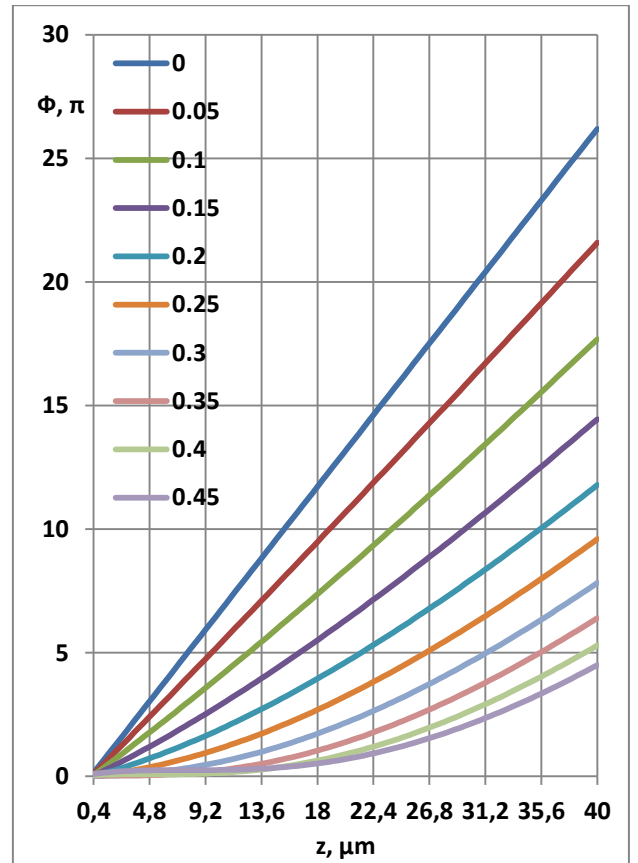
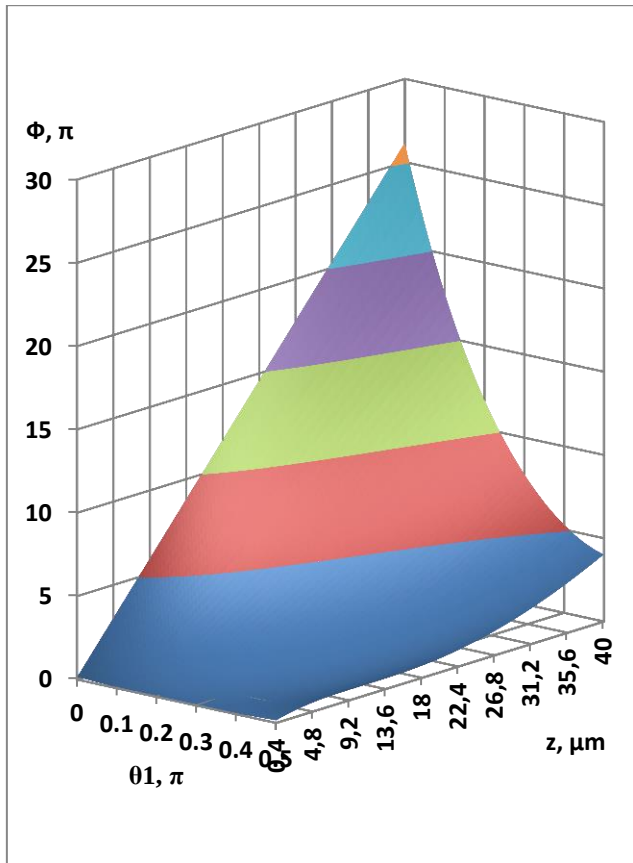


Рис.3.3.3.г. Угол падения света (положительный) $\beta=45^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

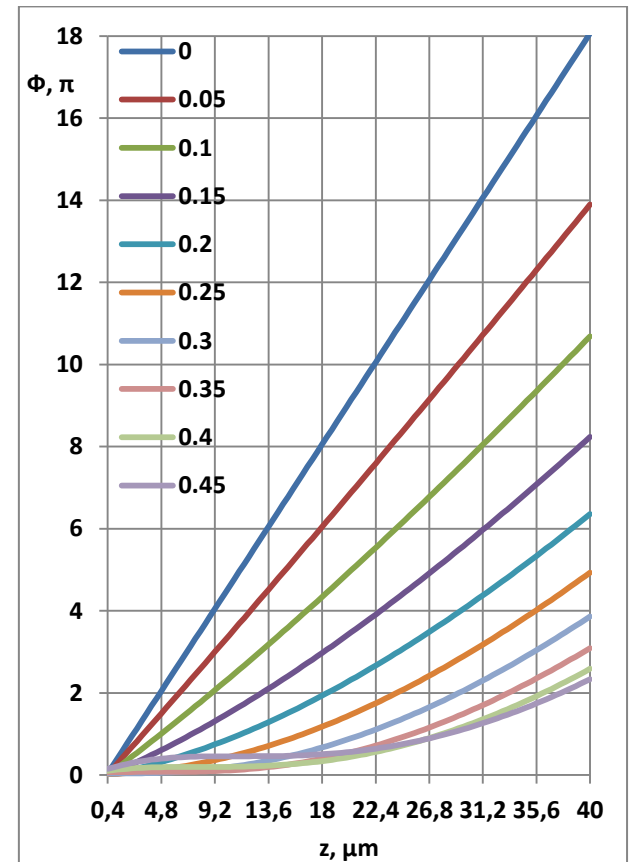
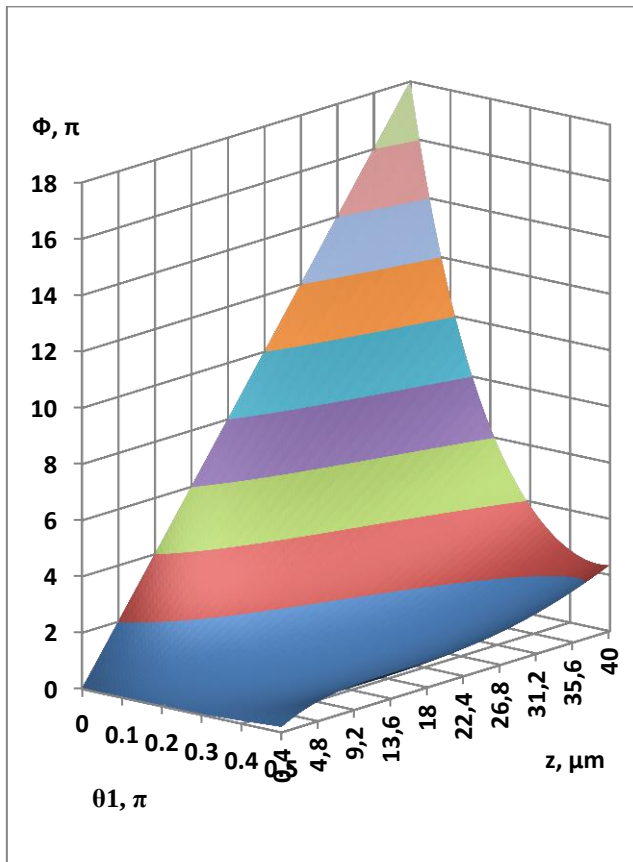


Рис.3.3.3.д. Угол падения света (положительный) $\beta=60^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

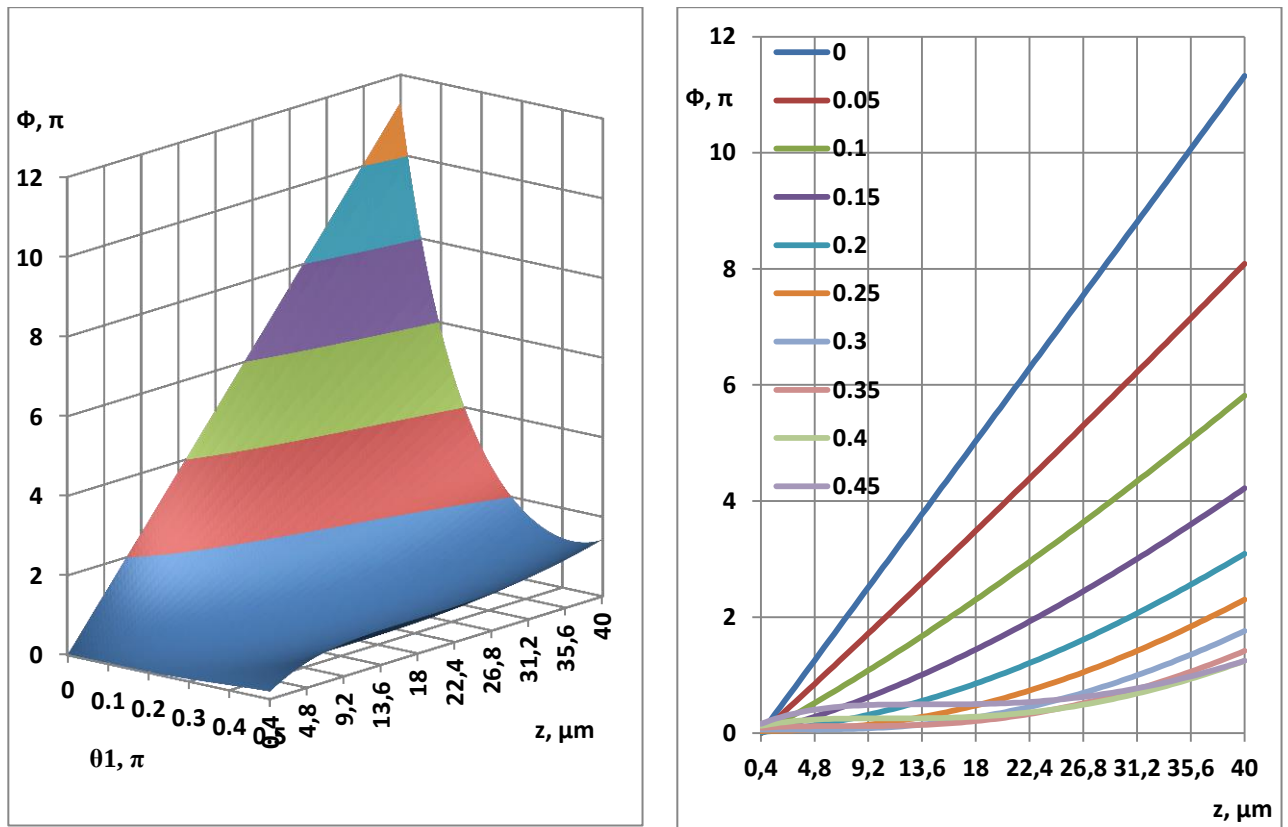


Рис.3.3.3.е. Угол падения света (положительный) $\beta=75^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

Из рис.3.3.3 следует отметить, что диапазон величин Φ уменьшается по мере роста угла падения.

Результаты расчета параметра Φ (нормированная разность фаз) для гибридных односторонних ячеек с отрицательной диэлектрической анизотропией приведены на рис.3.3.4. Параметр $M=0,05 \cdot 10^6$. Внешняя среда воздух ($n=1$). На рис.3.3.4 показаны случаи падения света, соответствующие отрицательному углу падения луча света. Показатели преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.7$. $\Delta\epsilon < 0$. На рис.3.3.4 показана: слева - зависимость $\Phi(z, \theta)$; справа - зависимость $\Phi(z)$ при различных фиксированных значениях угла наклона θ на стороне, покрытой ориентантом. Максимум Φ соответствует условиям, наиболее близким к планарной ячейке ЖК при нормальном падении света.

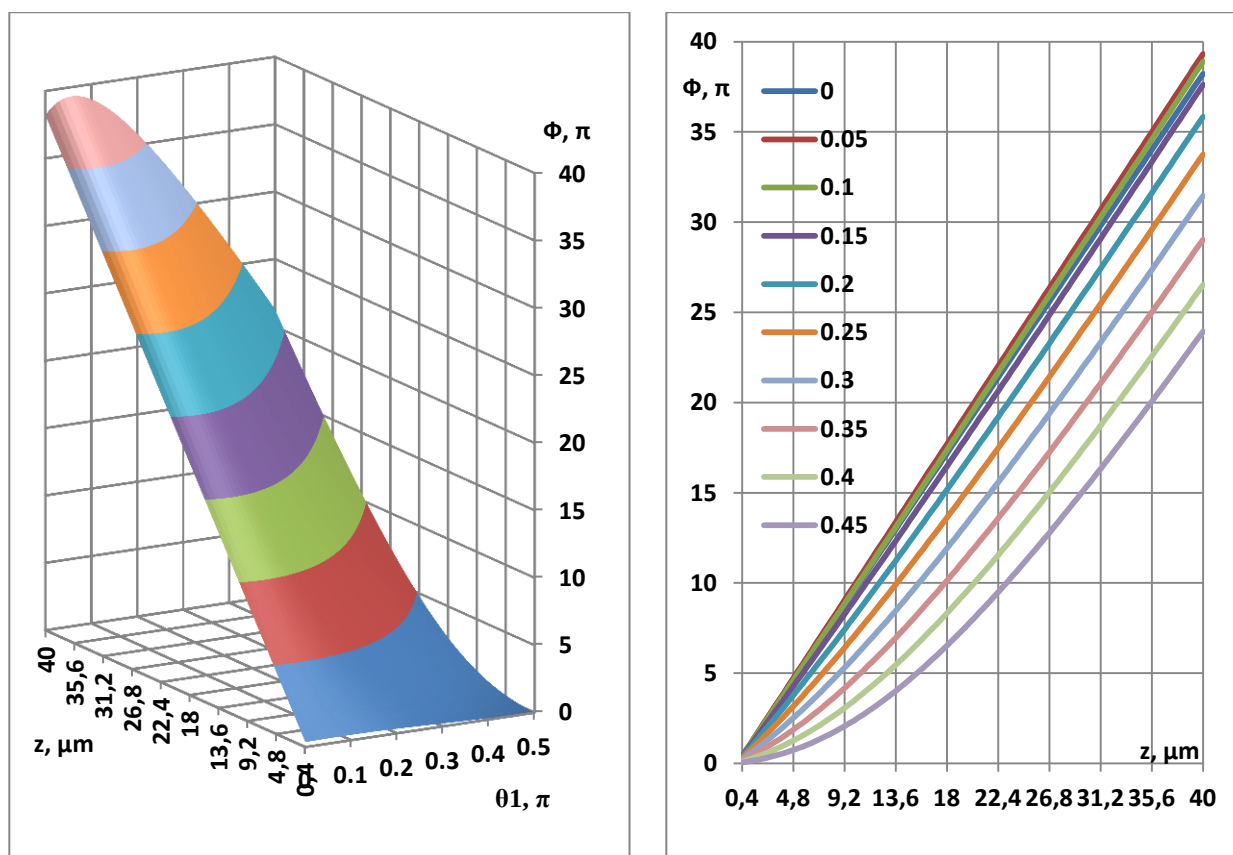


Рис.3.3.4а. Угол падения света (отрицательный) $\beta=15^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

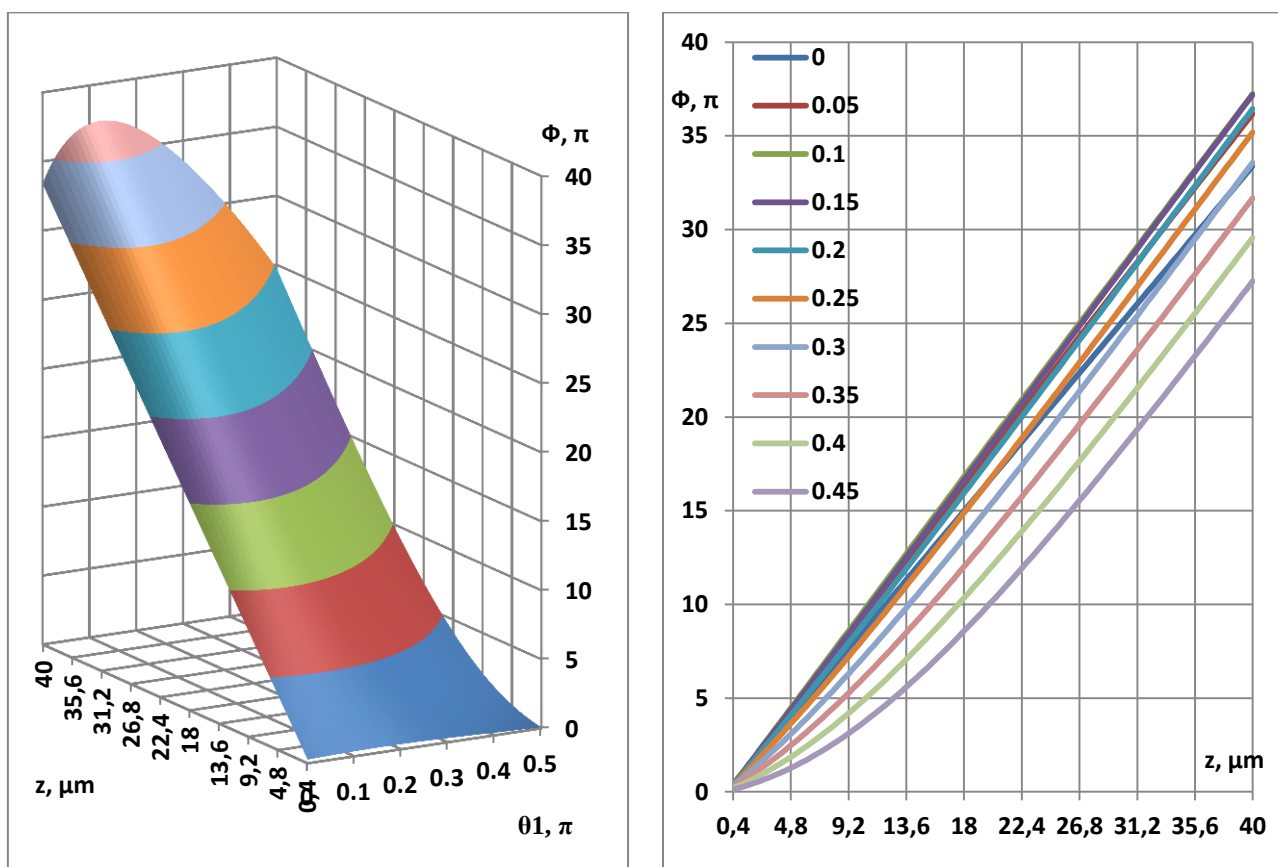


Рис.3.3.4б. Угол падения света (отрицательный) $\beta=30^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

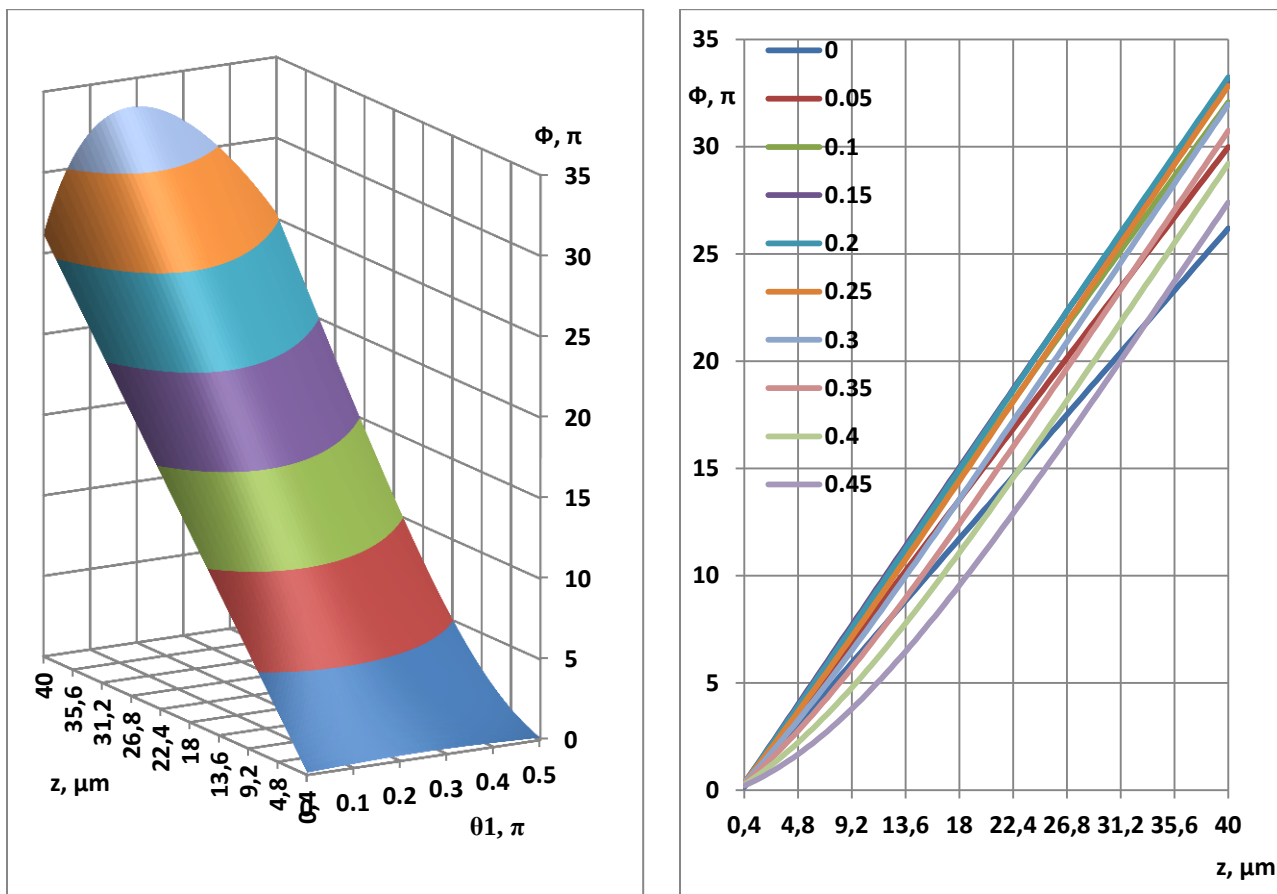


Рис.3.3.4.в. Угол падения света (отрицательный) $\beta=45^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

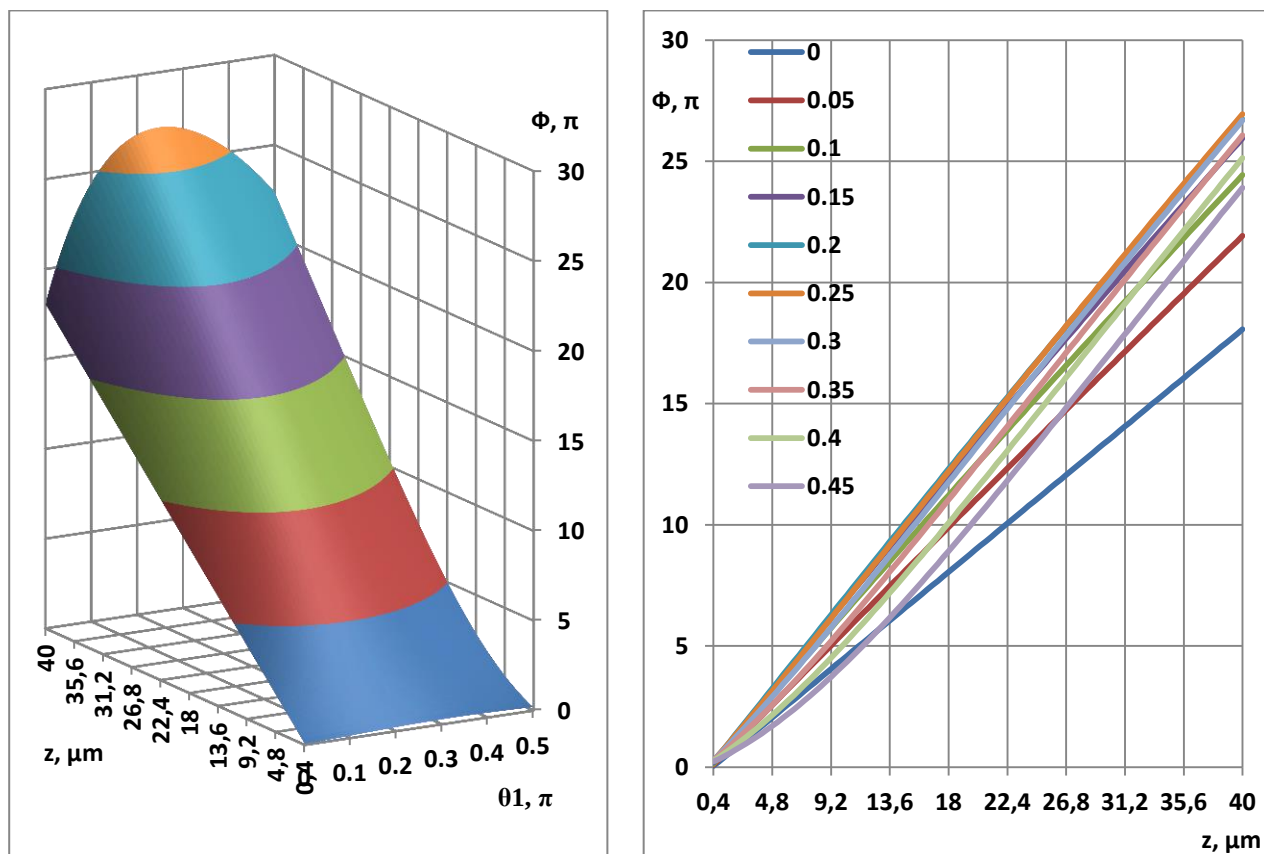


Рис.3.3.4.г. Угол падения света (отрицательный) $\beta=60^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

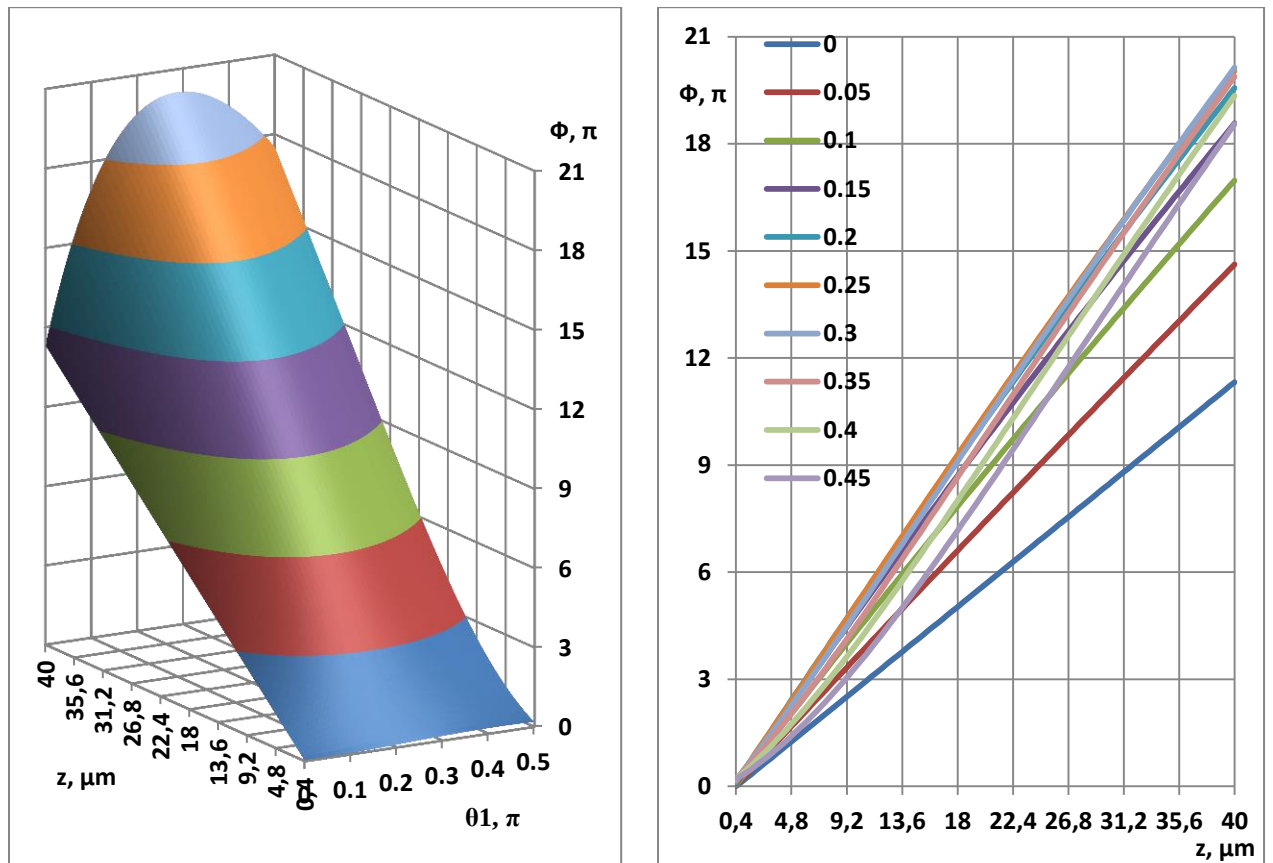


Рис.3.3.4.д. Угол падения света (отрицательный) $\beta=75^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon < 0$.

Проанализируем приведенные на рис.3.3.3, 3.3.4 зависимости $\Phi(\theta_0, z)$. Прежде всего, с ростом угла падения β возрастают различия между двумя вариантами падения луча света. При угле, равном нулю (нормальное падение света) оба варианта падения света дают одинаковую зависимость $\Phi(\theta_0, z)$.

Наглядно показано, что в ЖК ячейке может быть небольшая зависимость Φ от угла падения луча света. Это может быть актуально для разработки элементной базы ЖК дисплеев. Очевидно, что если исследовать диапазон параметров ЖК, приповерхностных углов и напряженности поля, то обязательно можно найти для различных сортов ЖК (сочетания их диэлектрических и упругих параметров) выгодные толщину, угол приповерхностного наклона и напряженность поля.

Как известно, конфигурация ЖК регулируется полем с целью обеспечить требуемую величину пропускания света. Модель односторонней ячейки ЖК как раз позволяет рассчитать параметры ячейки (приповерхностный угол, толщину) для заданного сорта ЖК (комплекс диэлектрических и упругих характеристик)

такие, чтобы изменение поля от одного рассчитанного значения до другого обеспечивало бы весь диапазон интенсивности пропускания (от минимума до максимума на кривой интенсивности от поля, то есть на вольт-контрастной характеристике) и при этом ЖК ячейка имела бы во всем этом диапазоне напряженности поля хорошие, почти равномерные значения Φ от угла падения света (угла обзора). Кроме того, если требуется резко переменная кривая зависимости Φ от угла падения света, то эту задачу тоже можно решить с помощью разработанной модели односторонней ячейки ЖК. Необходимо отметить, что можно рассматривать и ячейки с несимметричными (разными по величине) углами на разных сторонах. Это обеспечивает большой выбор возможных решений при проектировании ЖК приборов.

§5. Ячейка, заполненная ЖК с положительной диэлектрической анизотропией. Оптические свойства слоя ЖК

Результаты расчета разности фаз Φ для гибридных односторонних ячеек с положительной диэлектрической анизотропией приведены на рис.3.3.5. Параметр $M=0,05 \cdot 10^6$. На рис.3.3.5 показаны случаи падения света, соответствующие положительному углу падения луча света. Слева показана зависимость $\Phi(z, \theta)$, справа показана зависимость $\Phi(z)$ при различных фиксированных значениях угла преднаклона θ на стороне, покрытой ориентантом. Параметр $M=0,05 \cdot 10^6$. Показатели преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.7$. $\Delta\epsilon>0$. Длина волны 630 нм. Внешняя среда воздух ($n=1$).

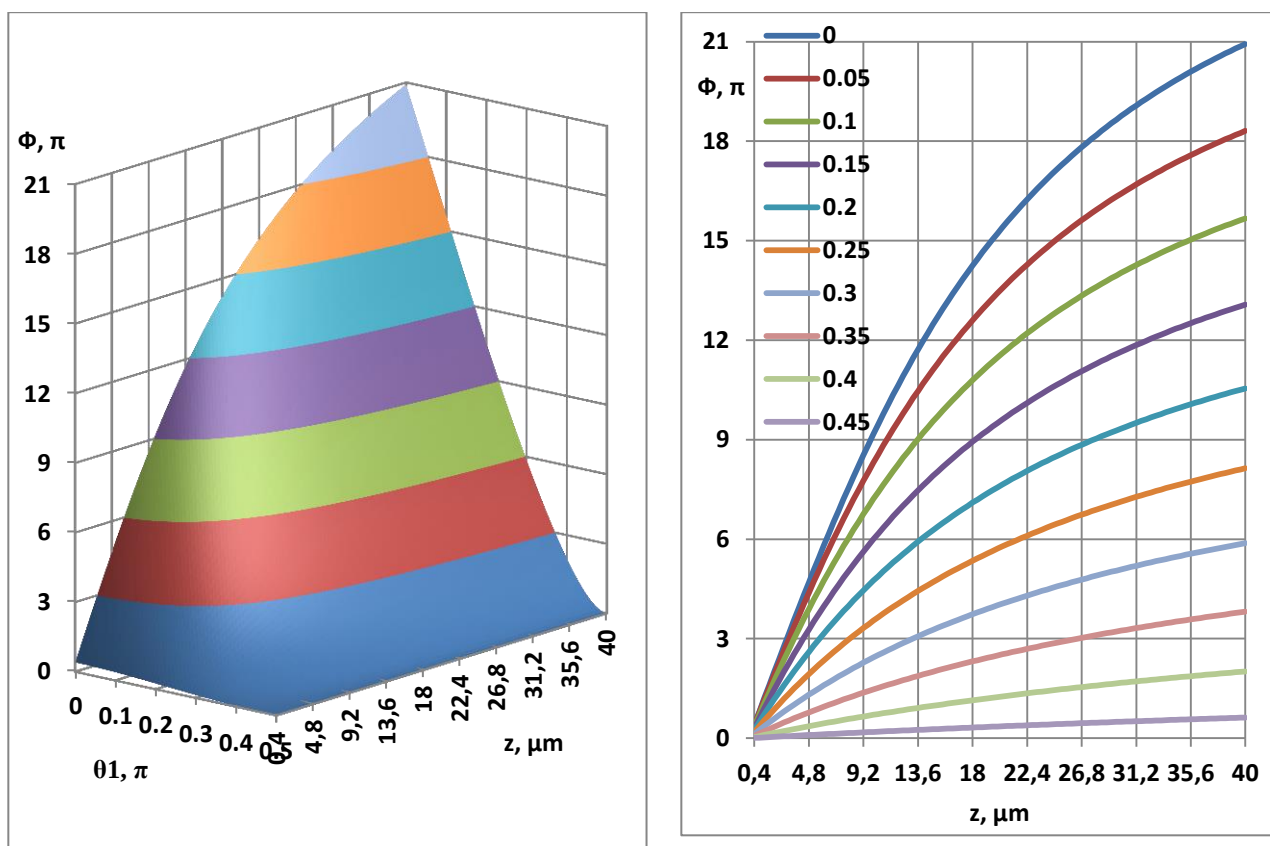


Рис.3.3.5.а. Угол падения света $\beta=0^\circ$, нормальное падение. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

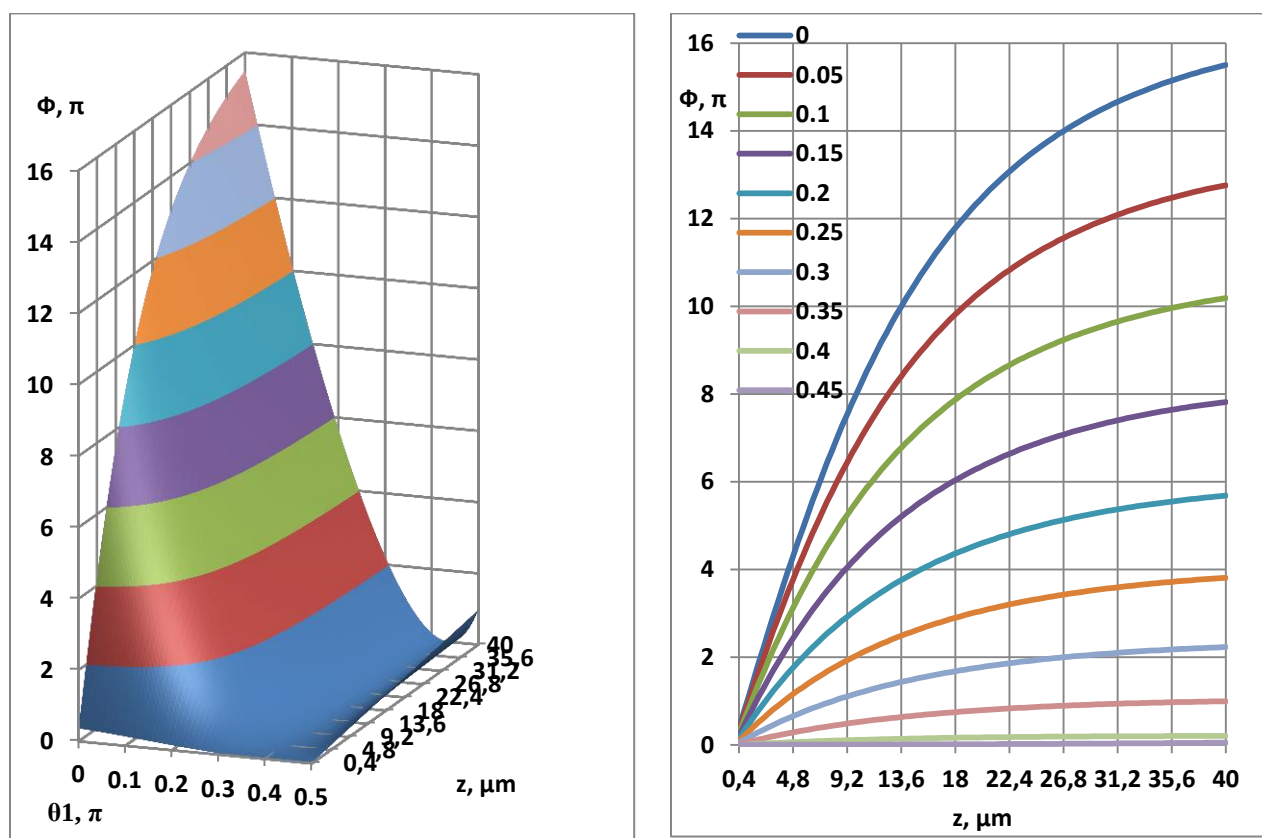


Рис.3.3.5.б. Угол падения света (положительный) $\beta=15^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

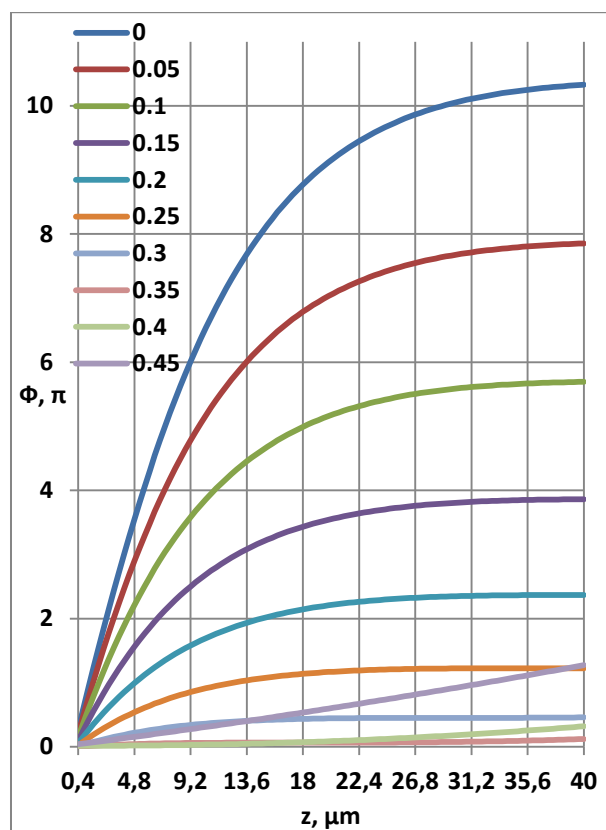
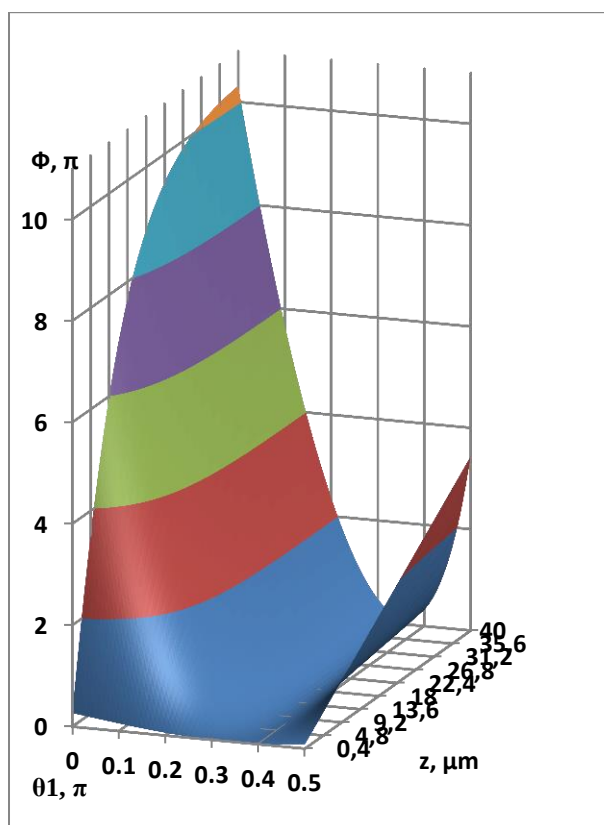


Рис.3.3.5.в. Угол падения света (положительный) $\beta=30^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

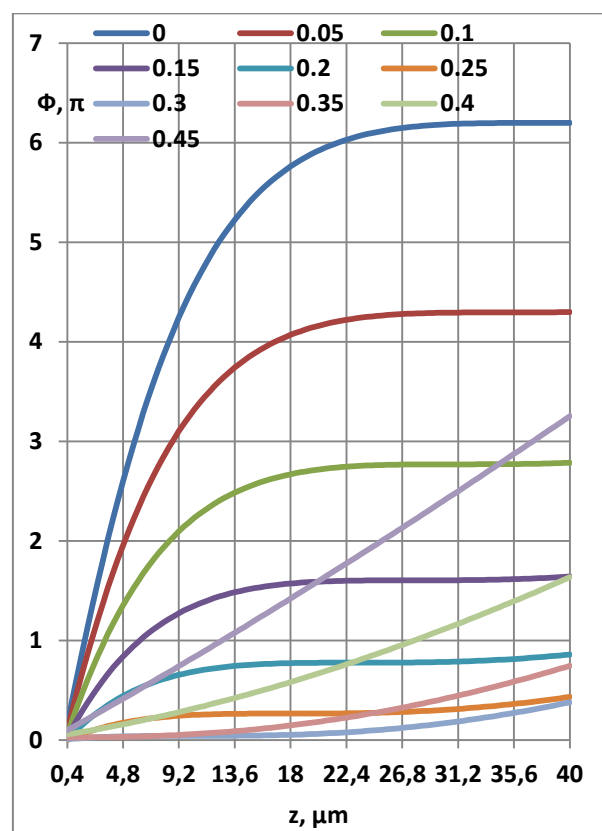
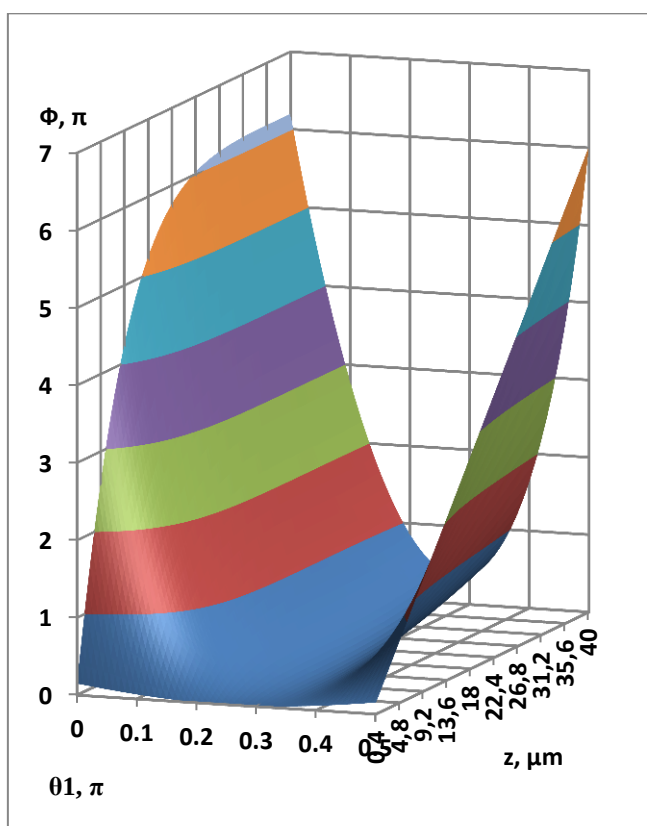


Рис.3.3.5.г. Угол падения света (положительный) $\beta=45^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

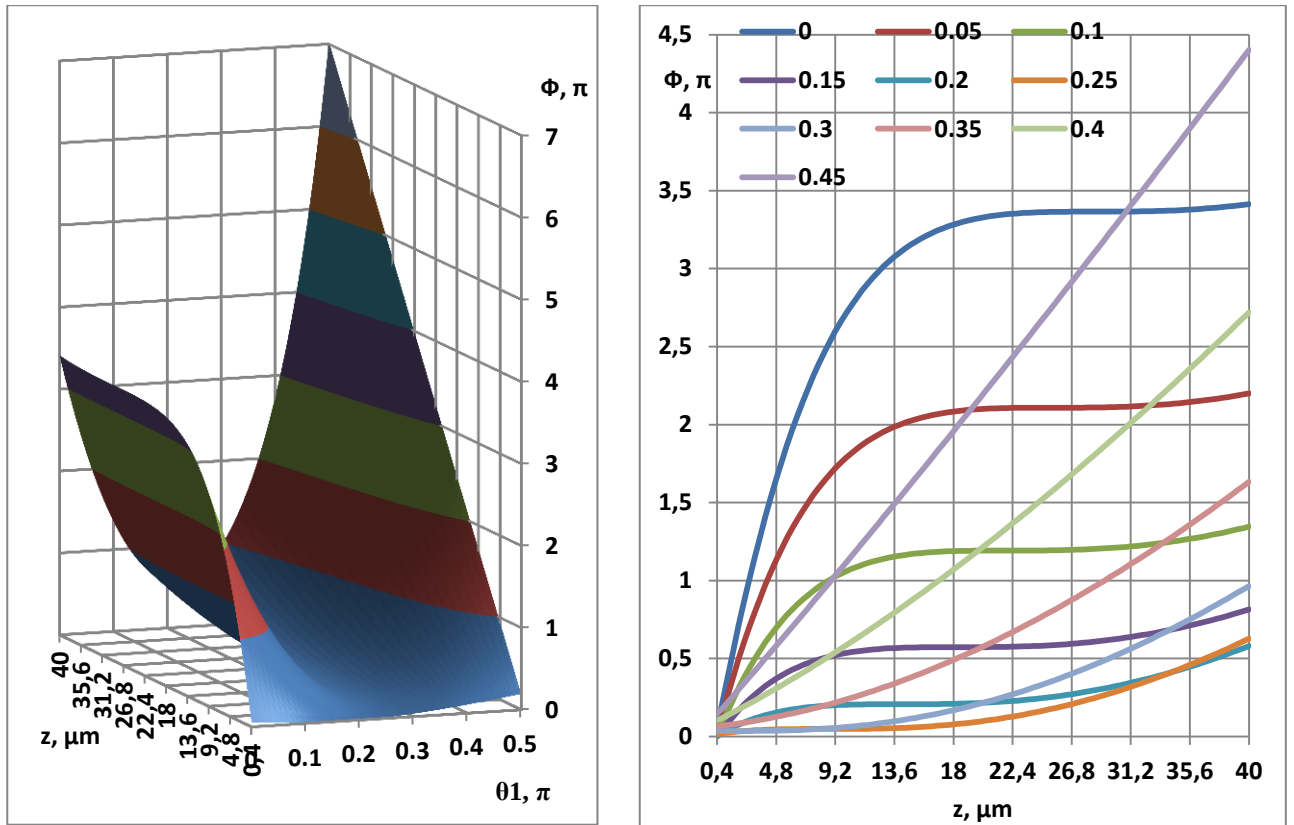


Рис.3.3.5.д. Угол падения света (положительный) $\beta=60^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

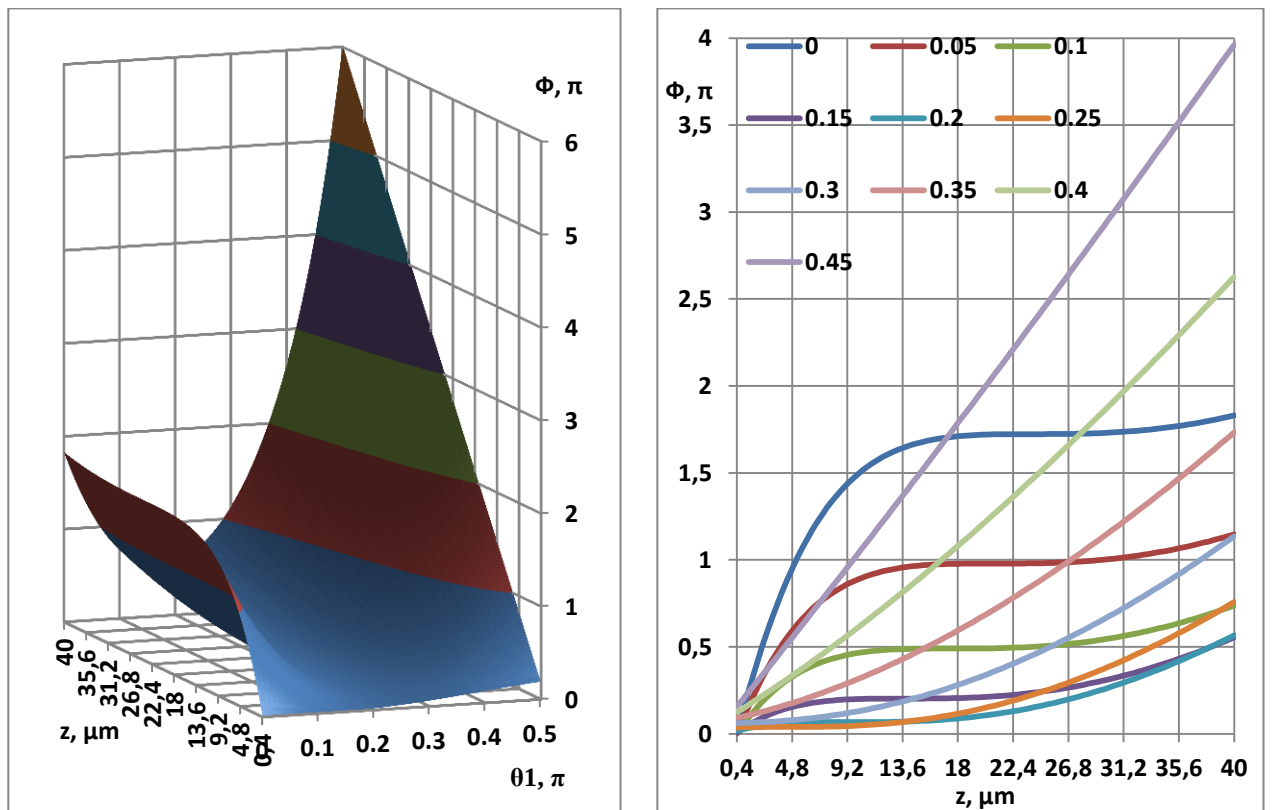


Рис.3.3.5.е. Угол падения света (положительный) $\beta=75^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

Как видно из рис.3.3.5, для односторонне ориентированных ЖК слоев с положительной диэлектрической анизотропией актуальны все те же

рассуждения, что и были выше приведены для случая отрицательной анизотропии.

Результаты расчета разности фаз Φ для односторонних ячеек (односторонне ориентированных слоев ЖК) с положительной диэлектрической анизотропией приведены на рис.3.3.6. Параметр $M=0,05 \cdot 10^6$. Толщина слоя ЖК 20 мкм, как и в остальных случаях. Показаны случаи падения света, соответствующие отрицательному углу падения луча света. Показатели преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.7$. $\Delta\epsilon>0$. Слева показана зависимость $\Phi(z, \theta)$. Справа показана зависимость $\Phi(z)$ при различных фиксированных значениях угла наклона θ на стороне, покрытой ориентантом.

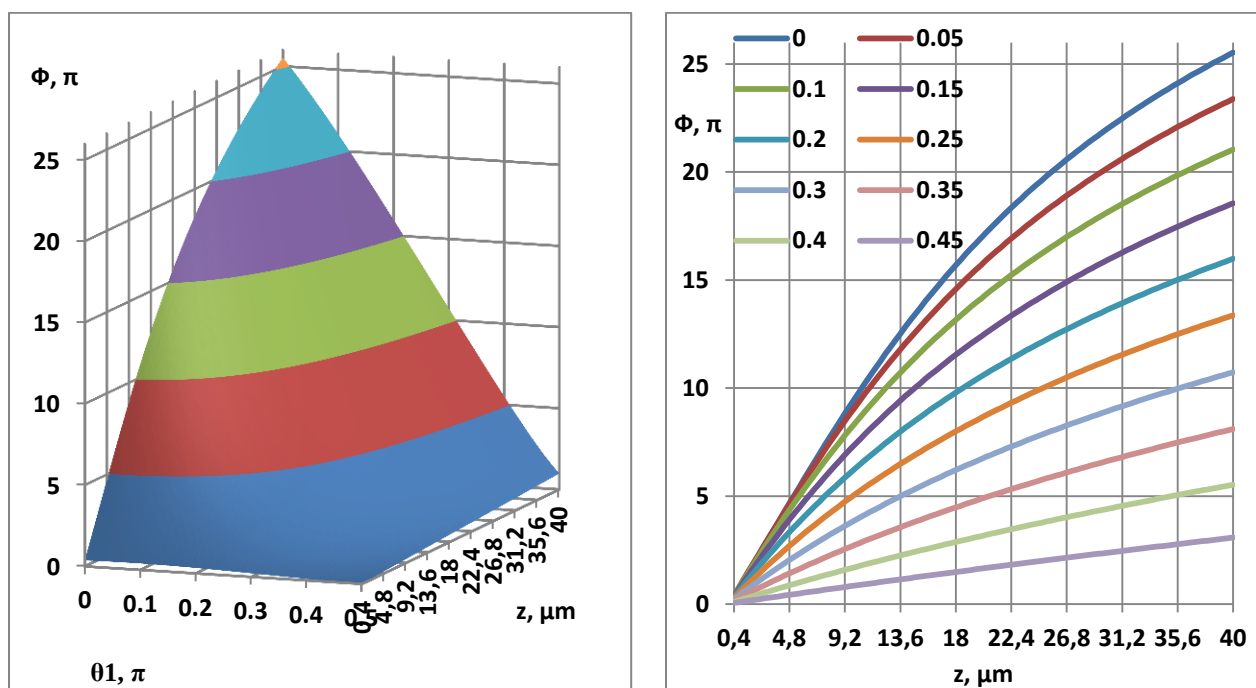


Рис.3.3.6.а. Угол падения света (отрицательный) $\beta=15^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon>0$.

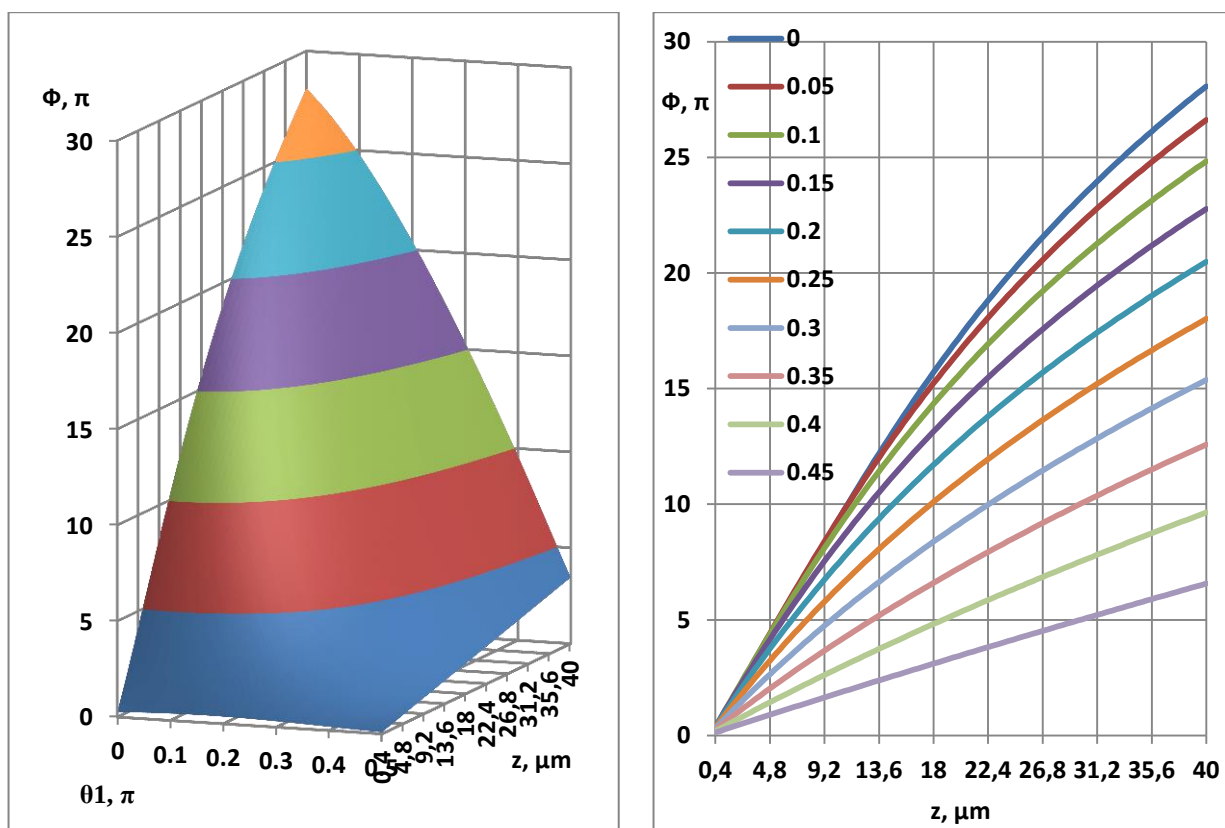


Рис.3.3.6.б. Угол падения света (отрицательный) $\beta=30^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

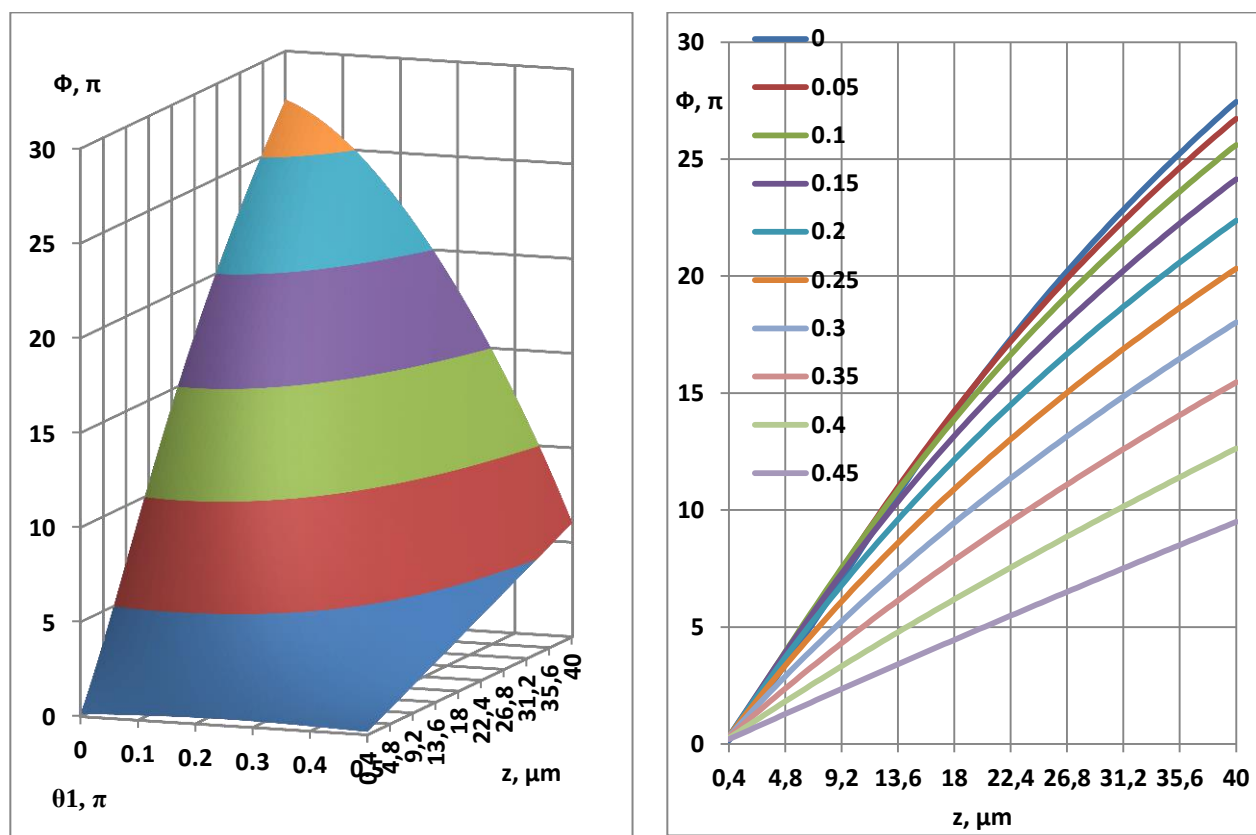


Рис.3.3.6.в. Угол падения света (отрицательный) $\beta=45^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon > 0$.

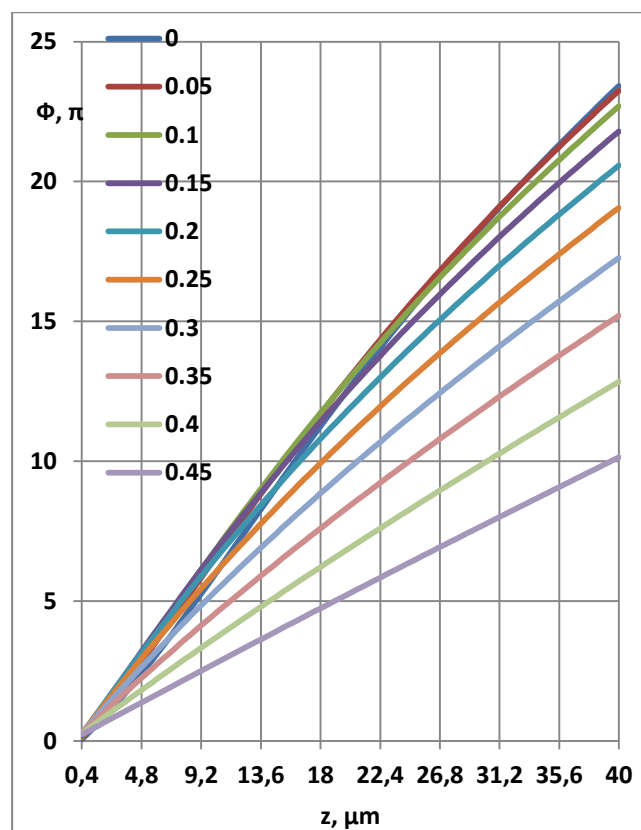
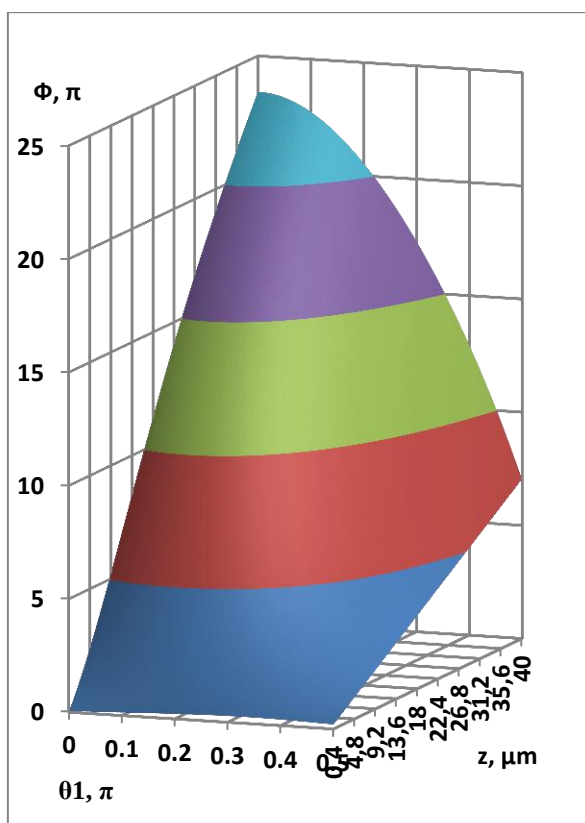


Рис.3.3.6.г. Угол падения света (отрицательный) $\beta=60^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon>0$.

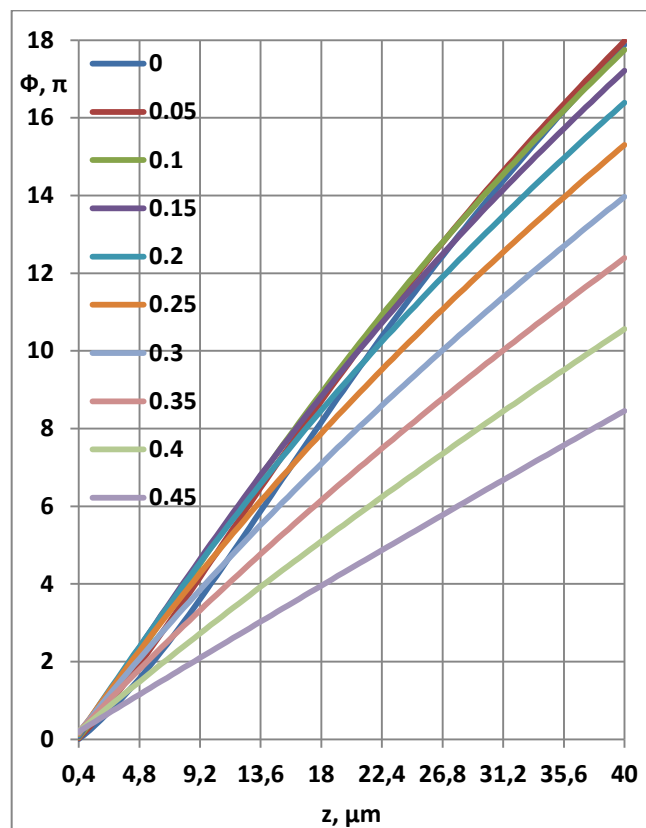
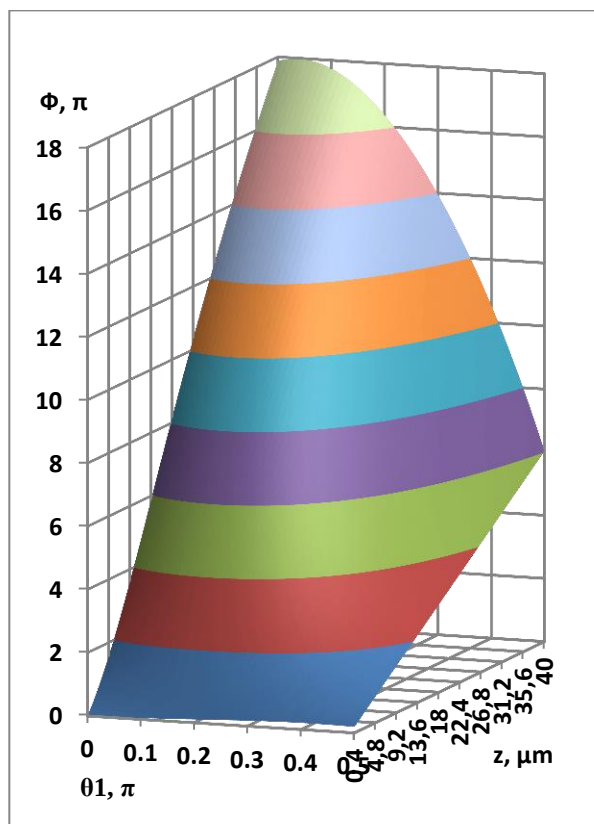


Рис.3.3.6.д. Угол падения света (отрицательный) $\beta=75^\circ$. $M=0,05 \cdot 10^6$. $\Delta\epsilon>0$.

Проанализируем приведенные на рис.3.3.5, рис.3.3.6 зависимости $\Phi(\theta_0, z)$. Прежде всего, с ростом угла падения β возрастают различия между двумя вариантами падения луча света. При косом падении ($\beta=45^\circ$) зависимость $\Phi(\theta_0, z)$ для обоих случаев наиболее различается между собой. А затем по мере роста угла падения различия уменьшаются. При угле, равном нулю (нормальное падение света) оба варианта падения света дают одинаковую зависимость $\Phi(\theta_0, z)$. И, чисто теоретически, при прямом угле (падение света вскользь вдоль поверхности ячейки) оба варианта падения света тоже дают одинаковую зависимость $\Phi(\theta_0, z)$.

Часть 4. Объемные ЖК структуры

§1. Осесимметричные оптически анизотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

1.1. Зависимость двулучепреломления от ориентации директора нематического ЖК

Исследование ориентационного порядка в мелкодисперсных ЖК структурах весьма актуально [9, 141-145]. Нормаль к поверхности ячейки совпадала с падающим лучом лазера (поляризованный луч света, падающий по нормали к слою ЖК). Ячейка ЖК помещалась между скрещенными поляризатором и анализатором. При этом интенсивность света, регистрируемая за анализатором определяется выражением (1.4). Была поставлена задача для случая цилиндрических оптически анизотропных нематических ЖК структур в оптически изотропном объеме исследовать зависимость двулучепреломления от ориентации директора нематического ЖК, при нормальном падении луча неполяризованного света (при наблюдении в микроскоп с лампочкой неполяризованной подсветки и светофильтром). Для неполяризованного нормально падающего луча света, интенсивность пропускания будет определяться выражением (3.4.1.1):

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right) \quad (3.4.1.1)$$

Поскольку разность фаз зависит от угла наклона директора ЖК, то для нормального падения луча неполяризованного света получим зависимость интенсивности пропускания от радиальной координаты для диаметральной плоскости, содержащей падающий луч света. Сравнивая случаи поляризованного и неполяризованного нормально падающего луча света, следует отметить, что они будут различаться лишь тем, что для поляризованного луча абсолютная интенсивность пропускания будет максимальна при угле плоскости поляризации с осью домена 45° и минимальна

при углах 0 и 90° . Зависимость интенсивности пропускания от радиальной координаты для диаметральной плоскости, содержащей падающий луч света, при этом не изменится и будет (в относительном, то есть нормированном на максимум, представлении) одинакова как для поляризованного, так и для не поляризованного луча света.

1.2. Компьютерное моделирование.

Для компьютерной модели цилиндрического оптически анизотропного нематического ЖК домена (образующегося вокруг цилиндрического тела, введенного в изотропную ЖК среду) были приняты (рис.3.4.1.1) следующие условия.

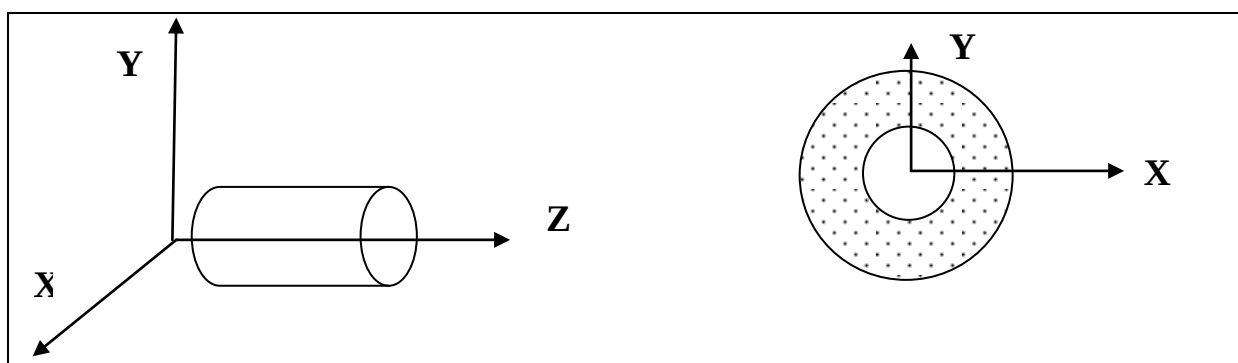


Рис.3.4.1.1. Цилиндрический домен: центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке.

Оси OX и OZ лежат в плоскости ячейки ЖК, ось OY перпендикулярна двум другим осям и плоскости ячейки. Луч света падает нормально (вдоль оси OY). Поверхность тела ориентирует прилегающий слой ЖК гомеотропно (директор ЖК в цилиндрическом домене ориентирован радиально). Рассматриваем два основных случая: размеры центрального тела незначительны и, во втором случае, его размерами (радиусом) не пренебрегаем.

Цилиндрическое тело, лежащее в плоскости ячейки в начале системы координат, полагаем находящимся посередине между поверхностями ячейки. Центральное тело считаем оптически аналогичным изотропной среде (имеющим такой же показатель преломления). Радиус нематического ЖК

домена произвольно приняли за $L/2$ (то есть домен во всю толщину слоя ЖК в ячейке). Длину волны приняли $\lambda=630$ нанометров (красный свет).

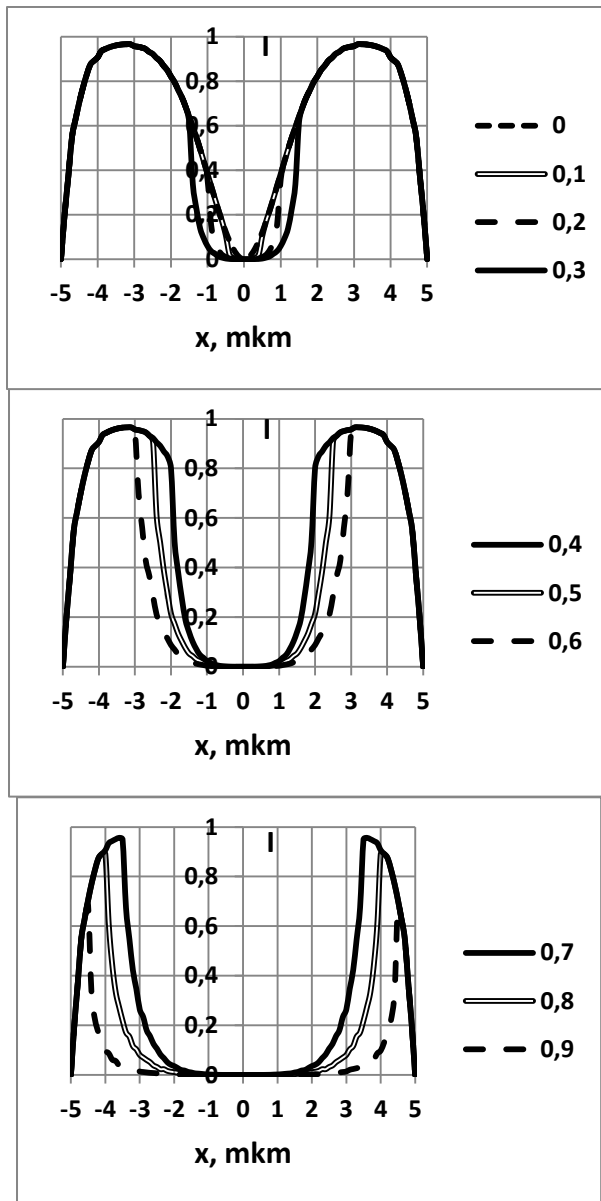


Рис.3.4.1.2. Интенсивность света, прошедшего через цилиндрический домен. $L=10$ микрон, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$.

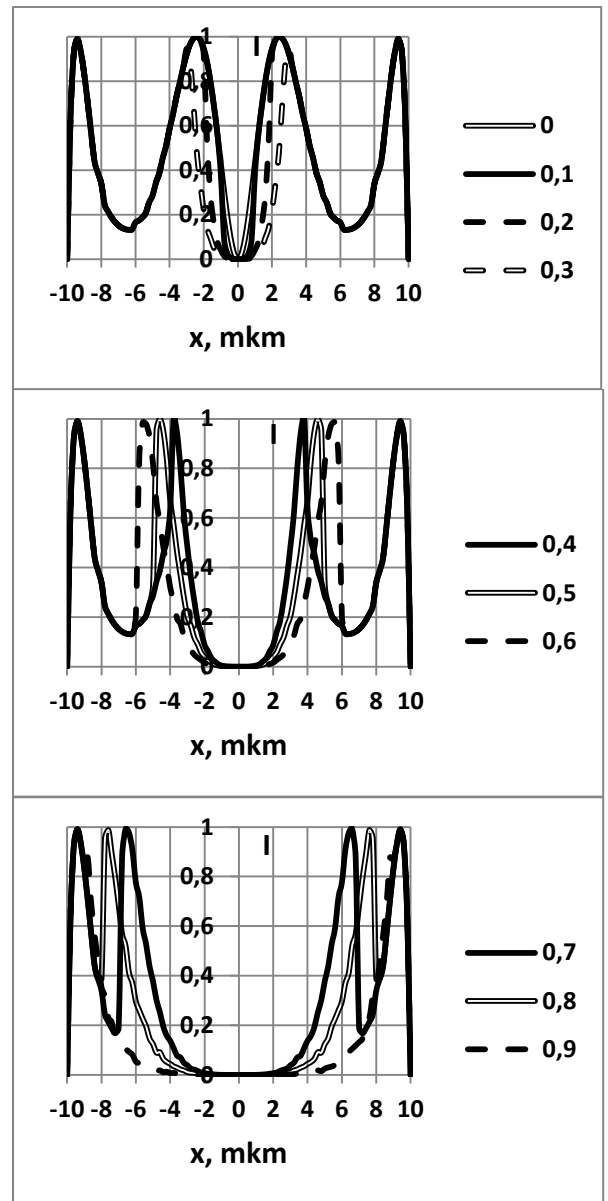


Рис.3.4.1.3. Интенсивность света, прошедшего через цилиндрический домен. $L=20$ микрон, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$.

Предполагаем, что поверхность ячейки не обладает ориентирующими свойствами. В таком случае цилиндрический ЖК домен не искажает свою радиально ориентированную структуру в областях, где он прилегает к поверхности. Изотропную среду и анизотропную среду считаем полностью прозрачной. На рисунках с расчетными данными интенсивности света

приведены данные для света, прошедшего через анизотропный ЖК домен. На остальных участках (на которые падает свет, не прошедший через анизотропный домен) предполагается интенсивность прошедшего света, равная падающему свету. Интенсивность падающего света принята за единицу (то есть приведены нормированные величины интенсивности света).

Как видно из рис.3.4.1.2, рис.3.4.1.3, изменение относительного размера центрального тела и изменение радиуса ЖК домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом.

Изменение радиуса цилиндрического ЖК домена изменяет накапливаемую по ходу луча (лучей с различной поляризацией) света через двулучепреломляющую среду разность фаз Φ . В свою очередь, от наибольшей величины Φ зависит количество экстремумов яркости (чем больше разность фаз Φ по наибольшему пути луча света, тем больше изменение величины Φ по сравнению с краем цилиндрического домена, где Φ незначительное). Изменение относительного радиуса центрального тела влияет на наибольшую величину Φ (накапливаемую по ходу луча уже не по радиусу, а по хорде вблизи границы домена), не изменяя ее на краю цилиндрического домена. В результате изменяется не только количество экстремумов яркости, но и их расположение в средней части наблюдаемой области, причем на периферии картина не меняется, так как там центральное тело не влияет на условия (двулучепреломление) хода луча. Кроме того, в центре (в проекции центрального тела) накопленная разность фаз Φ оказывается меньше максимальной, и отсчет экстремумов идет в двух направлениях, как от Φ максимальной к периферии, так и от Φ максимальной к центру. В результате, при наличии центрального тела, количество экстремумов яркости может оказаться больше, чем без него.

Как правило, достаточно отчетливо видно резкое изменение яркости вблизи границ проекции центрального тела. По этому признаку (симметричная парная область с очень высокой контрастностью) можно оценить радиус центрального тела, хотя и не вполне точно. В принципе, возможно такое

сочетание двулучепреломляющих характеристик среды и геометрических размеров домена и центрального тела, что, как исключение, не будет наблюдаться симметричная парная высококонтрастная область. Поэтому важно не только наличие симметричной парной высококонтрастной области, но и характерное распределение экстремумов, позволяющих, сравнивая с данными моделирования (если известно двулучепреломление Δn), отождествить картину с конкретными геометрическими характеристиками домена и центрального тела. В случае, если размеры помещенных в среду тел, вокруг которых образуются домены цилиндрической формы, известны заранее, и если удалось определить размеры цилиндрического домена, то можно по оптической картине, сравнивая с данными моделирования, определить двулучепреломление Δn .

§2. Цилиндрические приповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

Была поставлена задача исследовать зависимость двулучепреломления от ориентации директора нематического ЖК для случая цилиндрических приповерхностных оптически анизотропных нематических ЖК структур в оптически изотропном объеме, при нормальном падении луча неполяризованного света.

Для компьютерной модели приповерхностного цилиндрического оптически анизотропного нематического ЖК домена (образующегося вокруг цилиндрического тела, введенного в изотропную ЖК среду) были приняты (рис.3.4.2.1) условия, в основном аналогичные изложенным выше для осесимметричного случая. Отличие состоит в том, что цилиндрическое тело, лежащее в плоскости ячейки в начале системы координат, полагаем находящимся на одной из поверхностей ячейки.

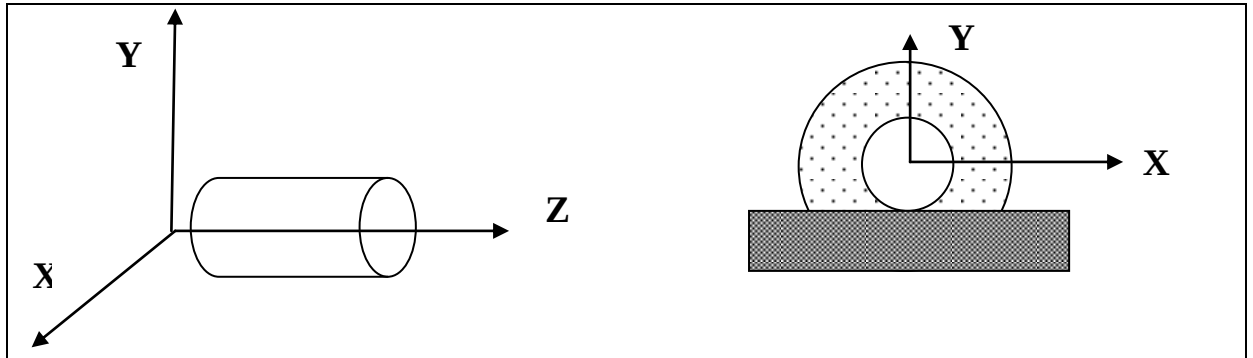


Рис.3.4.2.1. Цилиндрический домен: центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке.

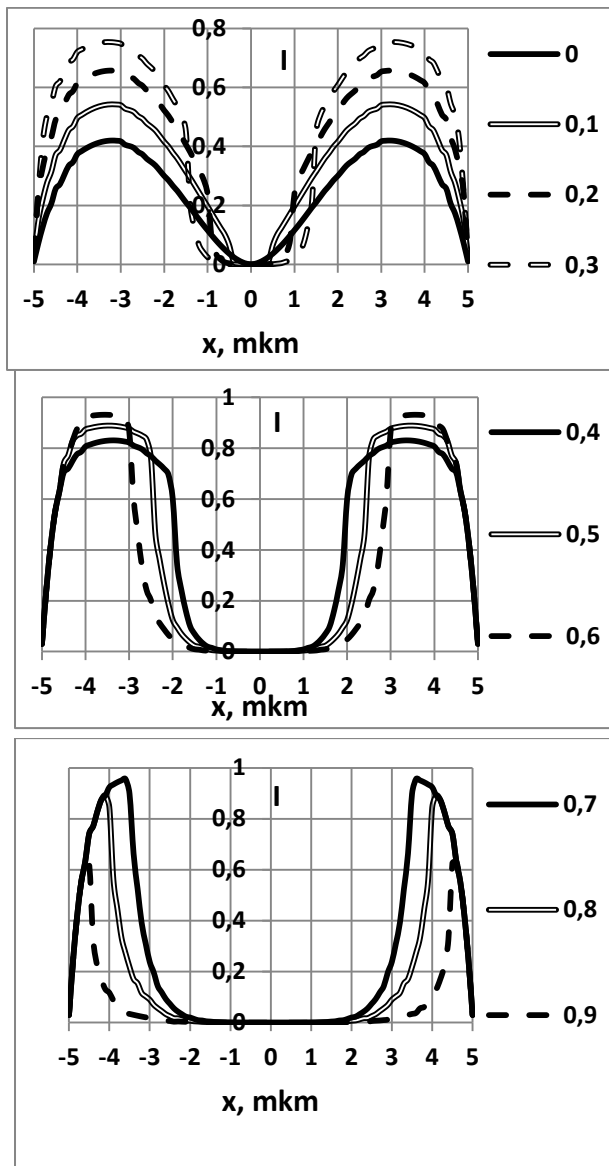


Рис.3.4.2.2. Интенсивность света, прошедшего через приповерхностный цилиндрический домен. $L=10$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.55$.

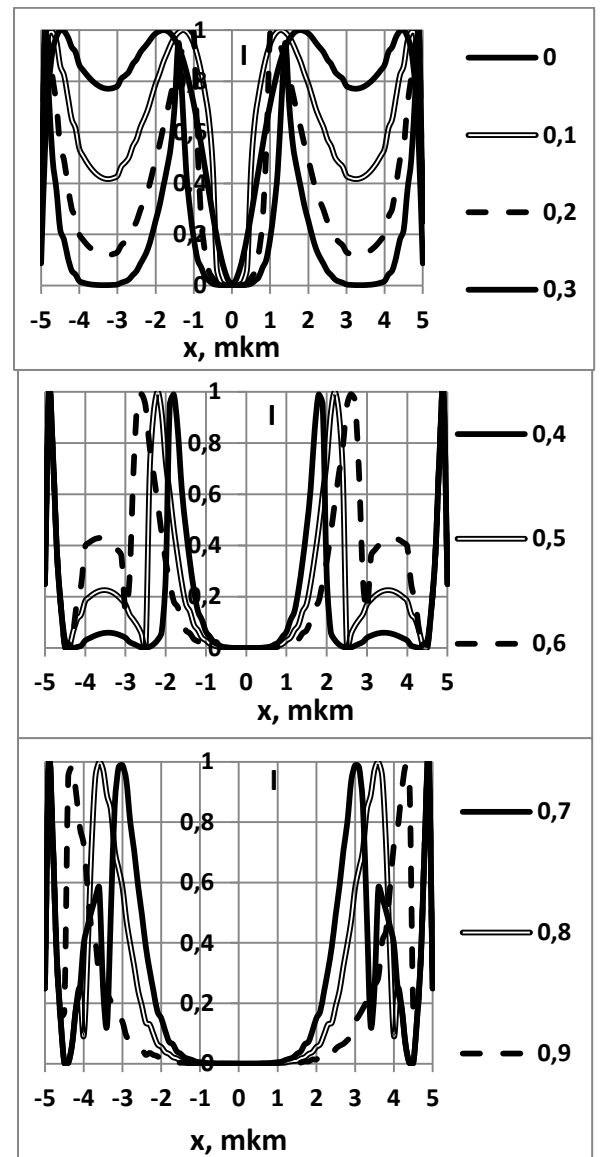


Рис.3.4.2.3. Интенсивность света, прошедшего через приповерхностный цилиндрический домен. $L=10$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$.

В таком случае при малом относительном радиусе центрального тела домен близок к полуцилиндру. При большом относительном радиусе центрального тела домен близок к цилиндрическому.

Как видно из рис.3.4.2.2, рис.3.4.2.3, изменение относительного размера центрального тела и изменение радиуса приповерхностного ЖК домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом. Как и в случае для осесимметричного домена, рассмотренном выше, в случае, если размеры помещенных в среду тел, вокруг которых образуются приповерхностные домены цилиндрической формы, известны заранее, и если удалось определить размеры цилиндрического домена, то можно по оптической картине, сравнивая с данными моделирования, определить двулучепреломление Δn . Как и в случае для осесимметричного домена, рассмотренном выше, если известно двулучепреломление, то по наблюдаемой оптической картине можно определить радиус центрального тела и размер домена.

§3. Цилиндрические межповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

Была поставлена задача исследовать зависимость двулучепреломления от ориентации директора нематического ЖК для случая цилиндрических межповерхностных оптически анизотропных нематических ЖК структур в оптически изотропном объеме, при нормальном падении луча неполяризованного света.

Для компьютерной модели межповерхностного цилиндрического оптически анизотропного нематического ЖК домена (образующегося вокруг цилиндрического тела, введенного в изотропную ЖК среду) были приняты (рис.3.4.3.1) условия, в целом аналогичные выше рассмотренным случаям. Отличие состоит в том, что цилиндрическое тело, лежащее в плоскости ячейки в начале системы координат, полагаем прилегающим к обеим поверхностям ячейки.

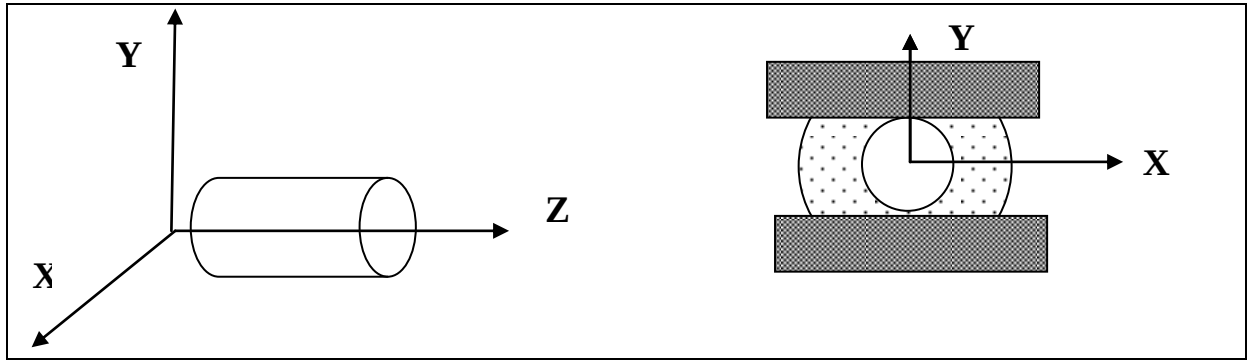


Рис.3.4.3.1. Цилиндрический домен: центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке.

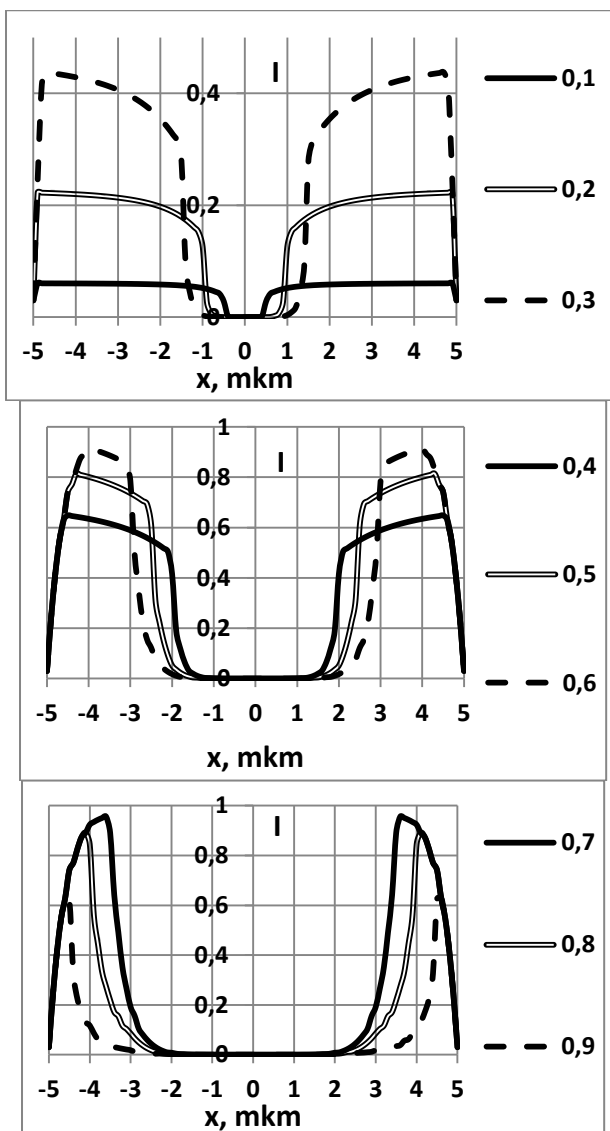


Рис.3.4.3.2. Интенсивность света, прошедшего через межповерхностный цилиндрический домен. $L=10$ микрон, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$.

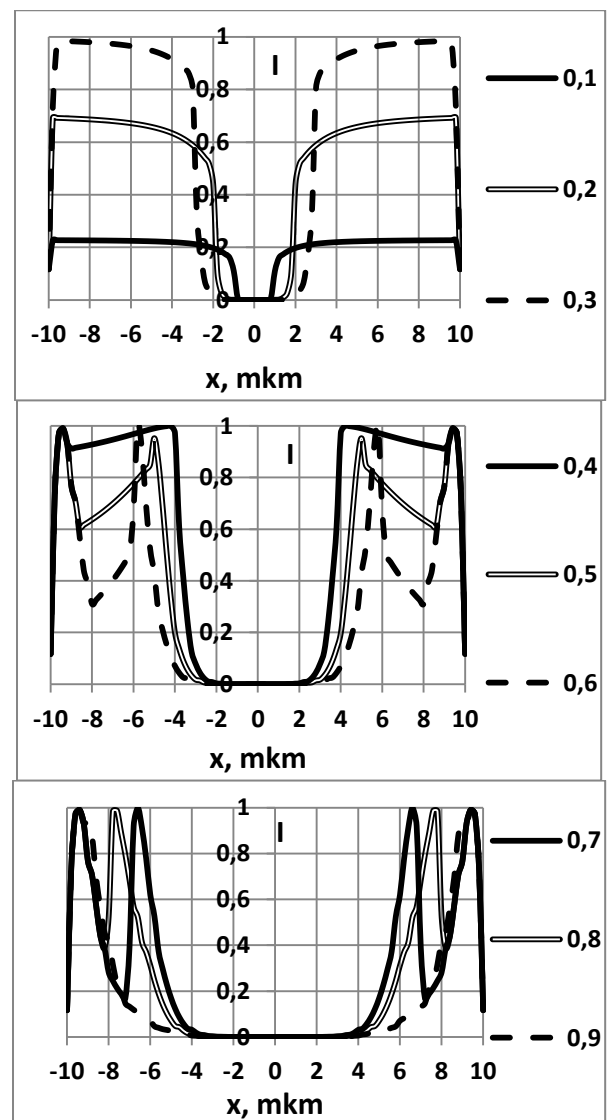


Рис.3.4.3.3. Интенсивность света, прошедшего через межповерхностный цилиндрический домен. $L=20$ микрон, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$.

В таком случае при малом относительном радиусе центрального тела домен близок к плоскому (параллелепипеду). При большом относительном радиусе центрального тела домен близок к цилиндрическому.

Как видно из рис.3.4.3.2, рис.3.4.3.3, оптическая картина позволяет, сравнивая с данными моделирования (если известно двулучепреломление Δn), отождествить картину с конкретными геометрическими и оптическими характеристиками домена, его ЖК среды и центрального тела.

§4. Сферические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

Для компьютерной модели сферического оптически анизотропного нематического ЖК домена (образующегося вокруг сферического тела, введенного в изотропную ЖК среду) были приняты (рис.3.4.4.1) следующие условия.

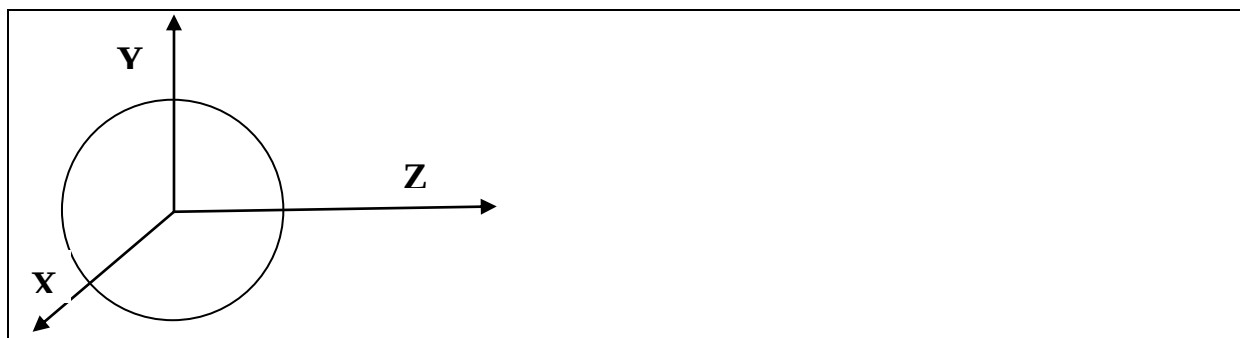


Рис.3.4.4.1. Сферический домен: оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке.

Слой ЖК, прилегающий к поверхности тела, гомеотропно ориентирован (в сферическом домене директор ЖК ориентирован радиально). Принятые условия аналогичны рассмотренным выше случаям. Отличие состоит в том что сферическое тело, лежащее в плоскости ячейки в начале системы координат, полагаем находящимся (центр тела) на расстоянии $L/2$ от каждой из сторон ячейки, то есть центр тела посередине слоя ЖК в ячейке. Предполагаем, что поверхность ячейки не обладает ориентирующими свойствами.

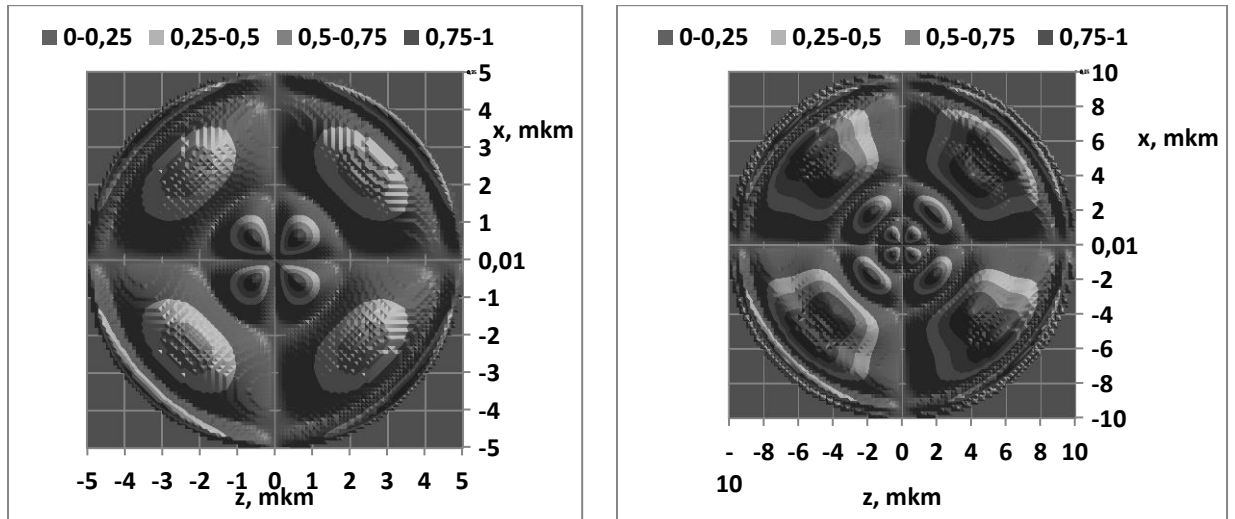


Рис.3.4.4.2. Интенсивность света, прошедшего через сферический домен. Слева $L=10$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$

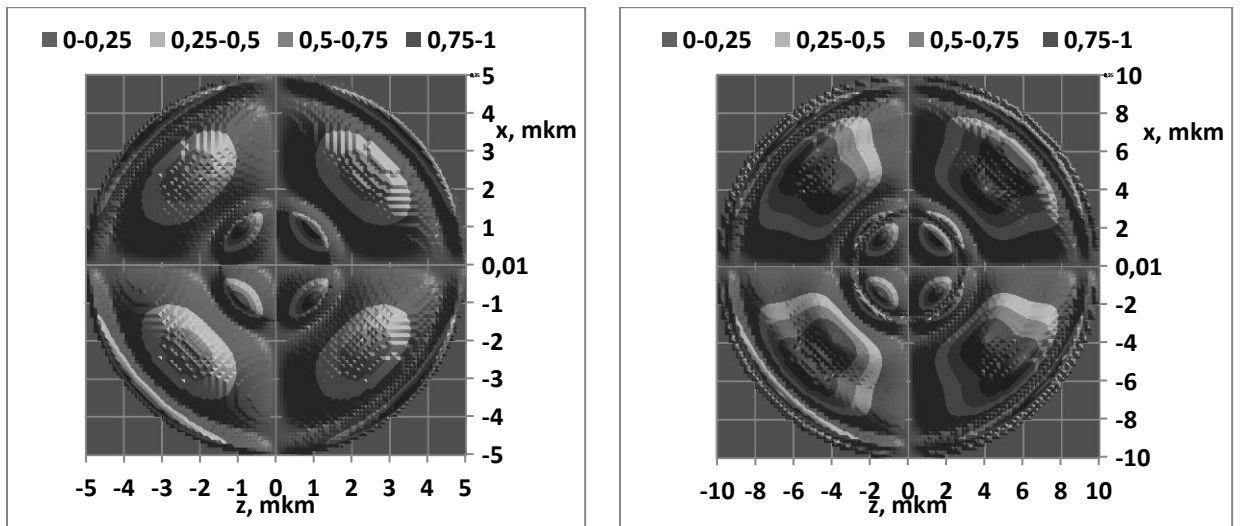


Рис.3.4.4.3. Сферический домен, диаметр центрального тела 0,3.

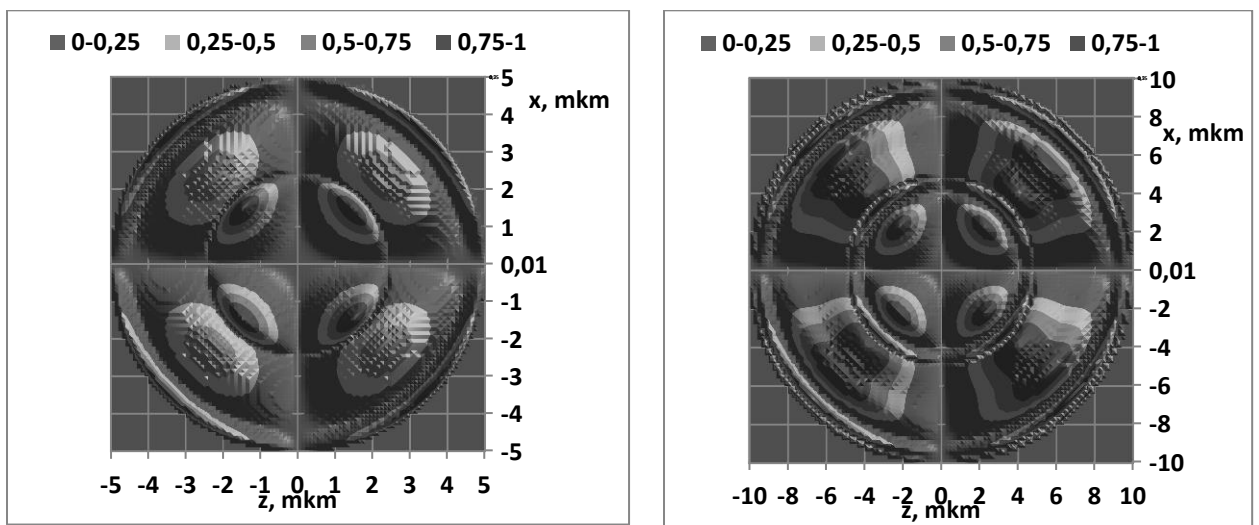


Рис.3.4.4.4. Сферический домен, диаметр центрального тела 0,5. Слева $L=10$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$.

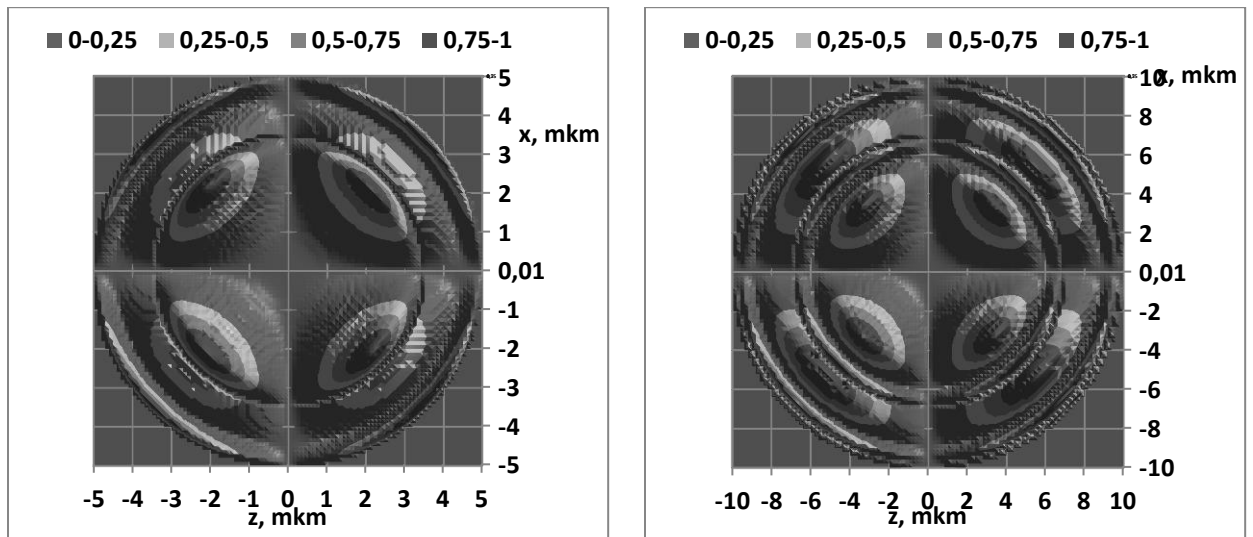


Рис.3.4.4.5. Интенсивность света, прошедшего через сферический домен, диаметр центрального тела 0,7 от диаметра домена. Слева $L=10$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20$ микрон, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$

В таком случае сферический ЖК домен не искажает свою радиально ориентированную структуру в областях, где он прилегает к поверхности.

Как видно из рис.3.4.4.2-5, изменение относительного размера центрального тела и изменение диаметра ЖК домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом.

Изменение диаметра сферического ЖК домена изменяет накапливаемую по ходу луча (лучей с различной поляризацией) света через двулучепреломляющую среду разность фаз Φ . В свою очередь, от наибольшей величины Φ зависит количество экстремумов яркости (чем больше разность фаз Φ по наибольшему пути луча света, тем больше изменение величины Φ по сравнению с краем сферического домена, где Φ незначительное).

Изменение относительного диаметра центрального тела влияет на наибольшую величину Φ (накапливаемую по ходу луча уже не по диаметру, а по хорде вблизи границы домена), не изменяя ее на краю сферического домена. В результате изменяется не только количество экстремумов яркости, но и их расположение в средней части наблюдаемой области, причем на периферии картина не меняется, так как там центральное тело не влияет на условия (двулучепреломление) хода луча. Кроме того, в центре (в проекции центрального тела) накопленная разность фаз Φ оказывается меньше

максимальной, и отсчет экстремумов идет в двух направлениях, как от Φ максимальной к периферии, так и от Φ максимальной к центру. В результате, при наличии центрального тела, количество экстремумов яркости может оказаться больше, чем без него.

Резкое изменение яркости вблизи границ проекции центрального тела, как правило, достаточно отчетливо видно, образуя кольцевую область. Можно оценить, хотя и не вполне точно, диаметр центрального тела. В принципе, возможно такое сочетание двулучепреломляющих характеристик среды и геометрических размеров домена и центрального тела, что, как исключение, не будет наблюдаться кольцевая высококонтрастная область. Поэтому можно определить двулучепреломление Δn по оптической картине, сравнивая с данными моделирования, в случае, если удалось определить размеры сферического домена и если размеры помещенных в среду тел, вокруг которых образуются домены сферической формы, известны заранее. Если известно двулучепреломление Δn , то важно характерное распределение экстремумов, позволяющих, сравнивая с данными моделирования, определить геометрические характеристики центрального тела и домена.

§5. Сферические приповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

Для компьютерной модели сферического оптически анизотропного нематического ЖК домена (образующегося вокруг сферического тела, введенного в изотропную ЖК среду) были приняты (рис.3.4.5.1) следующие условия. В целом принятые условия аналогичны изложенным выше. Отличие заключается в том, что сферическое тело, лежащее в плоскости ячейки в начале системы координат, полагаем находящимся на поверхности одной из сторон ячейки.

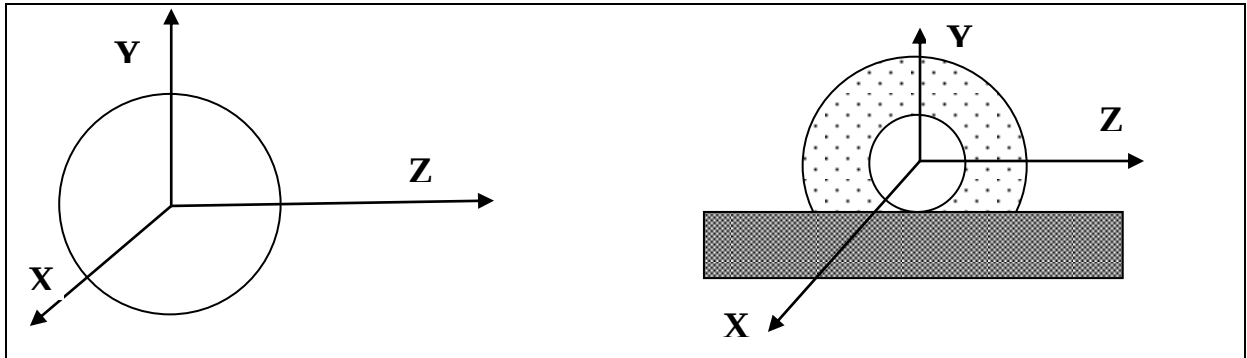


Рис.3.4.5.1. Сферический домен: слева) центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке; справа) центральное тело прилегает к поверхности ячейки, нематический ЖК домен не строго сферической формы.

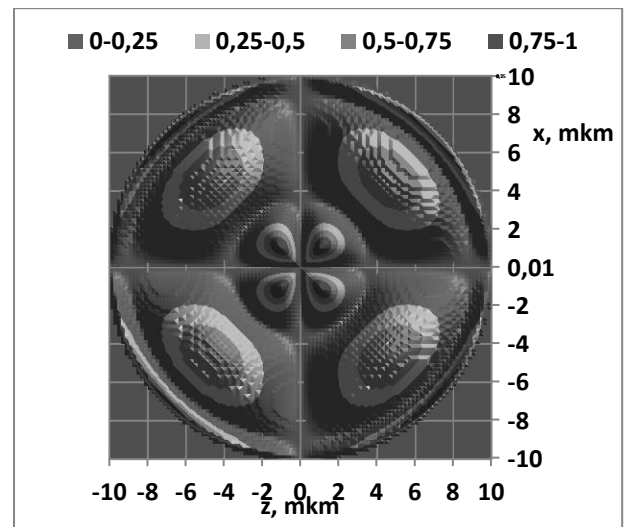
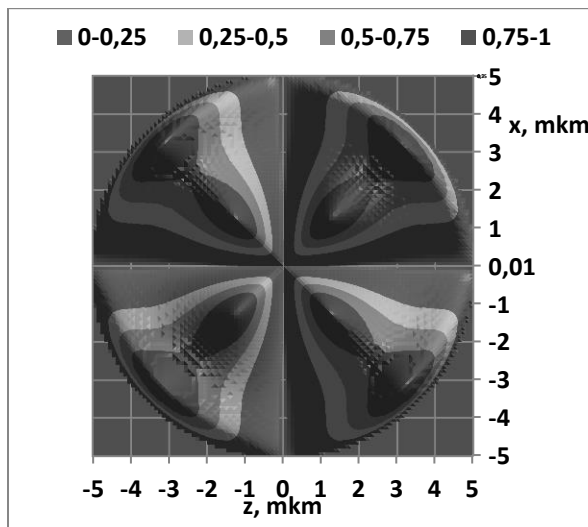


Рис.3.4.5.2. Интенсивность света, прошедшего через приповерхностный полусферический домен. Слева $L=10$ микрон, $n_o=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20$ микрон, $n_o=1.5$, $n_e=1.65$

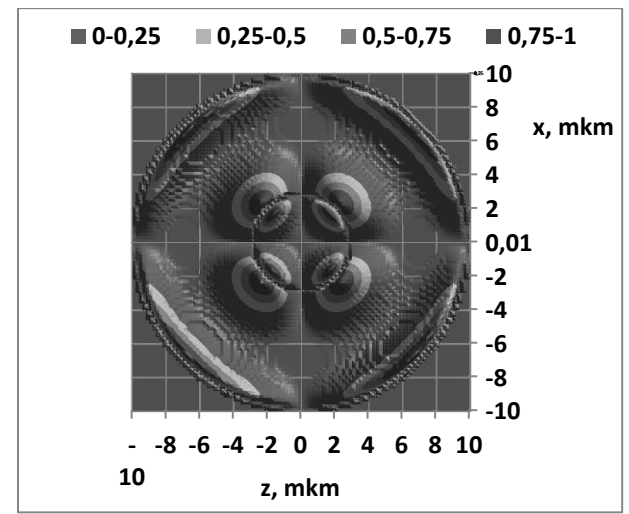
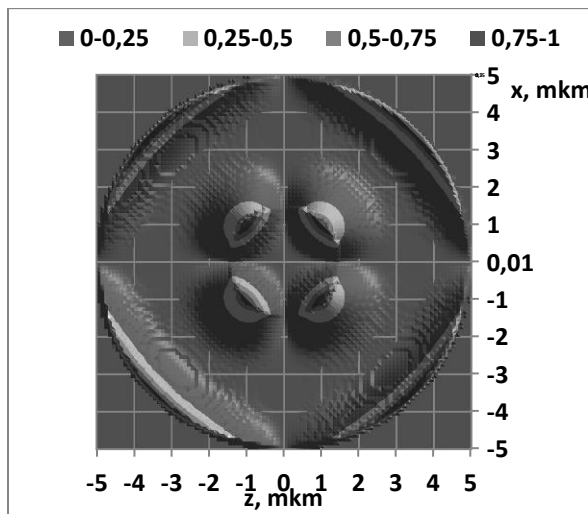


Рис.3.4.5.3. Приповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,3. Слева $L=10$ мкм, $n_o=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20$ мкм, $n_o=1.5$, $n_e=1.65$

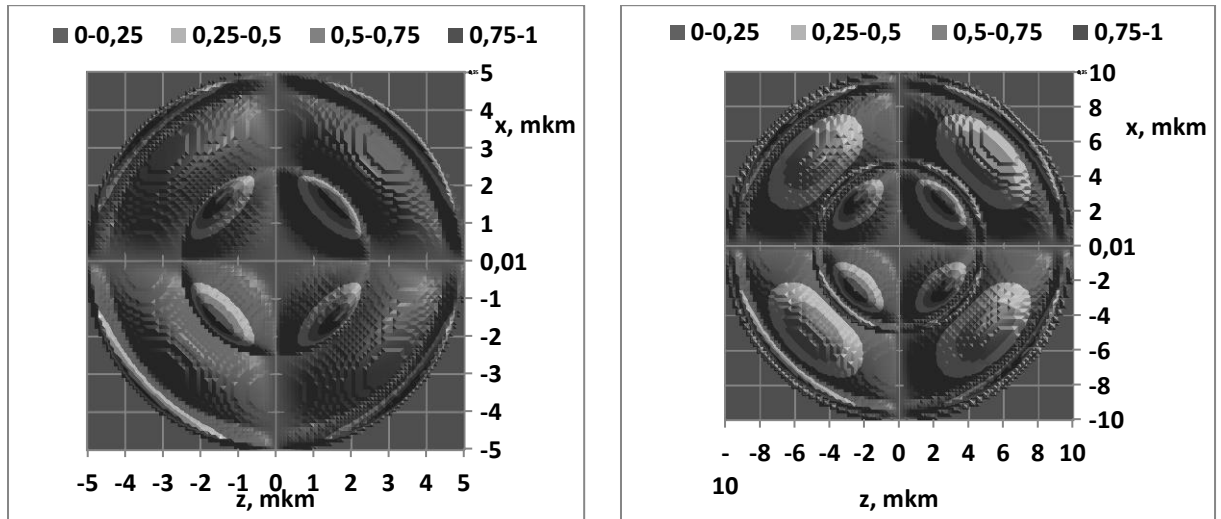


Рис.3.4.5.4. Приповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,5. Слева $L=10 \text{ мкм}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20 \text{ мкм}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$

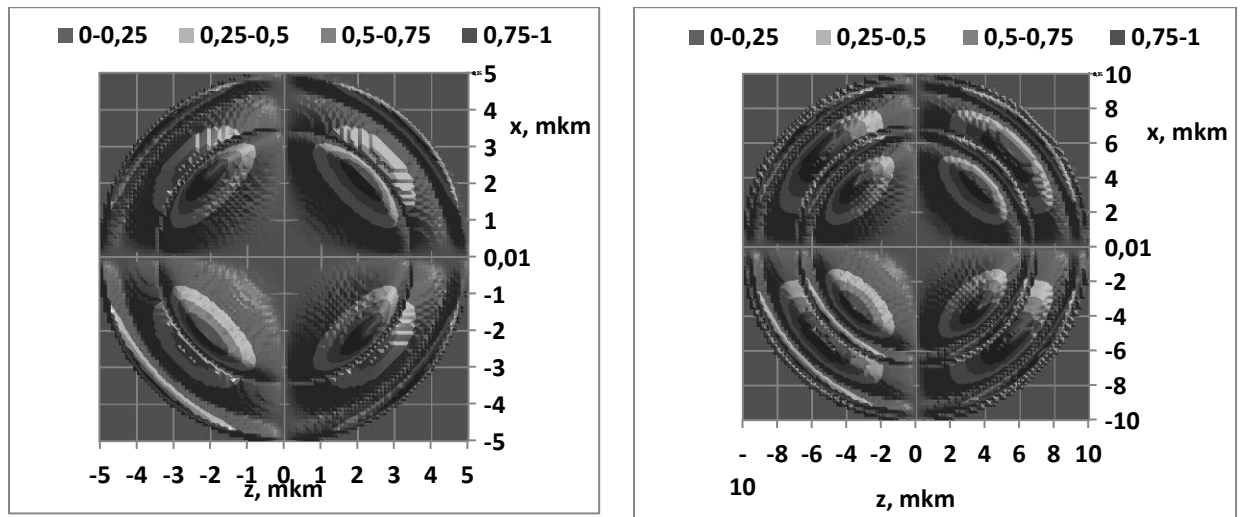


Рис.3.4.5.5. Приповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,7. Слева $L=10 \text{ мкм}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20 \text{ мкм}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$

Сферический ЖК домен при незначительном относительном радиусе центрального тела становится полусферическим, а при относительно тонком слое ЖК на поверхности центрального тела, то есть при большом относительном радиусе центрального тела, становится сферическим.

Как видно из рис.3.4.5.2-5, изменение относительного размера центрального тела и изменение радиуса приповерхностного ЖК домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом. Как и в рассмотренном выше случае сферического домена, можно определить геометрические и двулучепреломляющие характеристики домена.

§6. Сферические межповерхностные оптически анизотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме

Для компьютерной модели сферического оптически анизотропного нематического ЖК домена (образующегося вокруг сферического тела, введенного в изотропную ЖК среду) были приняты (рис.3.4.6.1) условия, в целом аналогичные рассмотренным выше. Отличие состоит в том, что сферическое тело, лежащее в плоскости ячейки в начале системы координат, полагаем соприкасающимся с обеими поверхностями ячейки.

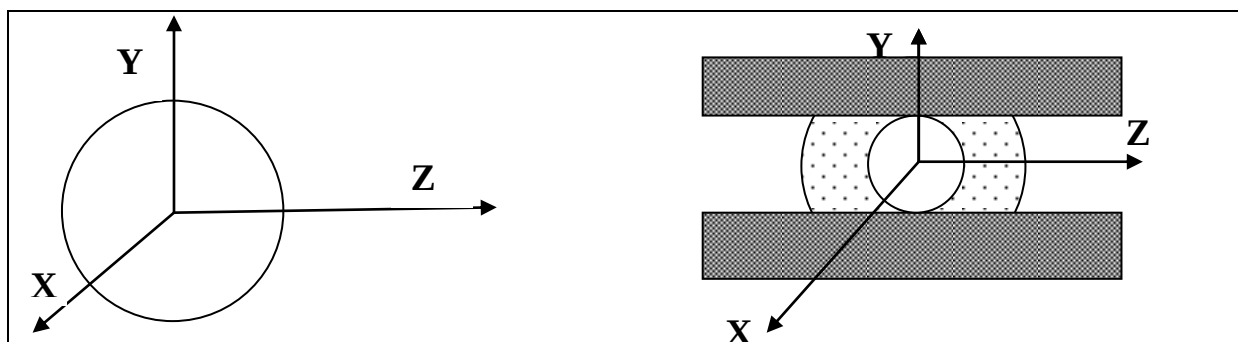


Рис.3.4.6.1. Сферический домен: слева) центр системы координат в центре домена, оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке; справа) центральное тело прилегает к обеим поверхностям ячейки, нематический ЖК домен не строго сферической формы.

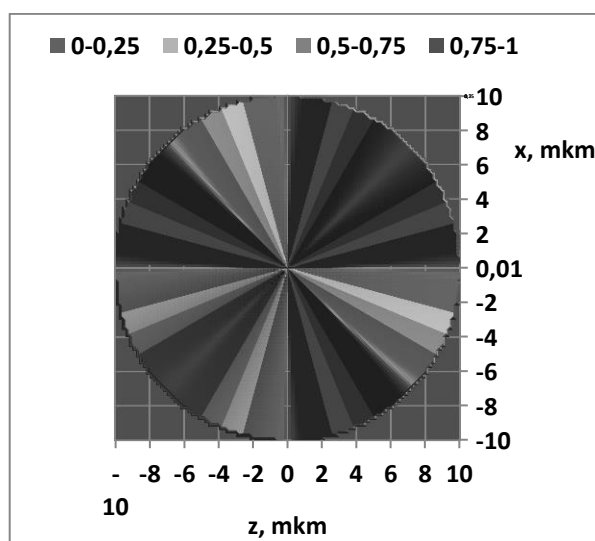


Рис.3.4.6.2. Интенсивность света, прошедшего через межповерхностный цилиндрический домен (относительный радиус центрального тела 0,01).

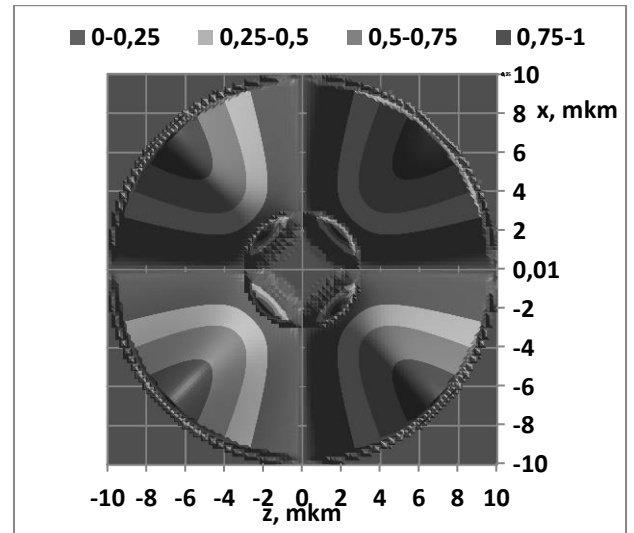
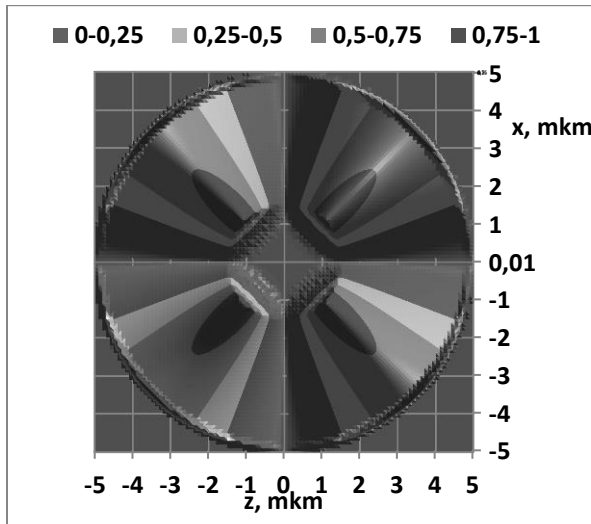


Рис.3.4.6.3. Межповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,3. Слева $L=10\mu\text{м}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20\mu\text{м}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$

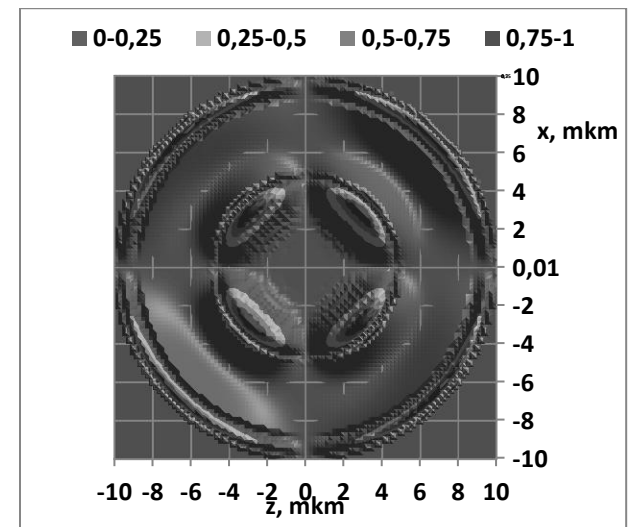
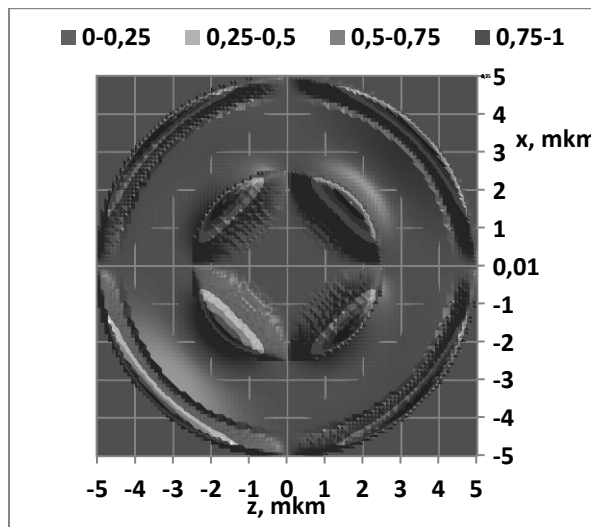


Рис.3.4.6.4. Межповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,5. Слева $L=10\mu\text{м}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20\mu\text{м}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$

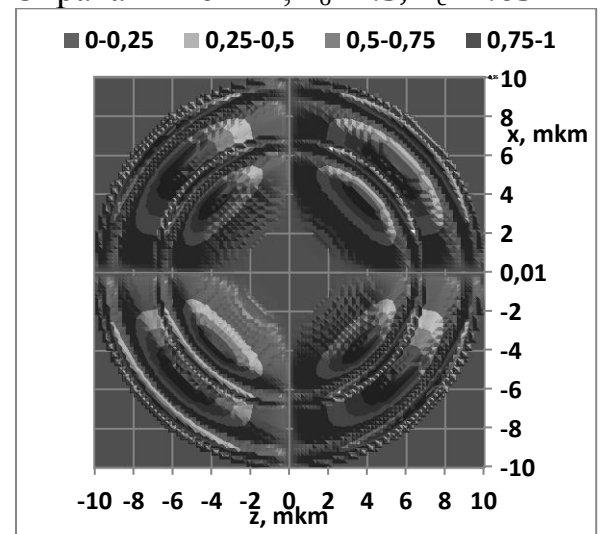
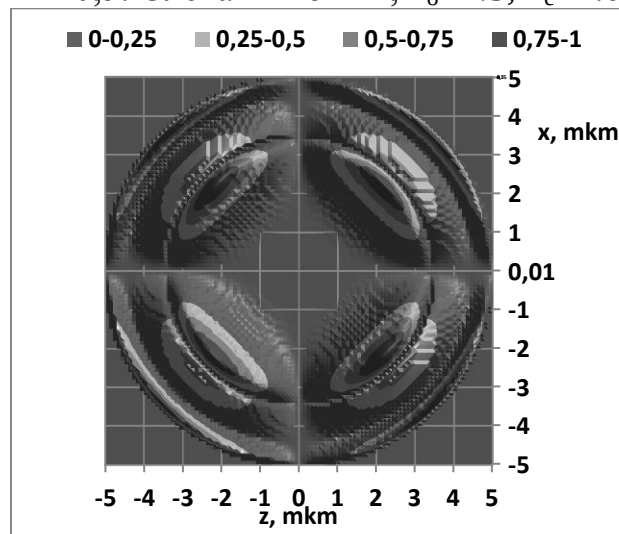


Рис.3.4.6.5. Межповерхностный сферический домен, радиус центрального тела 0,7. Слева $L=10\mu\text{м}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$. Справа $L=20\mu\text{м}$, $n_0=1.5$, $n_e=1.65$

Межповерхностный сферический ЖК домен при незначительном относительном радиусе центрального тела становится цилиндрическим, а при относительно тонком слое ЖК на поверхности центрального тела, то есть при большом относительном радиусе центрального тела, становится сферическим.

Как видно из рис.3.4.6.2-5, изменение относительного размера центрального тела и изменение радиуса межповерхностного ЖК домена влияют на формирование оптической картины существенно различным образом. Можно по оптической картине, сравнивая с данными моделирования, определить геометрические параметры и двулучепреломление Δn .

Выводы по сферическим и цилиндрическим доменам

Предложено по наблюдаемой оптической картине 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 обыкновенном показателе преломления, определять необыкновенный (n_e). Предложенные методы определения оптических характеристик и размеров ЖК доменов могут иметь прикладное значение при проектировании ЖК индикаторных средств.

Если анизотропные ЖК домены заключены в полимерную изотропную матрицу и показатель преломления полимерного материала равен обыкновенному показателю преломления ЖК материала, то, при радиально ориентированном директоре ЖК (при гомеотропно ориентирующей поверхности домена, состоящей из полимерного материала) можно рассматривать ЖК домены в полимерной матрице по аналогии с вышеописанными сферическим и цилиндрическим доменами при радиусе внутреннего тела, равном нулю. Результаты будут одинаковые.

Предложенные методы определения оптических характеристик и размеров сферических и цилиндрических ЖК доменов имеют важное значение при разработке, совершенствовании и исследовании характеристик приборов обработки и отображения информации, а также средств управления работой технологического оборудования и контроля производственных процессов.

§7. Сферические тангенциально ориентированные ЖК структуры

Для компьютерной модели сферического оптически анизотропного нематического тангенциально ориентированного ЖК домена были приняты (рис.3.4.7.1) следующие условия. Интенсивность падающего света принята за единицу (то есть приведены нормированные величины интенсивности света).

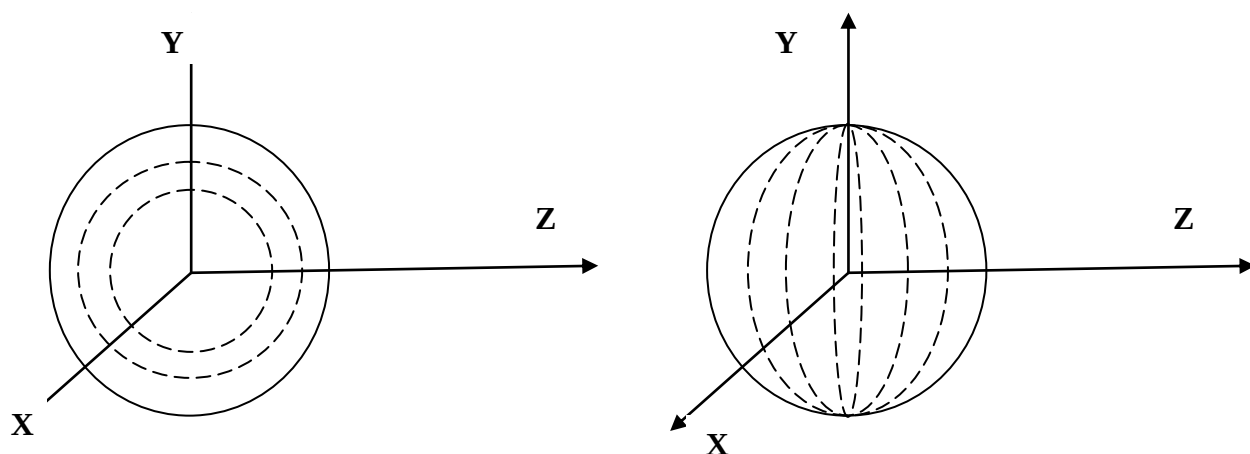
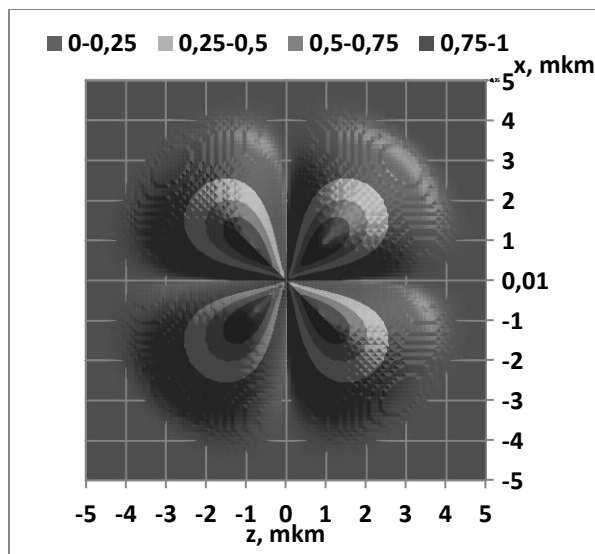


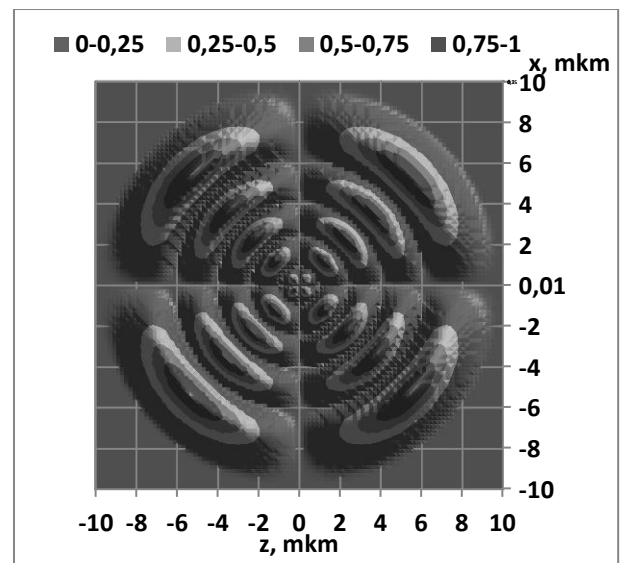
Рис.3.4.7.1. Сферический домен: оси OX и OZ лежат в плоскости слоя ЖК в ячейке. Слева тангенциальная ориентация с полюсами для каждого сферического слоя, расположенными на оси OY в этих сферических слоях. Справа полюсов два.

На рис.3.4.7.2, рис.3.4.7.3 приведены данные для интенсивности прошедшего через анизотропный ЖК домен света. Предполагается интенсивность света, не прошедшего через анизотропный домен, равная падающему свету. Считаем полностью прозрачной как изотропную среду, так и анизотропную среду. Считаем ЖК имеющим такой же обыкновенный показатель преломления, как изотропная среда. В сферическом домене

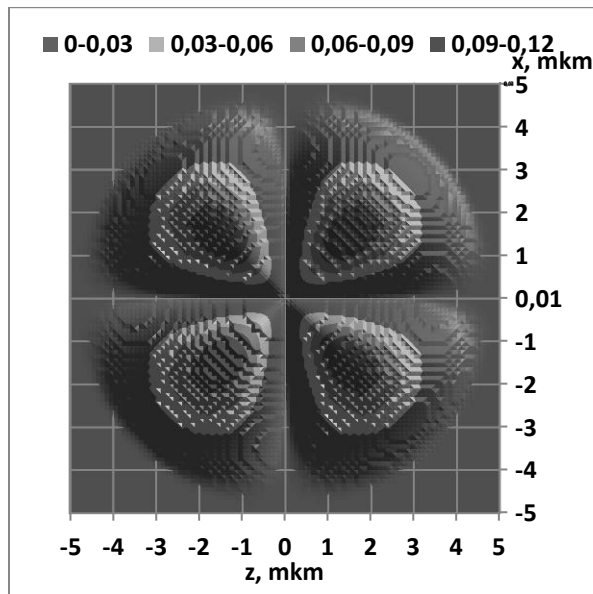
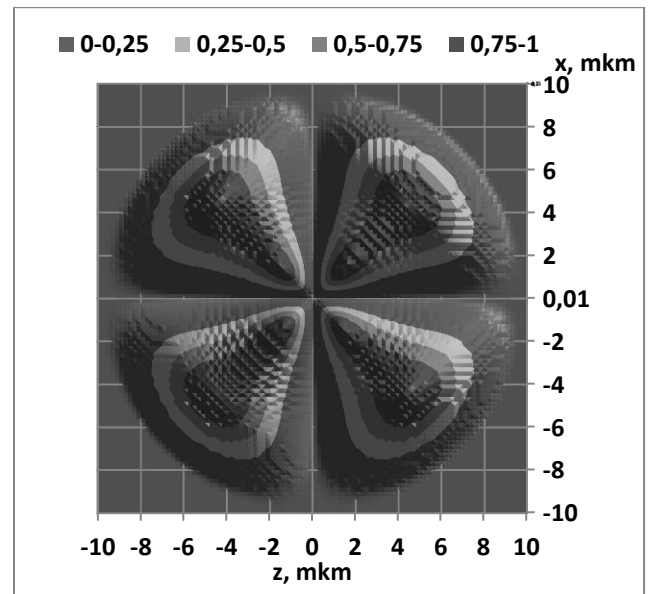
директор ЖК ориентирован тангенциально. Пара полюсов лежит на оси ОУ. В каждом сферическом тонком слое линии тангенциально ориентированного директора ЖК образуют дугу окружности, лежащую в слое и сходятся в полюсах. Вдоль оси ОУ нормально к поверхности ячейки падает луч света. Плоскость поляризации падающего луча содержит ось ОХ и перпендикулярна оси ОZ. Диаметр нематического ЖК домена D произвольно приняли равным для левых частей рисунков 10 микрон, для правых частей рисунков $D=20$ микрон. Показатели преломления нематического ЖК приняли следующие: для левых частей рисунков обыкновенный $n_o=1.5$, необыкновенный $n_e=1.55$; для правых частей рисунков $n_o=1.5$, $n_e=1.65$. Длину волны приняли $\lambda=630$ нанометров (красный свет). На рис.3.4.7.1 справа смоделированные результаты для варианта с парой полюсов (бужумов) незначительно отличаются от чисто сферического тангенциального распределения. Для случая с парой полюсов результаты приведены на рис.3.4.7.2 в нижнем ряду (рис.3.4.7.2.в, рис.3.4.7.2.г).



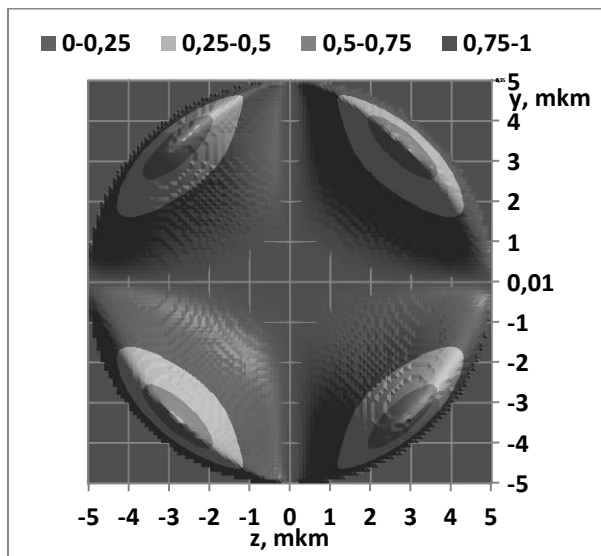
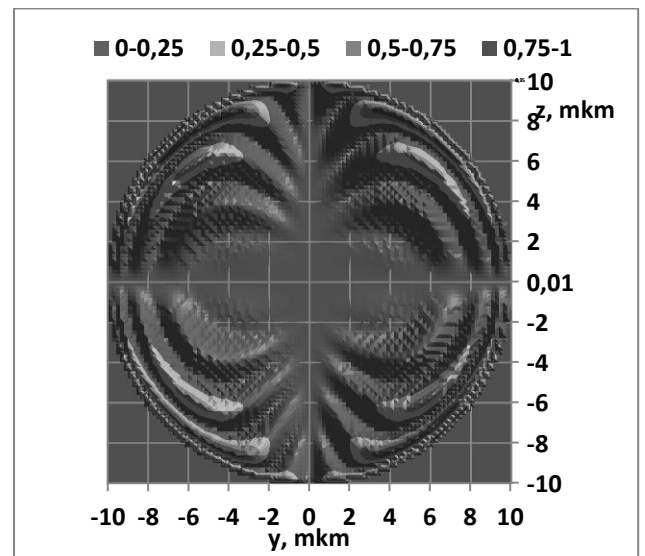
А) $D=10\text{мкм}$, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$



Б) $D=20\text{мкм}$, $n_o=1.5$, $n_e=1.65$

В) $D=10\mu\text{м}$, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$ Г) $D=20\mu\text{м}$, $n_o=1.5$, $n_e=1.65$ **Рис.3.4.7.2.** Вид вдоль оси ЖК капли (с полюса)

Полюса капли на рис.3.4.7.3.а находятся сверху и снизу. Полюса на рис.3.4.7.3.б справа и слева. На рис.3.4.7.3 плоскость поляризации света параллельна оси ОУ капли.

А) $D=10\mu\text{м}$, $n_o=1.5$, $n_e=1.55$ Б) $D=20\mu\text{м}$, $n_o=1.5$, $n_e=1.65$ **Рис.3.4.7.3.** Вид перпендикулярно оси ЖК капли

В случае наблюдения с полюса, как показано на рис.3.4.7.2, видимый диаметр капли меньше истинного. Часть занимает черная кольцевая область, она имеет ширину около 0,1 радиуса капли с нормированной на максимум

яркостью ниже 0,05. Ниже схемы наблюдаемых оптических эффектов на рис.3.4.7.4, рис.3.4.7.5 для тангенциальной ориентации.

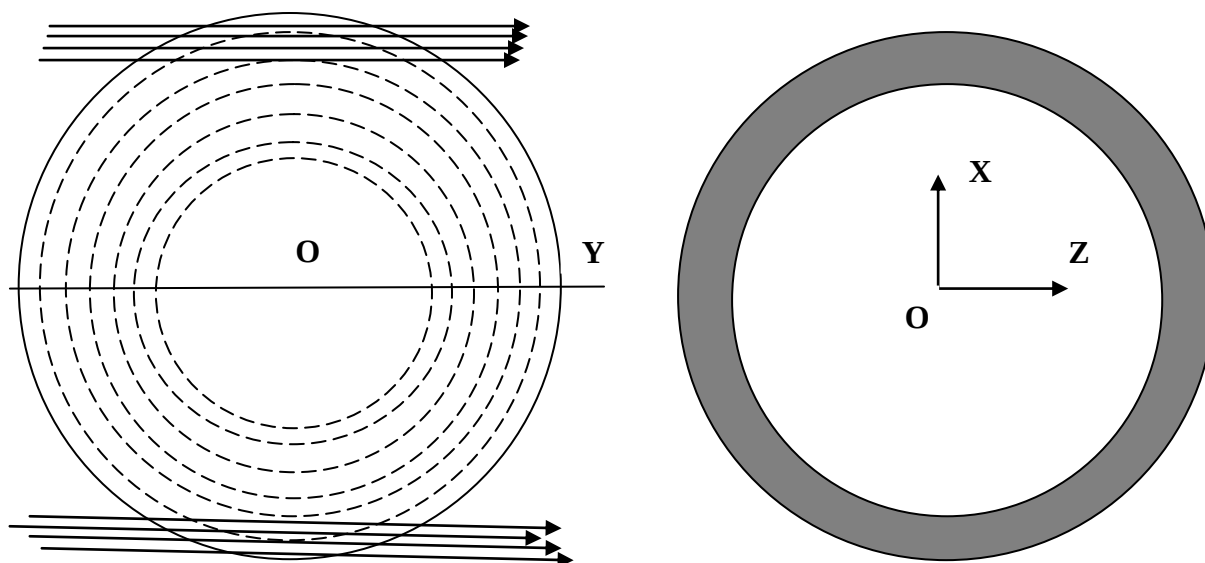


Рис.3.4.7.4. Показана слева капля ЖК, на которой заштрихованы стрелками, изображающими лучи света, области капли с углами директора ЖК к лучам света, близкими к параллельным. Справа показана затемненная кольцевая зона в оптической картине, сформированной каплей, ширина которой около 0,1 радиуса капли.

Вполне очевидно, что если луч света проходит не от полюса к полюсу, а под некоторым углом к продольной оси капли, то другую форму будет иметь затемненная зона. Ширина затемненной полосы останется прежней в плоскости, содержащей луч света и ось капли при малом угле, но по мере дальнейшего роста угла падения луча к оси капли уменьшится ширина затемненной зоны. Ширина затемненной полосы будет меньше и, по мере роста угла, станет равна нулю в перпендикулярной к ней плоскости. Картина, показанная на рис.3.4.7.3 для наблюдения под прямым углом к оси капли сформируется постепенно, по мере роста угла.

Причина в том для молекул ЖК, образующих угол к лучу, как схематически показано на рис.3.4.7.5., вклад в оптическую картину, формируемую каплей, будет отличаться от вклада параллельных к лучу молекул ЖК. Так как обычно нематические ЖК ориентируются под малым углом к поверхности, а не тангенциально к ней. Значительная ширина

переходного слоя (длина когерентности), как схематически показано на рис.3.4.7.6., приводит к значительному увеличению в оптической картине, сформированной каплей, ширины затемненной зоны.

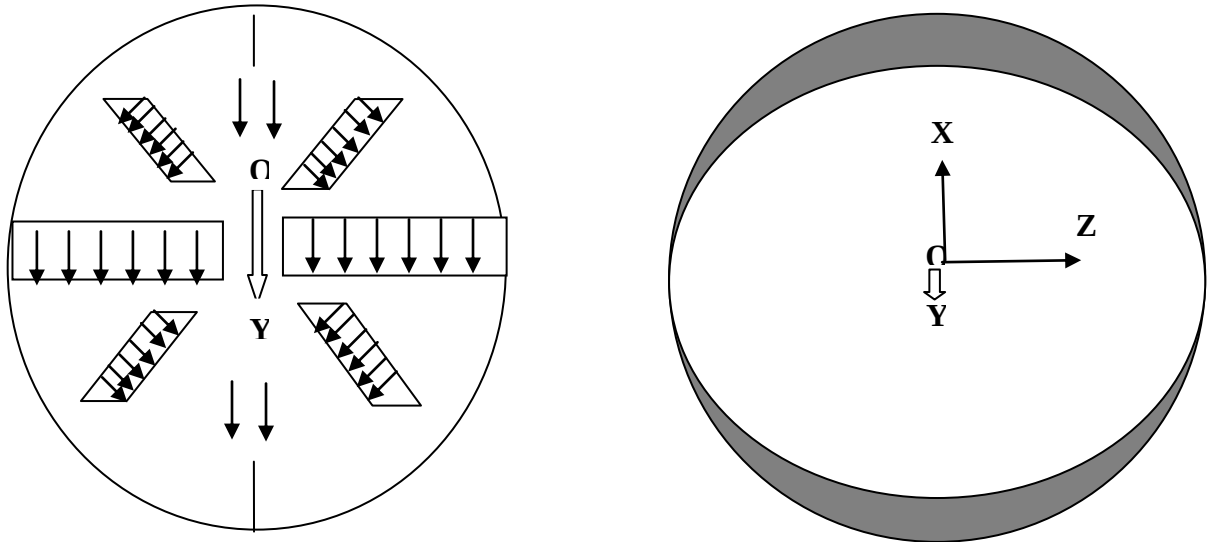


Рис.3.4.7.5. Показана слева капля ЖК, на которой заштрихованы стрелками, изображающими директор ЖК, области капли с углами директора ЖК к лучам света, отличными от параллельных. Светлой стрелкой показана ось капли ОУ, направленная на наблюдателя и под небольшим углом вниз (и совпадающая с лучом света). Плоскость поляризации света на рисунке вертикальная.

Справа показана затемненная некольцевая зона в оптической картине, сформированной лучом света под углом к оси ОУ капли, ширина затемненной зоны от нуля до 0,1 радиуса капли. Плоскость поляризации света на рисунке вертикальная, вдоль оси ОХ.

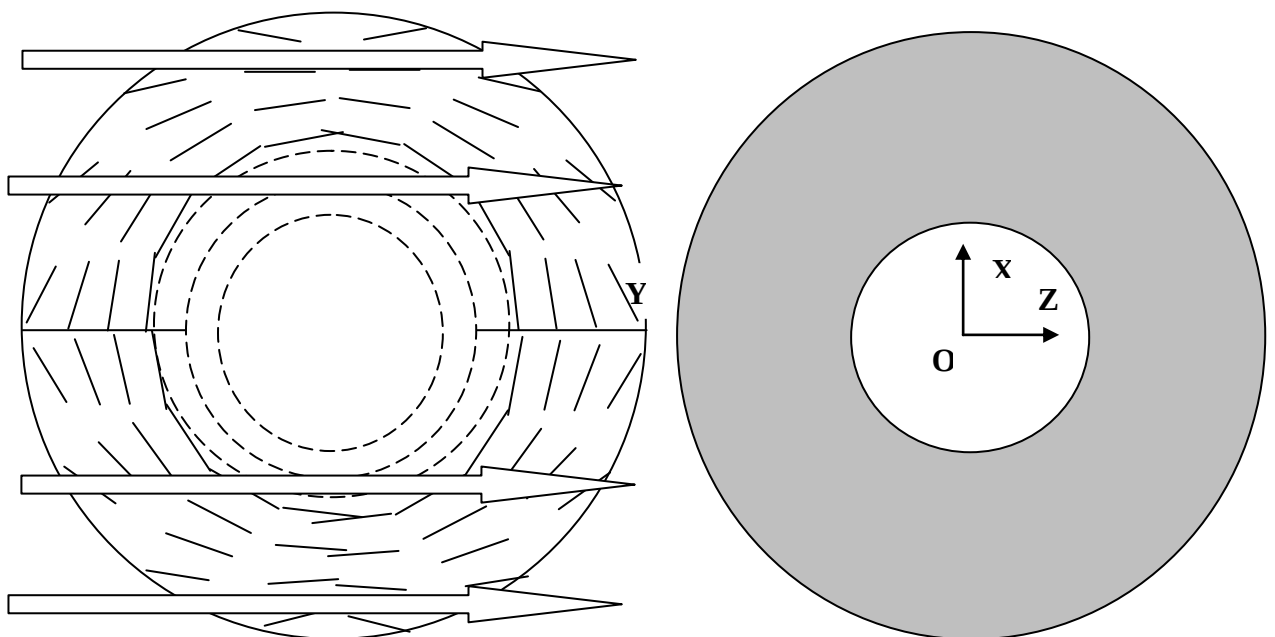


Рис.3.4.7.6. Показана слева капля ЖК, на которой светлые стрелки, изображающие лучи света, проходят параллельно оси капли ОУ сквозь области капли с углами директора ЖК к лучам света, близкими к параллельным.

Справа показана затемненная кольцевая зона в оптической картине, сформированной каплей при прохождении поляризованного света параллельно оси капли ОУ, ширина которой около 0,7 радиуса капли.

Оптическую картину, подобную рис.3.4.7.7. [141] можно было бы наблюдать при определенных параметрах пространственного распределения директора ЖК (рис.3.4.7.3, рис.3.4.7.5.).

Методам определения ориентационных характеристик и размеров как сферических, так и несферических ЖК доменов и структур придается большое значение [142-144]. Предложенные методы определения ориентационных характеристик и размеров сферических ЖК доменов имеют важное значение при разработке, совершенствовании и исследовании характеристик приборов обработки и отображения информации, а также средств управления работой технологического оборудования и контроля производственных процессов.

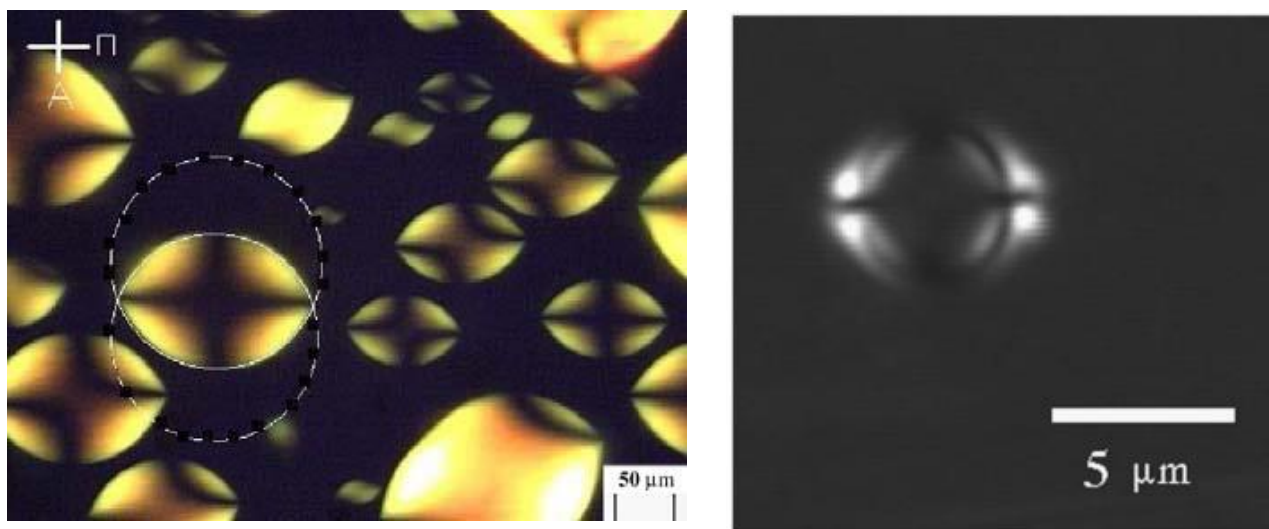


Рис.3.4.7.7. Фотографии [141, 142] капель нематического ЖК.

Единообразие (параллельность осей) изображений капель на рис.3.4.7.7 слева [141] объясняется приложенным полем, которое вынуждает все капли ориентировать свои оси одинаково. Таким образом, по оптической картине возможно определение зависимости ориентационных углов оси капли в зависимости от приложенного поля. Также по оптической картине возможно

определение приповерхностного угла ориентации директора нематического ЖК в каплях, а также толщина переходного слоя и диаметр капли. В свою очередь, по диаметру капли и параметрам переходного слоя (углу у поверхности, толщине) можно определить упругие характеристики ЖК материала.

Часть 5. Дифракция на объектах из оптически анизотропных материалов с периодическим поверхностным микрорельефом

§1. Экспериментальное исследование и моделирование дифракции на полимерных пленках с щелевым (циклоидоподобным) профилем микрорельефа, для нормально падающего луча

Образцы изготовлены на Химфаке МГУ. Процесс приготовления образцов описан в Главе 2. Методика измерений дифракции описана в Главе 2. Там же описано экспериментальное оборудование. Дифракционной решеткой является периодическая структура микрорельефа полимера. Образцы полимера имели следующие характеристики (табл.3.5.1.1):

Таблица 3.5.1.1.

Характеристики образцов полимера и процесс изготовления.

№ образца	18	42	51
период микрорельефа d	2690 нм	2152 нм	2690

В таблицах 2.9 и 2.10 в Главе 2 показаны данные, полученные с использованием атомно-силового микроскопа. Обращает на себя внимание профиль. Он примерно сопоставим для всех трех образцов.

На рис.2.12 в Главе 2 показан разрез профиля одного из образцов.

Угол полного внутреннего отражения для воды ($n=1,33$) равен $48^{\circ}35'$, для стекла ($n=1,5$) он принимает значение $41^{\circ}51'$, для алмаза ($n=2,42$) этот угол составляет $24^{\circ}40'$. Предполагается, что свет неполяризованный (круговая поляризация). Вполне очевидно, что при показателе преломления полимера где-то порядка 1,5 при вертикальном положении луча, идущего (на рисунке 2.12) снизу вверх, угол падающего луча с нормалью к поверхности будет на значительной части поверхности раздела полимер/воздух превышать угол полного внутреннего отражения. Хорошо видно, что луч света будет проходить только на узких участках. Выйдя из полимерного материала на верхних участках рельефа, свет рассеивается в широком угловом диапазоне и для него

верны все те рассуждения, которые относятся к щелям дифракционной решетки.

На компьютере была смоделирована дифракционная картина от системы, исходя из вышеупомянутых, для длины волны 630 нм. Число щелей выбрали исходя из следующих рассуждений: диаметр лазерного луча порядка 1 мм, период щели порядка 2,5 мкм, число щелей колеблется вплоть до 400 щелей. Распределение потока энергии в сечении лазерного луча неравномерное, возрастающее к оси луча. Поэтому вклад центральной части луча значительно больше, чем ее геометрическое удельное сечение. Следовательно, дифракционная картина представляет собой суперпозицию дифракционных картин от решеток с числом щелей от, по крайней мере, нескольких десятков и до 400 щелей. В результате компьютерного моделирования была получена (рис.3.5.1.1) дифракционная картина. Как показано на рис.3.5.1.2, полимерная пленка с микрорельефом, обладающая свойством эквивалентности простой дифракционной решетке, формирует световой поток (распределенный притом по углам в соответствии с правилами дифракции) в пределах резко ограниченного диапазона углов. Причины этого вполне видны из рис.2.12, где вполне ясно, что преломленный на поверхности раздела свет выходит в направлении, преимущественно не очень сильно отличающемся от первоначального нормального падения луча. Полученный результат компьютерного моделирования хорошо соответствует экспериментальным данным (рис.3.5.1.2), свидетельствующим о том, что дифракционная картина состоит из суперпозиции дифракционных картин от 300 до 400 щелей и с заметным влиянием диапазона от 0 до 300 щелей.

На рис.3.5.1.2 хорошо видно, что с ростом угла (отклонением от центра дифракционной картины) интенсивность освещения убывает. Достаточно четко видна граница освещенного углового диапазона, обусловленного геометрией (профилем) полимерной пленки. Обращает на себя внимание значительная интенсивность дифракционной картины во всем угловом диапазоне между центральным максимумом и смежными с ним. Это обусловлено разбросом

параметров (периода и ширины верхних частей рельефа, играющих роль щелей дифракционной решетки) реальной пленки с микрорельефом. Как видно из рис.2.12, проходящие через полимерную пленку лучи света все идут почти одинаковый (по длине) путь и непосредственно разности хода (за счет различий между коэффициентом преломления пленки и коэффициентом преломления воздуха) лучей при этом практически не образуется.

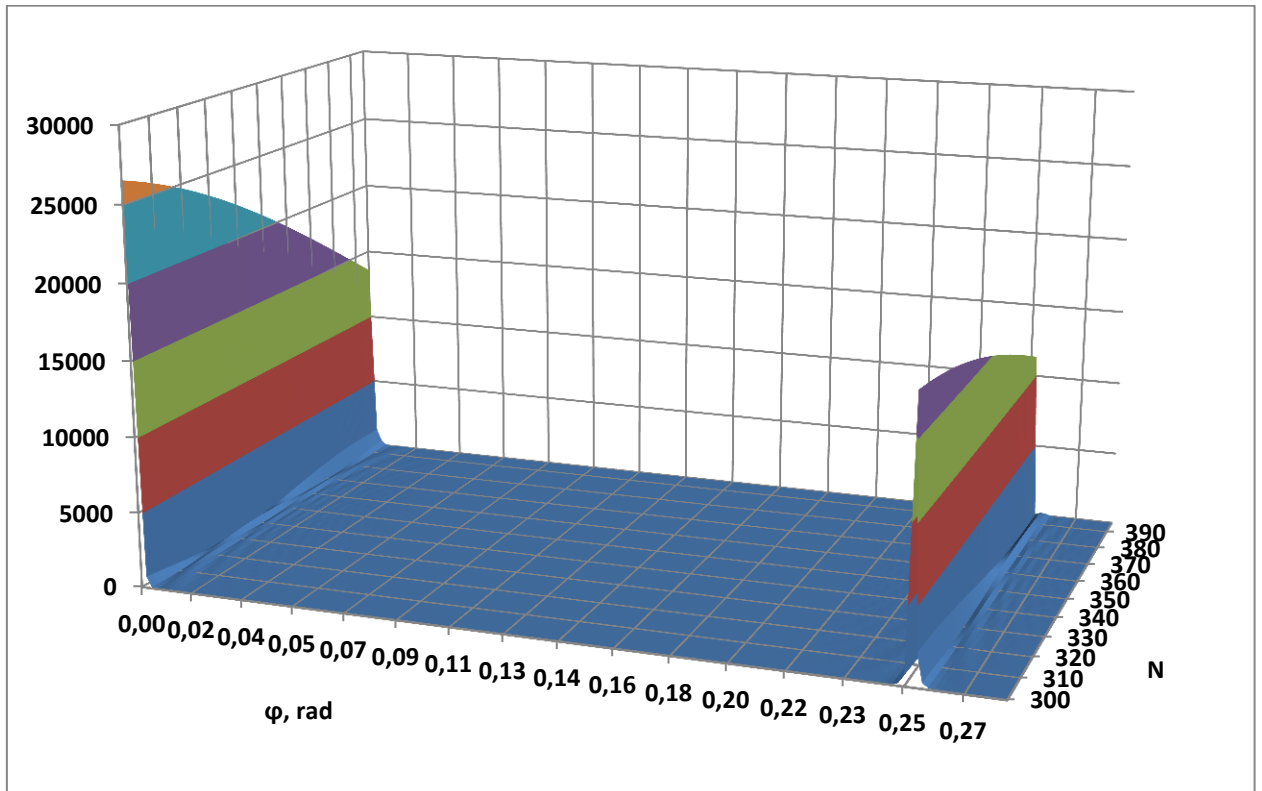


Рис.3.5.1.1. Результат компьютерного моделирования дифракционной картины от системы, насчитывающей от 300 до 400 щелей при ширине щели 0,5мкм, периоде решетки 2,5 мкм



Рис.3.5.1.2. Экспериментально полученная дифракционная картина (фото).

Двулучепреломление при толщине пленки порядка 1 мкм и при разности коэффициентов преломления обыкновенного и необыкновенного луча порядка, примерно, от 0,05 до 0,15 (в зависимости от материала пленки), дает разность хода обыкновенного и необыкновенного луча примерно от 0,03 мкм до 0,1 мкм, что в несколько раз (или на даже на порядок) меньше полуволны (длина волны 630 нм). Таким образом, фактически дифракционная картина от полимерной пленки с микрорельефом, обладающим щелевым профилем и вследствие этого свойством эквивалентности простой дифракционной решетке при нормальном падении луча света, соответствует дифракционной картине от решетки, точнее, суперпозиции дифракционных картин от решеток с числом щелей в некотором диапазоне, обусловленном шириной луча света. Полученные результаты (компьютерное моделирование и экспериментальные) свидетельствуют о принципиальной возможности эквивалентности полимерной пленки с микрорельефом обычной дифракционной решетке, при условии нормально падающего луча света. Показано, что круглый луч света (лазера) формирует дифракционную картину, представляющую собой суперпозицию дифракционных картин от решеток с различным (в определенном диапазоне) числом щелей.

§2. Метод моделирования дифракции на оптически анизотропных структурах с ступенчатым периодическим микрорельефом

Использован метод, разработанный В.И.Цоем и др. и описанный в [96-100, 116]. Он описан в Главе 2. На рис.2.13, 2.14 в Главе 2 приведена слоистая структура двулучепреломляющего материала с периодическим микрорельефом. Отношение изображенной на рис.2.13. d_{mat}/Λ в дальнейшем обозначено в тексте как L_1/Λ , и, соответственно, d_{air}/Λ как L_2/Λ .

§3. Сравнение дифракции на оптически анизотропных полимерных пленках с периодическим микрорельефом различного профиля и разными параметрами рельефа

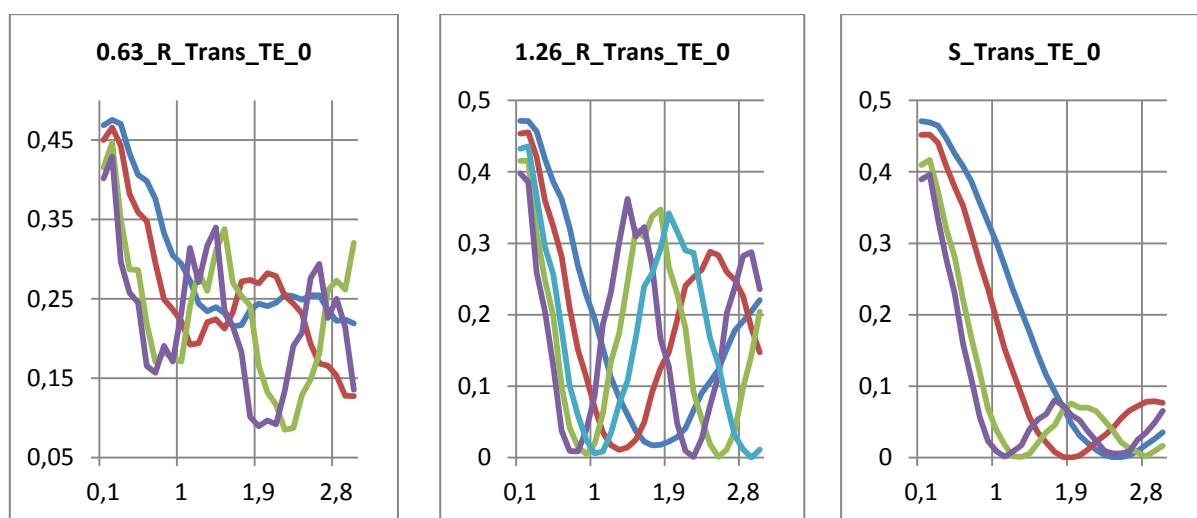
3.1. Результаты моделирования для дифракционной интенсивности прошедшей ТЕ волны (вектор E перпендикулярен линиям рельефа)

Сравнивались следующие три типа:

- А) Синусоидальный профиль, период четыре длины волны - 2,52мкм;
- Б) Прямоугольный профиль, ширина щели (борозды) 0,63мкм период четыре длины волны - 2,52мкм,;
- В) Прямоугольный профиль, ширина щели (борозды) 1,26мкм, период четыре длины волны - 2,52мкм.

Для всех глубина рельефа от 0,1 до 3 длин волны (от 0,063мкм до 1,89мкм), подстилающий слой 0,063мкм (учитывается дополнительно к слою с рельефом).

На рис.3.5.3.1 и рис.3.5.3.2 показаны результаты моделирования для прошедшей ТЕ волны, для дифракционных максимумов 0, 1, 2, 3 порядка I_0 , I_1 , I_2 , I_3 . При нормальном падении луча света интенсивности $I_1 = I_{-1}$, $I_2 = I_{-2}$, $I_3 = I_{-3}$.



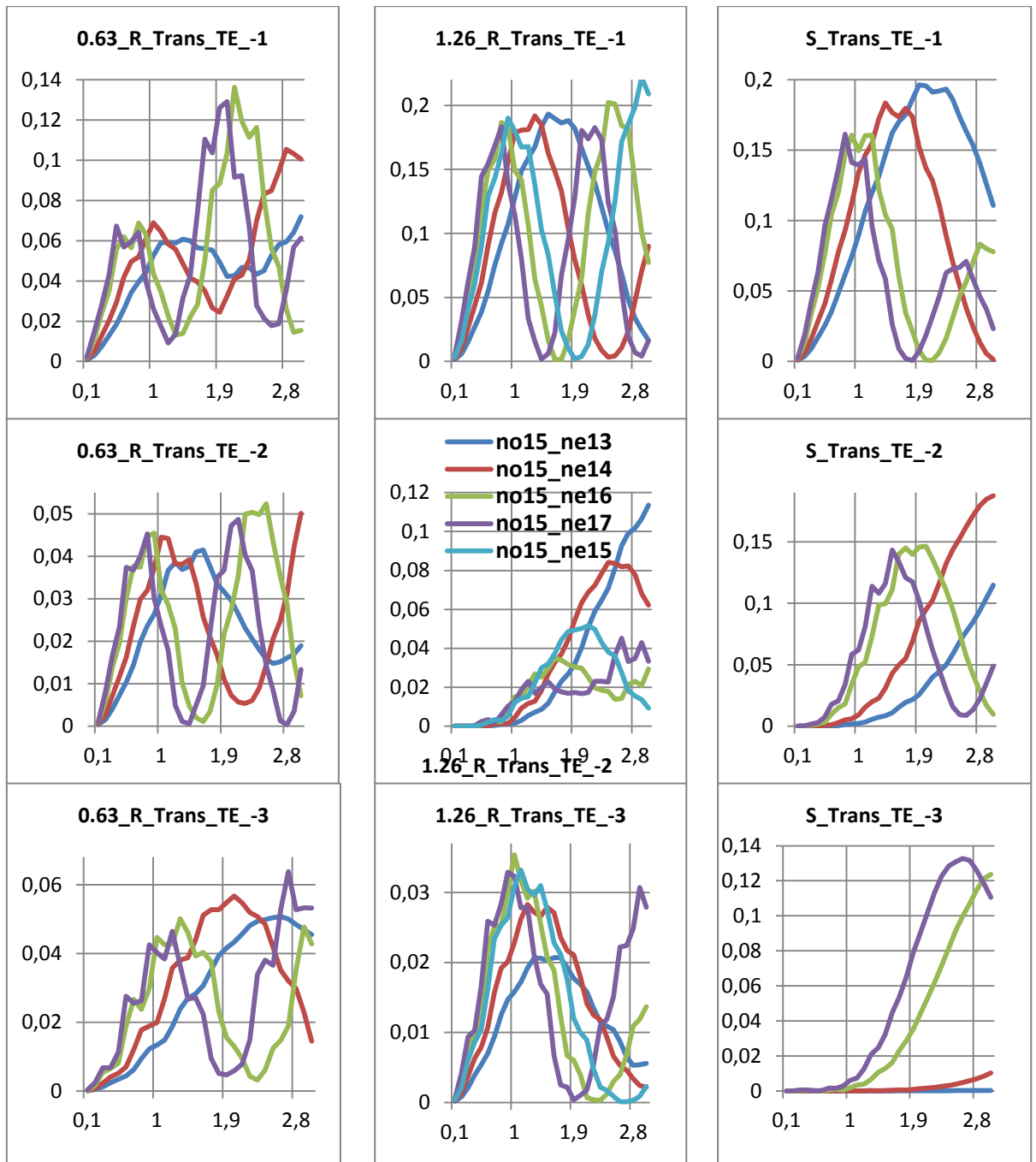
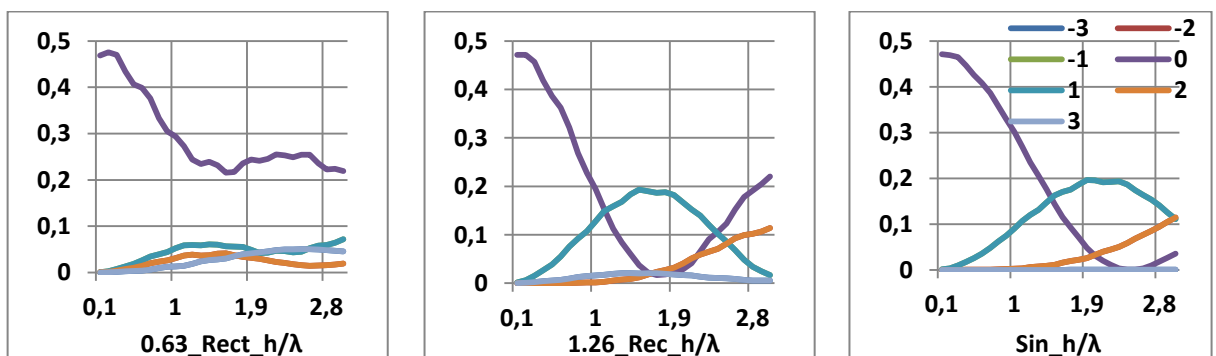


Рис.3.5.3.1. Интенсивности дифракционных максимумов в зависимости от выраженной в длинах волн (h/λ) глубины решетки, для прошедшей ТЕ волны, показатели преломления $n_o=1,5$ и n_e от 1,3 до 1,7. Слева ширина борозды 0,63мкм, посередине 1,26мкм, справа синусоидальный профиль.



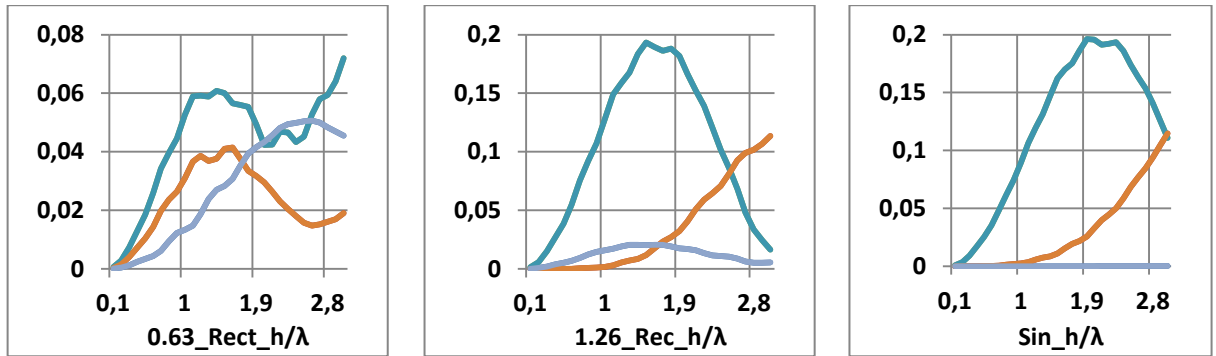


Рис.3.5.3.2.а. Интенсивности дифракционных максимумов в зависимости от выраженной в длинах волны (h/λ) глубины решетки, для прошедшей ТЕ волны, показатели преломления $n_0=1,5$ и $n_e=1,3$. Слева ширина борозды 0,63мкм, посередине 1,26мкм, справа синусоидальный профиль.

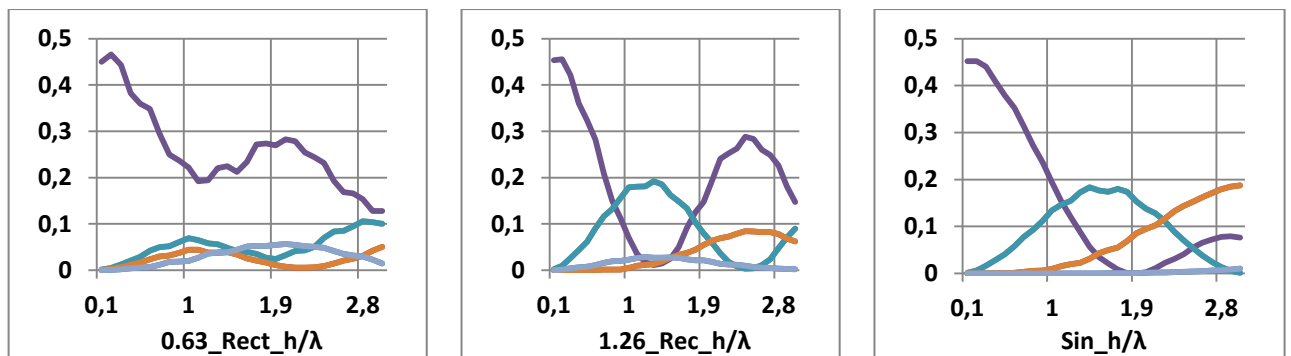


Рис.3.5.3.2.б. Интенсивности дифракционных максимумов в зависимости от выраженной в длинах волны (h/λ) глубины решетки, для прошедшей ТЕ волны, показатели преломления $n_0=1,5$ и $n_e=1,3$. Слева ширина борозды 0,63мкм, посередине 1,26мкм, справа синусоидальный профиль.

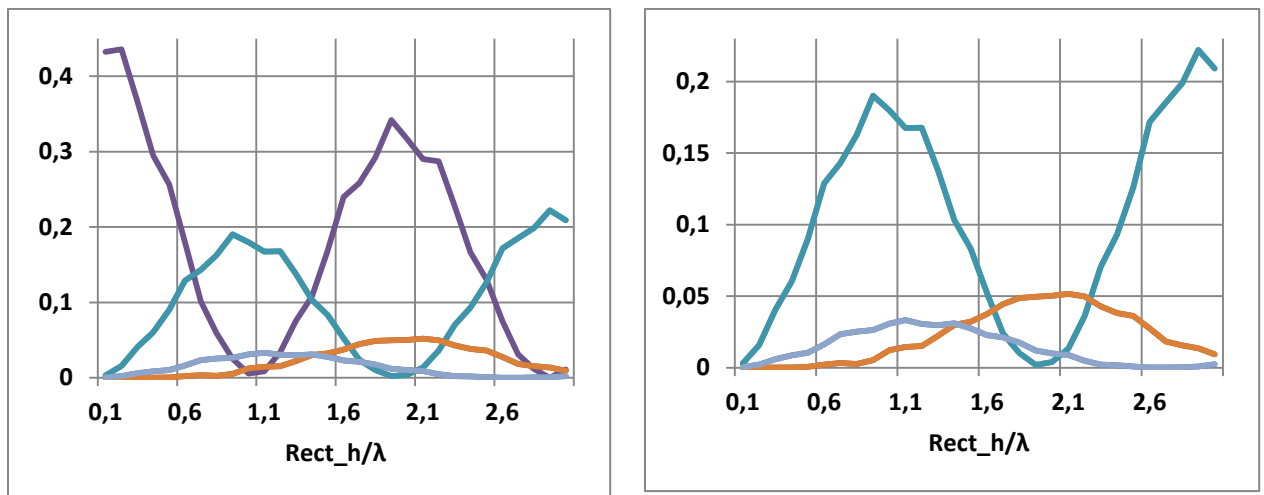


Рис.3.5.3.2.в. Интенсивности дифракционных максимумов в зависимости от выраженной в длинах волны (h/λ) глубины решетки, для прошедшей ТЕ волны, показатели преломления $n_0=1,5$ и $n_e=1,51$. Слева ширина борозды 0,63мкм, справа 1,26мкм прямоугольный рельеф.

Удельный вклад показан для каждого максимума. Принята за единицу сумма интенсивностей ТМ и ТЕ.

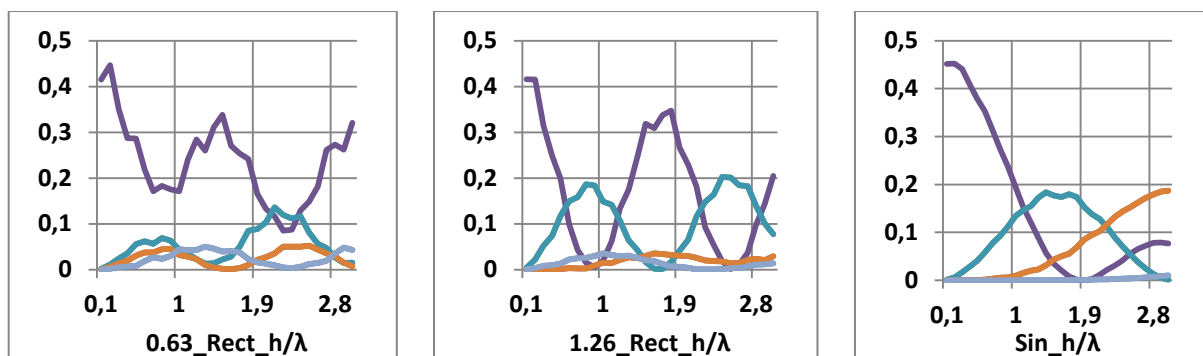


Рис.3.5.3.2.г. Интенсивности дифракционных максимумов в зависимости от выраженной в длинах волны (h/λ) глубины решетки, для прошедшей ТЕ волны, показатели преломления $n_0=1,5$ и $n_e=1,6$. Слева ширина борозды 0,63мкм, посередине 1,26мкм, справа синусоидальный профиль.

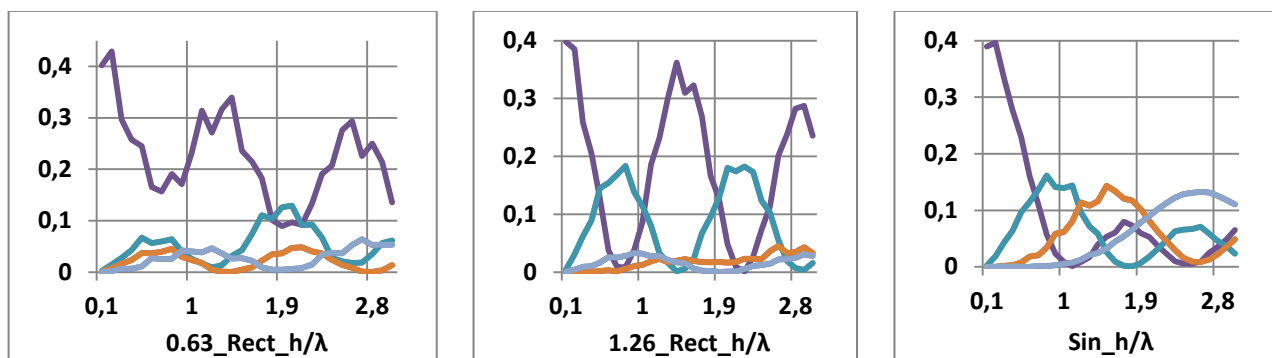


Рис.3.5.3.2.д. Интенсивности дифракционных максимумов в зависимости от выраженной в длинах волны (h/λ) глубины решетки, для прошедшей ТЕ волны, показатели преломления $n_0=1,5$ и $n_e=1,7$. Слева ширина борозды 0,63мкм, посередине 1,26мкм, справа синусоидальный профиль.

Для обоих типов рельефа: По мере увеличения показателя преломления n_e от 1,3 до 1,7 при постоянном значении $n_0=1,5$ дифракционные максимумы смещаются в сторону меньшей глубины рельефа (h/λ). При отрицательной оптической анизотропии ($\Delta n = n_e - n_0$) графики зависимости дифракционных максимумов от глубины решетки становятся более правильной формы.

Для синусоидального рельефа: С ростом номера дифракционные максимумы смещаются в сторону большей глубины рельефа (h/λ). При этом с ростом номера максимума от нулевого до второго увеличивается расхождение их для различных пар показателей преломления, достигающее в единицах h/λ величины 1,5 для второго максимума.

Для прямоугольного рельефа с широкой бороздой: Линии несколько более правильной формы, чем для прямоугольного рельефа с узкой бороздой. С ростом номера дифракционные максимумы смещаются в сторону большей глубины рельефа (h/λ), и для второго максимума располагаются при h/λ от 1,2 до 2,7. При этом с ростом номера максимума увеличивается расхождение их для различных пар показателей преломления, достигающее в единицах h/λ величины 1,5 для второго максимума. Однако для третьего характерно расположение максимума для различных пар показателей преломления от 1 до 1,5. Несмотря на небольшие (до 0,035 от суммарного вклада) интенсивности для третьего дифракционного максимума, вычислительные (методические) погрешности не заметны.

Для прямоугольного рельефа с узкой бороздой: С ростом номера дифракционные максимумы для случаев с отрицательной оптической анизотропией смещаются в сторону большей глубины рельефа (h/λ). При этом для образцов с положительной анизотропией эта тенденция почти не заметна.

3.2. Результаты моделирования для дифракционной интенсивности прошедшей ТМ волны (вектор E параллельно бороздам рельефа)

На рис.3.5.3.3 показаны результаты моделирования для прошедшей ТМ волны, для дифракционных максимумов 0, 1, 2, 3 интенсивности I_0, I_1, I_2, I_3 . При нормальном падении луча света, интенсивности $I_1 = I_{-1}, I_2 = I_{-2}, I_3 = I_{-3}$. Показан удельный вклад каждого из максимумов. Несмотря на небольшие (от 0,01 до 0,07 от суммарного вклада) интенсивности для третьего дифракционного максимума, вычислительные и методические погрешности не заметны. Это хорошо определяется, так как графики полностью накладываются друг на друга для разных значений необыкновенного коэффициента преломления. Таким образом, для прошедшей волны модель, заложенная в основу вычислительных алгоритмов, вполне адекватна физической теории, на основе которой она создана.

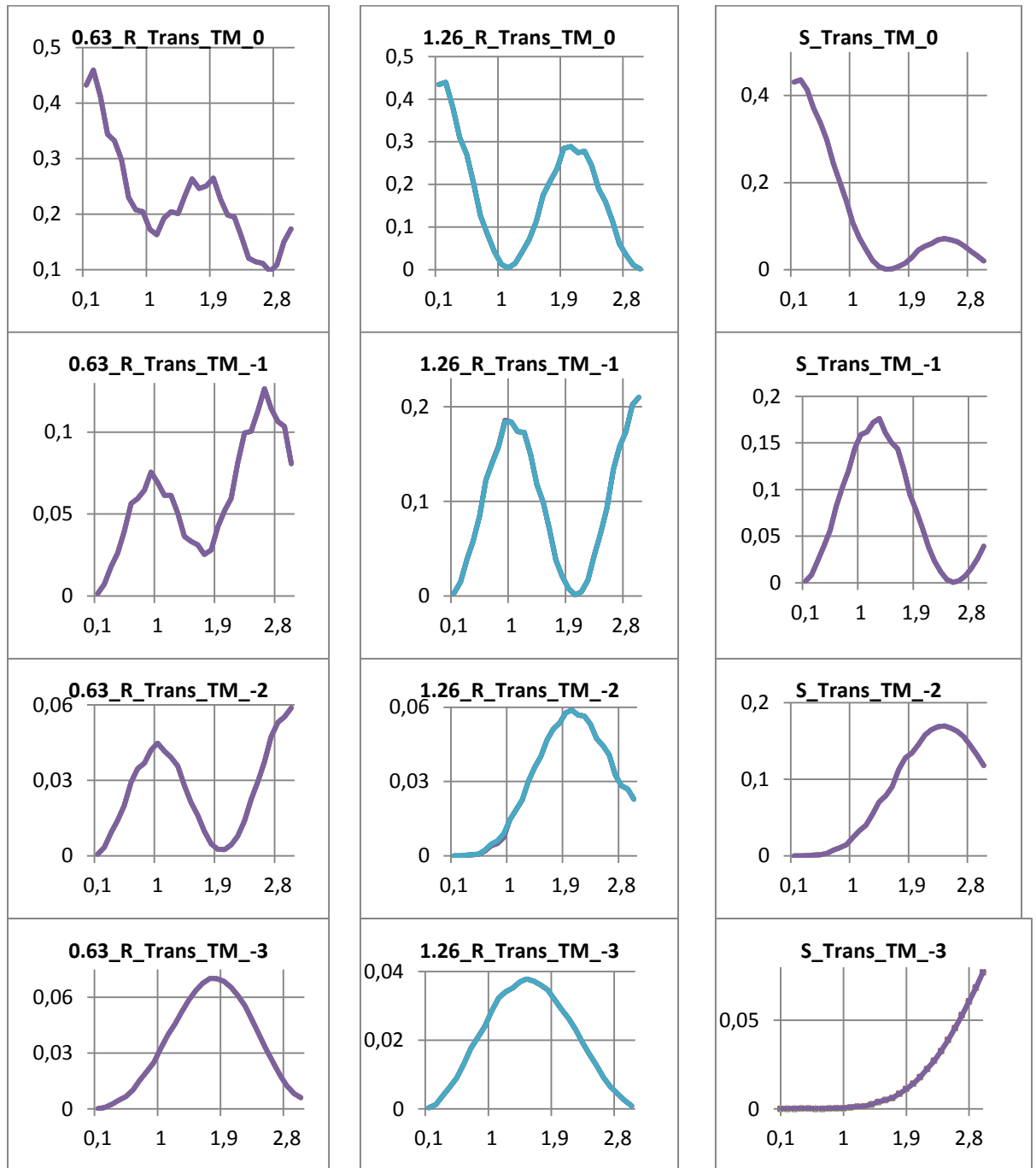


Рис.3.5.3.3.а. Интенсивности дифракционных максимумов для прошедшей ТМ волны для показателей преломления $n_0=1,5$ и n_e от 1,3 до 1,7, в зависимости от глубины решетки, выраженной в длинах волны (h/λ). Слева прямоугольный рельеф с шириной щели 0,63мкм, посередине прямоугольный с щелью 1,26мкм. Справа синусоидальный.

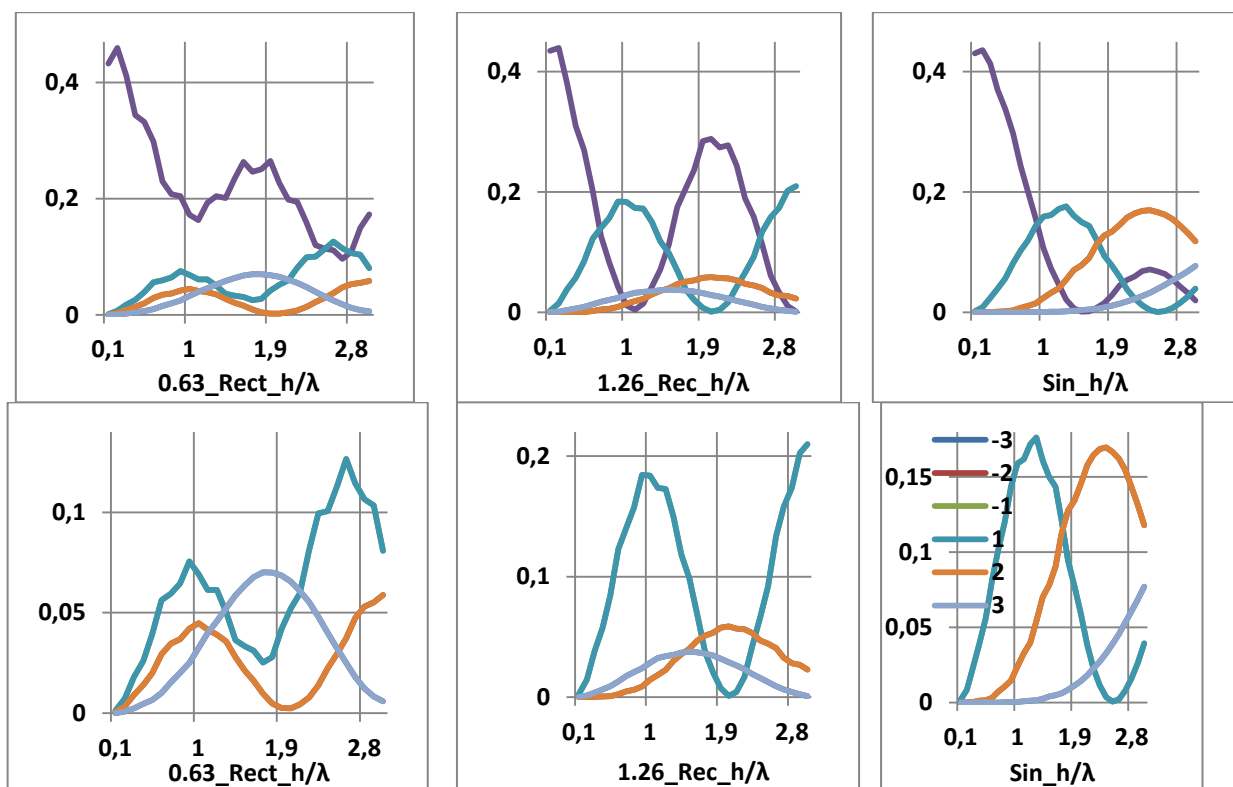


Рис.3.5.3.3.б. Интенсивности дифракционных максимумов для прошедшей ТМ волны, в зависимости от глубины решетки, выраженной в длинах волн (h/λ). Слева прямоугольный рельеф с шириной щели 0,63мкм, посередине прямоугольный с щелью 1,26мкм. Справа синусоидальный.

Для обоих типов рельефа: Для ТМ волны не наблюдается зависимости интенсивности дифракционных максимумов от показателей преломления. Расположение максимумов такое же (в единицах h/λ) как для середин групп дифракционных максимумов с тем же номером для ТЕ волны. Исходя из того, что середина (в единицах h/λ) группы дифракционных максимумов для ТЕ волны примерно соответствует середине между максимумами для $n_e=1,4$ и $n_e=1,6$ (при $n_0=1,5$) или соответствует $n_0=1,5$ и $n_e=1,5$, то можно отметить, что положение дифракционных максимумов ТМ волны примерно соответствует положению (в единицах h/λ) максимумов для дифракционной решетки без двулучепреломления. Исходя из того, что ТМ волна не изменяет положения своих дифракционных максимумов от показателей преломления, можно пренебречь ими и рассчитывать положение максимумов для ТМ волны при нормальном падении луча света так же, как для обычной (без двулучепреломления) дифракционной решетки для света с круговой

поляризацией. Однако фактическое расположение максимумов для синусоидальной и прямоугольной решетки (с одинаковым периодом и диапазоном глубин) не совпадает, и, следовательно, форма профиля решетки влияет на положение максимумов для ТМ волны и должна учитываться.

Как для прямоугольного, так и для синусоидального рельефа зависимости расположения максимумов от их номеров примерно те же, как и в вышеописанном случае ТЕ волны для этих двух типов рельефа. С ростом номера максимума, он смещается в сторону большего значения h/λ , но для третьего максимума при прямоугольном рельефе это не выполняется (как и в случае ТЕ волны).

3.3. Влияние глубины рельефа

Описанные выше примерно одинаковые закономерности, характерны как для синусоидального, так и для прямоугольного профиля дифракционной решетки с одинаковым периодом и диапазоном глубин. Как показано выше, при малой глубине решетки графики для обеих решеток сходны. Однако расположение максимумов в единицах h/λ , при которых они расположены на графиках, при большой глубине решетки уже значительно различается.

Для разных типов прямоугольного профиля дифракционной решетки с одинаковым периодом и диапазоном глубин, но с разной шириной борозды, при большой глубине решетки уже значительно различается расположение максимумов в единицах h/λ , при которых они расположены на графиках.

Следовательно, основное значение имеет не профиль решетки при малой глубине, а период. При тонком подстилающем слое и при малой глубине профиля суммарная толщина материала двулучепреломляющей решетки будет малая, и в таком случае ситуация скорее может рассматриваться как обычная дифракция из-за малого двулучепреломления.

Результаты могут быть использованы при разработке, усовершенствовании оптических и оптико-электронных приборов обработки и отображения информации.

§4. Дифракционные оптические элементы на ЖК основе

4.1. Микроэлементы ДОЭ с прямоугольным профилем рельефа

Принципы и основы теории построения дифракционных оптических элементов (ДОЭ) рассмотрены в [147-150]. ДОЭ с управляемыми (например, ЖК-электроуправляемыми) микроструктурами, оптически эквивалентными заданным формам оптически анизотропного микрорельефа, способными значительно корректировать свои характеристики по отдельным микроэлементам, из совокупности которых состоит ДОЭ. При этом управление микроэлементами ДОЭ может быть аналогично управлению пикселями дисплея.

С изменением фазовой задержки слоя ЖК изменяются свойства микроэлемента ДОЭ, а фазовая задержка зависит от изменения пространственного распределения директора ЖК, в свою очередь зависящего от изменения приложенного поля. График зависимости фазовой задержки от горизонтальной координаты вдоль решетки (поперек борозд) в случае, если толщина слоя ЖК одинакова по всему полю микроэлемента, выглядит так же, как график зависимости необыкновенного показателя преломления от той же координаты.

Выше в данной части работы был рассмотрен прямоугольный оптически анизотропный рельеф. Его оптическим эквивалентом может быть ступенчатый микрорельеф (прямоугольный), бороздки которого заполнены нематическим ЖК, в предположении, что обыкновенный показатель преломления ЖК и твердого материала совпадают.

Если боковые стенки не оказывают существенного ориентирующего влияния, на дне канавок находятся электроды и, например, естественная

ориентация ЖК материала планарная (параллельная дну канавок), то тогда это можно реализовать на практике, при включении поля избирательно в некоторых канавках, ориентация изменится на гомеотропную, как показано на рис.3.5.4.1,

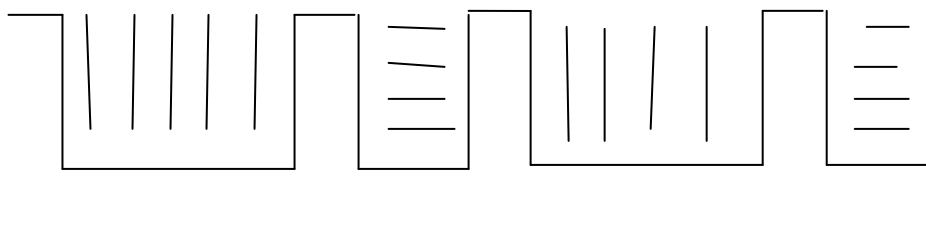


Рис.3.5.4.1. Микрорельеф, бороздки заполнены ЖК.

Можно сформировать микроэлемент ДОЭ, эквивалентный прямоугольному с произвольным профилем, например ступенчатым, зависящим от переключения электроуправляемых элементов до полной переориентации (гомеотропной) или до частичной (наклонной). В зависимости от направления оптической оси в твердом материале, можно получить (при несовпадении оси в материале с плоскостью директора ЖК) суперпозицию двух дифракционных картин с разной поляризацией, то есть разные дифракционные максимумы будут различно поляризованы. Таким образом, возможности управления ориентацией ЖК и оптическими свойствами микроэлемента ДОЭ достаточно обширные.

4.2. Синусоидальный профиль

Микроэлемент ДОЭ, эквивалентный криволинейному с произвольным профилем (в том числе синусоидальным), зависящим от выбора углового диапазона, можно сформировать для S и для B распределения. Рельеф, который оптически аналогичен синусоидальному показан на рис.3.5.4.2 (микро- или нанорельеф), сформирован пространственным распределением директора ЖК и жестким рельефом твердой подложки. На покрытых ориентантом боковых поверхностях рельефа обозначен θ_0 приповерхностный угол ЖК.

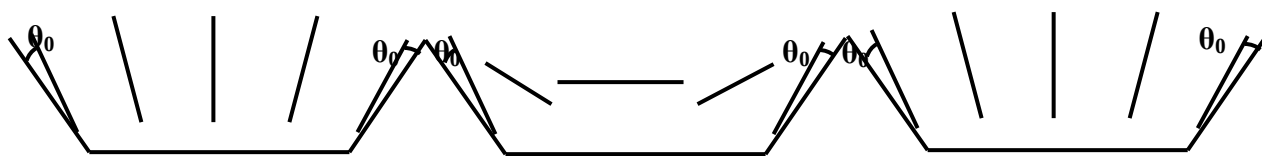


Рис.3.5.4.2. Рельеф, оптически аналогичный синусоидальному, сформирован как жестким рельефом твердой подложки, так и пространственным распределением директора ЖК.

В процессе формирования жесткого рельефа целиком из одного материала (наращивания материала на выступах или удаления материала из выемок) ориентирующие свойства может приобрести поверхность. Также можно специально подвергнуть различные поверхности механообработке, покрытию ориентантом.

Если ввести в конструкцию электроды, то можно полем регулировать конфигурацию директора ЖК и оптически эквивалентный профиль рельефа. Результаты компьютерного моделирования дифракционных свойств для различных профилей рельефа были приведены выше.

4.3. Трапециевидный профиль

Трапециевидному элементу микрорельефа ЖК микроэлемент соответствует, если от координаты по оси, перпендикулярной линиям рельефа, линейна зависимость необыкновенного показателя преломления. Для случая **S** распределения на рис.3.5.4.3.а изображен ЖК микроэлемент ДОЭ, то есть бороздка, заполненная ЖК. Для случая **B** распределения - на рис.3.5.4.3.б и для случая **H** распределения - на рис.3.5.4.3.в. ЖК микроэлемент эквивалентен соответствующему форме кривой зависимости необыкновенного показателя преломления от координаты элементу микрорельефа с геометрическим профилем.

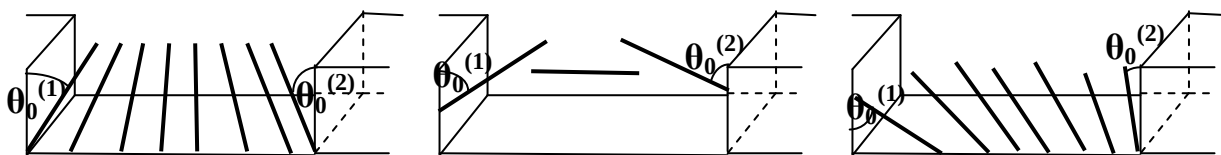


Рис.3.5.4.3. Слева направо: S, V, H распределения директора по горизонтальной координате.

Можно сформировать микроэлемент ДОО, эквивалентный трапецевидному, как показано на рис.3.5.4.4, при различных диапазонах краевых углов, как для **S** и для **V** распределения, так для **H** распределения. На рис.3.5.4.5 показан рельеф, который оптически аналогичен трапецевидному.

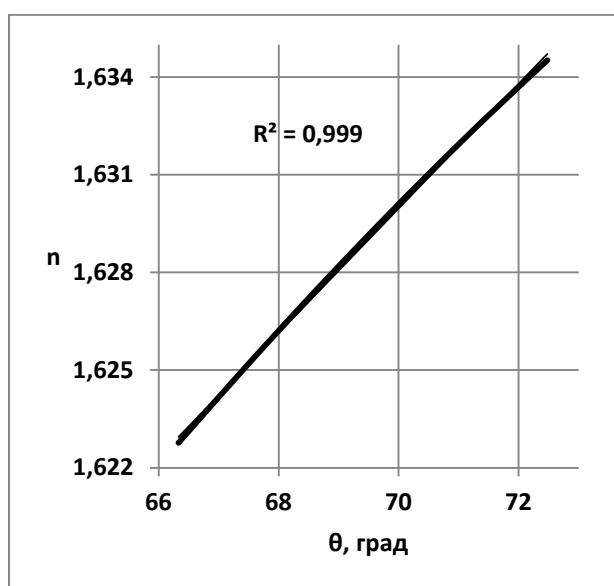
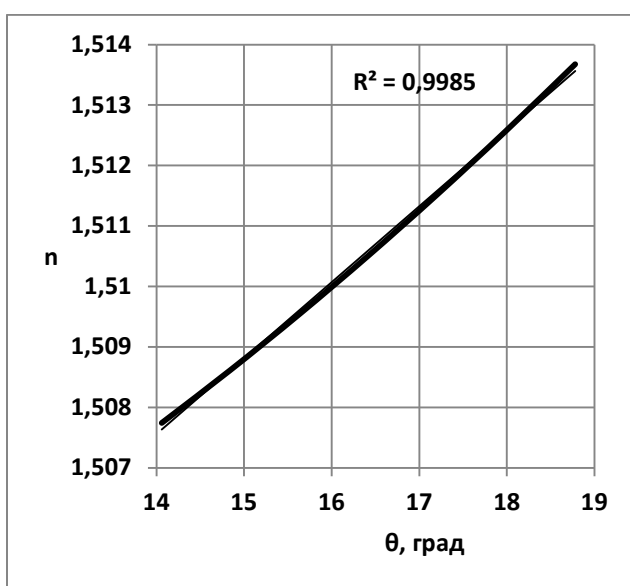


Рис.3.5.4.4. Зависимости показателя преломления от горизонтальной координаты при $K_{33}/K_{11}=0,5$. Показано сравнение с линейной функцией. Выбранные угловые диапазоны обеспечивают соответствие трапецевидному рельефу

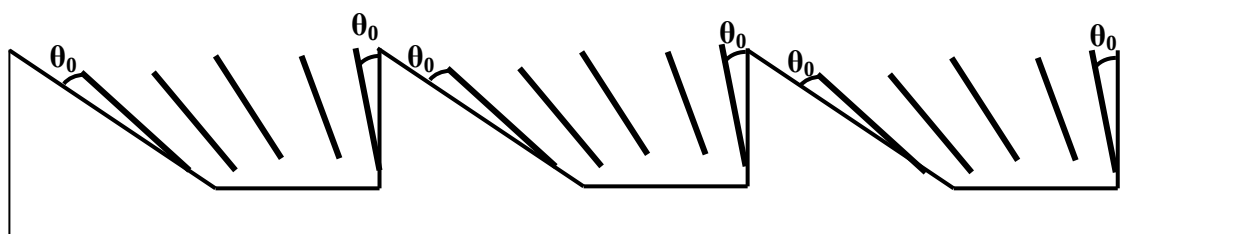


Рис.3.5.4.5. Рельеф, оптически аналогичный трапецевидному, сформирован как жестким рельефом твердой подложки, так и пространственным распределением директора ЖК

Показатели преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.65$. Распределение директора ЖК зависит от коэффициентов упругости K_{33} и K_{11} , оно рассмотрено при $K_{33}/K_{11}=0,5$. Приведен параметр R^2 , показывающий расхождение с линейной функцией.

4.4. ДОЭ на основе односторонне ориентированной ЖК ячейки

Предложена структура ДОЭ (рис.3.5.4.6) 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.3.5.4.6, на верхней и нижней стороне каждого субэлемента. Поскольку, как показано в Главе 3, необходимы очень малые управляющие поля для обеспечения в слое ЖК разности фаз Φ в пределах до $\pi/2$, то практически представляется возможным при разности фаз Φ в указанных пределах и при различии Φ на смежных субэлементах ДОЭ порядка $\pi \cdot 10^{-2}$ пренебречь разницей в напряженности поля в смежных субэлементах и считать, что они не будут существенно искажать свои оптические характеристики. Поэтому предложено, как отмечено выше, объединить субэлементы в слой ЖК в объеме одной достаточно протяженной ячейки.

Управление поляризацией обеспечивается управлением фазовыми задержками $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \Phi_{i+1}, \dots, \Phi_{n-1}, \Phi_n$. Синусоидальный рельеф, как показано в Главе 2, в используемой расчетной методике представляется мелкоступенчатым (синусоида представлена большим числом ступеней) и тоже может быть обеспечен данным ДОЭ. Таким образом, можно, например, преобразовать нормально падающий на ДОЭ луч света с поляризацией в плоскости под углом 45° к направлению линий оптического рельефа ДОЭ в дифракционные картины, смоделированные и изображенные выше.

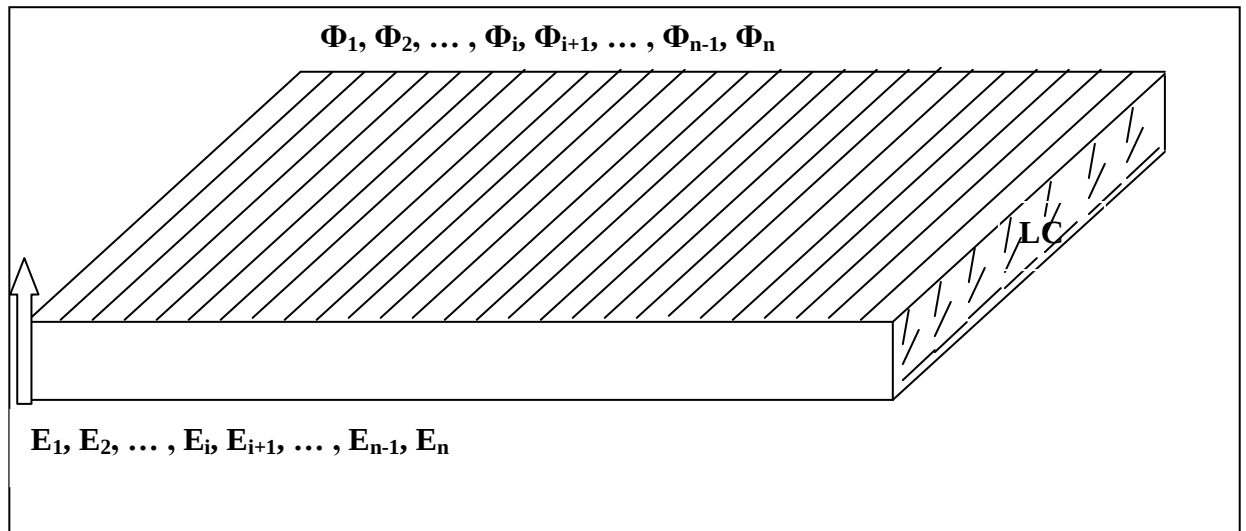


Рис.3.5.4.6. Структура ДОЭ, состоящего из вышеописанных ячеек ЖК. Ячейки объединены в слой ЖК. Управление парными прозрачными электродами, расположенными на верхней и нижней стороне каждого субэлемента и создающими в субэлементах напряженность поля $E_1, E_2, \dots, E_i, E_{i+1}, \dots, E_{n-1}, E_n$ для обеспечения разности фаз $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \Phi_{i+1}, \dots, \Phi_{n-1}, \Phi_n$ в пределах до $\pi/2$, при различии Φ на смежных субэлементах ДОЭ порядка $\pi \cdot 10^{-2}$.

Глава 4. Физические свойства объемно неоднородных оптически анизотропных ЖК структур для элементной базы приборов, измерительно-расчетные методики определения ряда их параметров

Часть 1. Линзы на основе жидких кристаллов с неоднородным радиальным распределением директора

§1. Введение

В [146] рассмотрены принципы и основы теории построения адаптивных линз (АЛ), а также тенденции их развития: увеличение апертуры, быстродействия и повышение качества изображения [146-150]. Изменение фокусного расстояния АЛ осуществляется изменением параметров электрического поля (амплитуда, частота).

ЖК линза соответствует сферической линзе, если зависимость фазовой задержки от радиальной координаты квадратична. Если толщина слоя ЖК одинакова по всему полю линзы, и радиальное ориентационное распределение директора одинаково по всему объему ЖК слоя, то, при этих условиях, ЖК линза соответствует сферической линзе, если зависимость необыкновенного показателя преломления от радиальной координаты квадратична.

Если разность показателей преломления возрастает квадратично от центра линзы (имеет форму параболы), то она соответствует сферической рассеивающей линзе. Если разность показателей преломления убывает квадратично от центра линзы (имеет форму параболы), то она соответствует сферической собирающей линзе.

С ростом диаметра микролинзы фокусное расстояние увеличивается. Фокусное расстояние изменяется с изменением фазовой задержки слоя ЖК, а она в свою очередь меняется при изменении пространственного распределения директора ЖК, зависящего (в случае управляемой ЖК линзы) от приложенного поля.

§2. Неоднородные ЖК структуры, формирующие микролинзу

Нематические жидкокристаллические структуры с неоднородным распределением директора рассмотрены выше. Предлагаемая ЖК структура (упорядоченный блок микролинз) изображена на рис.4.1.1. Это матрица из цилиндрических пор с ЖК микролинзами в них. Блок микролинз установлен на заранее определенном расстоянии перед матрицей фотоэлементов цифрового фотоаппарата. Расстояние (толщина прозрачного слоя между матрицей линз и матрицей фотоэлементов) выбрано с учетом фокусного расстояния микролинз. Образуя матрицу с такими же пространственными характеристиками, по осям микролинз стоят фотоэлементы.

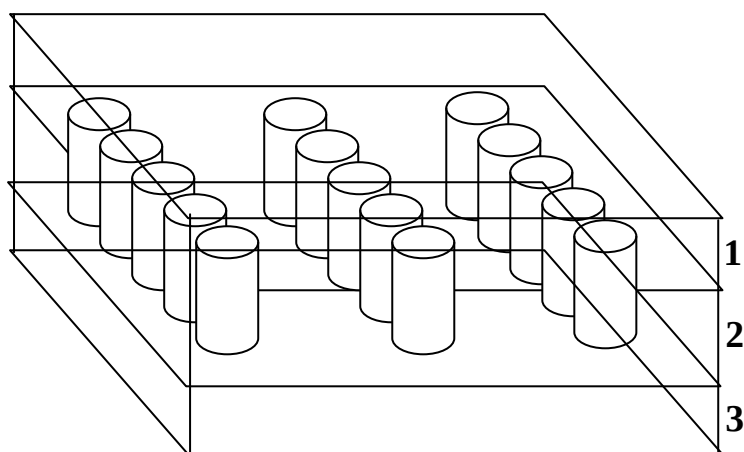


Рис.4.1.1. обозначения: **1** прозрачный слой сверху (перед матрицей микролинз); **2** непрозрачный слой, содержащий блок микролинз (цилиндрические поры, заполненные ЖК); **3** прозрачный слой, отделяющий микролинзы от фотоэлементов. Фотоэлементы не показаны на рисунке. Свет падает сверху вниз.

Более подробно отдельно взятая ЖК микролинза, то есть цилиндрическая пора, заполненная ЖК, изображена на рис.4.1.2 для случая S распределения, то есть у поверхности цилиндра (приповерхностный) угол директора ЖК отличается от угла посередине (на оси цилиндра, то есть линзы) и при этом угол посередине равен нулю, то есть директор параллелен оси цилиндра и, следовательно, линзы.

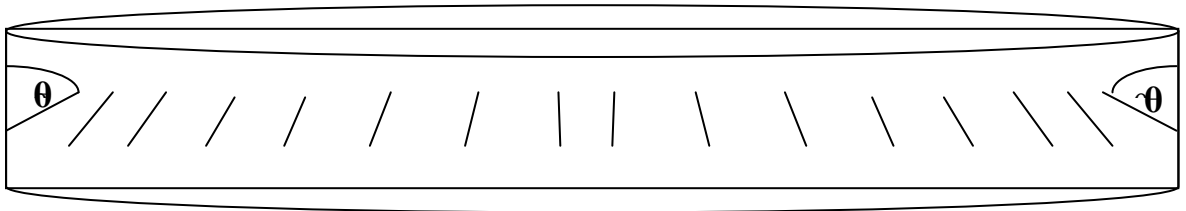


Рис.4.1.2. ЖК микролинза, то есть цилиндрическая пора, заполненная ЖК, для случая **S** распределения, угол посередине равен нулю, то есть директор параллелен оси цилиндра и, следовательно, линзы.

Распределение директора ЖК зависит от коэффициентов упругости K_{33} и K_{11} и, следовательно, от их отношения K_{33}/K_{11} . Оно рассмотрено для **S** и **B** распределения выше от $K_{33}/K_{11}=0,5$ до $K_{33}/K_{11}=3$.

В отличие от предложенного в [146], можно получить микролинзу, аналогичную сферической и без приложения поля. Как уже упоминалось выше, ЖК линза соответствует сферической линзе, если зависимость необыкновенного показателя преломления от радиальной координаты квадратична. В данной работе впервые предложены микролинзы ЖК **S** и **B** типов.

§3. Микролинзы ЖК **S** и **B** типов

Были смоделированы зависимости показателя преломления от радиальной координаты для различных ЖК линз. На рис.4.1.3 приведены результаты моделирования для различных ориентационных распределений **S** типа и на рис.4.1.4 для **B** типа, при различных приповерхностных углах директора. Результаты показаны для различных значений отношения коэффициентов упругости в пределах от $K_{33}/K_{11}=0,5$ до $K_{33}/K_{11}=3$.

Показатель преломления n вычисляется [146] по формуле:

$$n = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} \quad (4.1.1.)$$

где угол θ зависит от радиальной координаты. Приняли $n_o=1,5$; $n_e=1,65$.

Вычисленный как функция от угла наклона директора показатель преломления n используем для нахождения разности показателей преломления $\Delta n = n - n_o$ [146]. Обычно $\Delta n = n_e - n_o$, то есть вычисленный показатель n по смыслу соответствует необыкновенному показателю n_e .

Как показано выше, угол наклона директора ЖК при K_{33}/K_{11} отличным от единицы распределен по радиальной координате нелинейно. В связи с этим на рис.4.1.3 и рис.4.1.4 по горизонтальной оси указаны углы наклона директора. Они распределены вдоль горизонтальной оси неравномерно, в соответствии с нелинейностью их зависимости от радиальной координаты, для которой по горизонтальной оси выбран линейный масштаб. Для зависимости показателя преломления от радиальной координаты $n(r)$ показано сравнение с квадратичной функцией. Приведен параметр R^2 , показывающий их расхождение. Сама радиальная координата на горизонтальной оси не подписана во избежание загромождения графика. Очевидно, начало отсчета радиальной координаты находится при угле, равном нулю для **S** распределения, и равном 90° для **B** распределения.

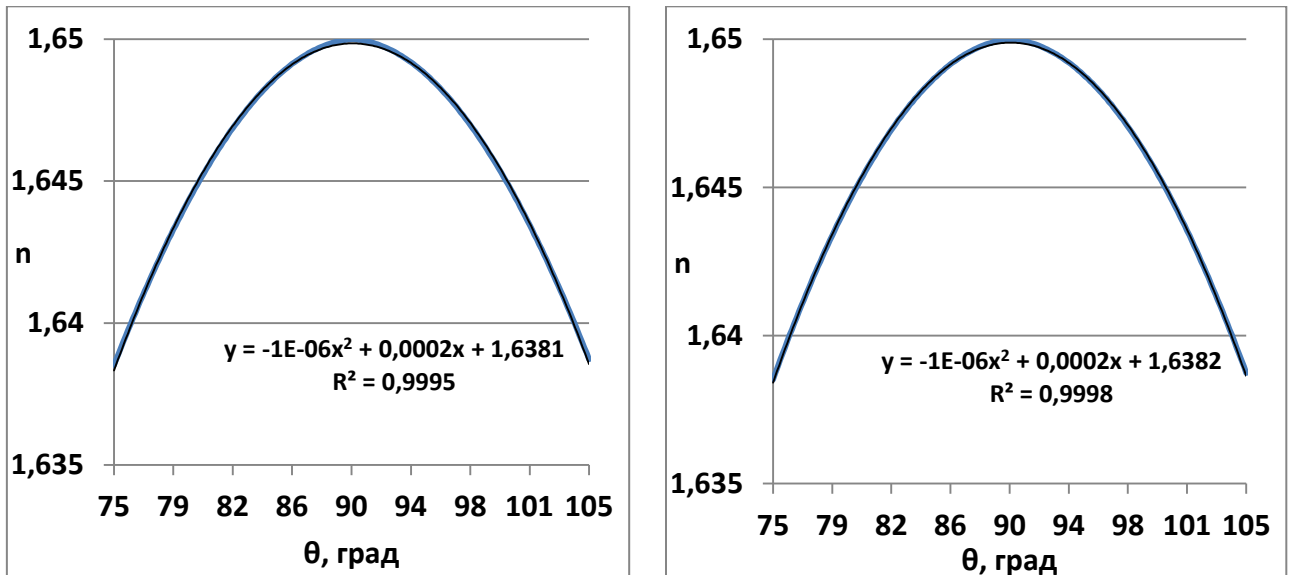


Рис.4.1.3. Зависимость показателя преломления от радиальной координаты и, соответственно, от углового диапазона для микролинзы с **B** распределением директора ЖК. Слева $K_{33}/K_{11}=0,5$. Справа $K_{33}/K_{11}=3$.

Как видно из рис.4.1.3, квадратична зависимость показателя преломления от радиальной координаты (то есть микролинза ЖК аналогична сферической линзе) при небольших угловых диапазонах. Такие приповерхностные углы для **B** распределения вполне реализуемы на практике выбором покрытия (ориентанта) цилиндрической поверхности и механообработкой (формированием микрорельефа). Так как разность показателей преломления убывает квадратично от центра линзы (имеет форму параболы), то она соответствует сферической собирающей линзе.

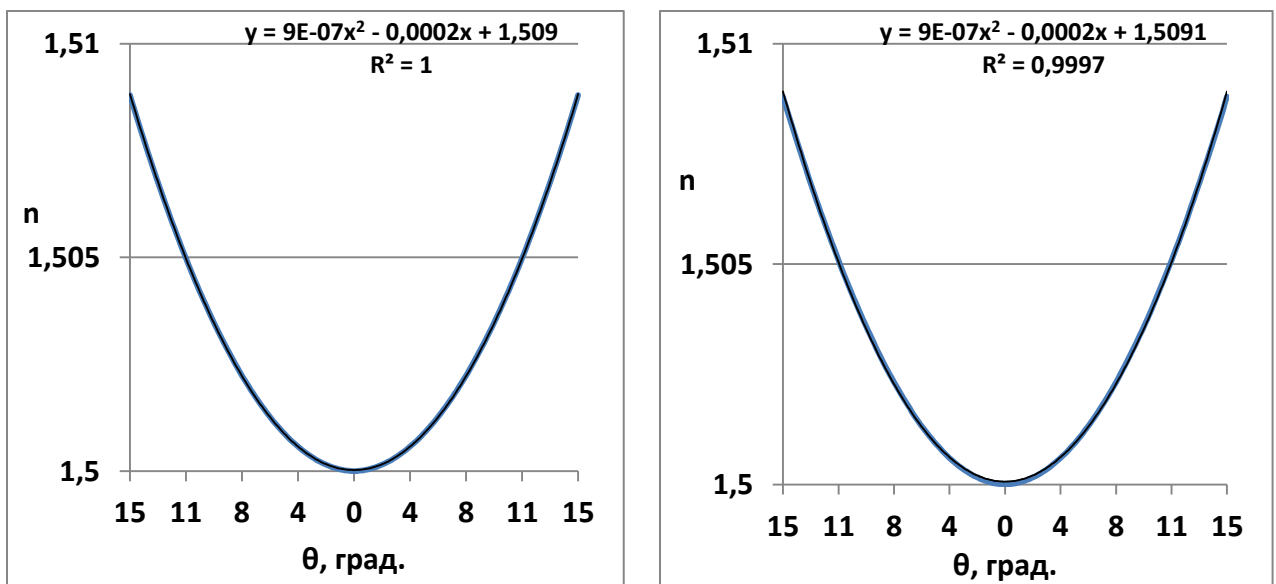


Рис.4.1.4. Зависимость показателя преломления от радиальной координаты и, соответственно, от углового диапазона для микролинзы с **S** распределением директора ЖК. Слева $K_{33}/K_{11}=0,5$. Справа $K_{33}/K_{11}=3$.

Как видно из рис.4.1.4, квадратична зависимость показателя преломления от радиальной координаты (то есть микролинза ЖК аналогична сферической линзе) при небольших угловых диапазонах. Такие приповерхностные углы для **S** распределения вполне реализуемы на практике выбором покрытия (ориентанта) цилиндрической поверхности и механообработкой (формированием микрорельефа). Так как разность показателей преломления возрастает квадратично от центра линзы (имеет форму параболы), то она соответствует сферической рассеивающей линзе.

Для тех диапазонов углов распределений (**S** и **B**), которые неравноценны сферической линзе, можно корректировать оптические свойства электрическим полем [146], как было отмечено выше. Фокусное расстояние (в мкм) для S рассеивающих линз с углами 15-0-15 (при $K_{33}/K_{11}=1.5$) с различными значениями радиуса и толщины приведено ниже в таблице 4.1.1 и на рисунках 4.1.5-6. Интересно, что примерно такие же значения фокусного расстояния вообще характерны для всех образцов S 15-0-15 при различных K_{33}/K_{11} а также для B 75-90-75 при различных K_{33}/K_{11} , только с различным знаком. Ниже на рисунке 4.1.5 показан график зависимости показателя преломления от радиальной координаты и соответствующий ему (при толщине линзы 100 микрон) профиль фронта волны от радиальной координаты.

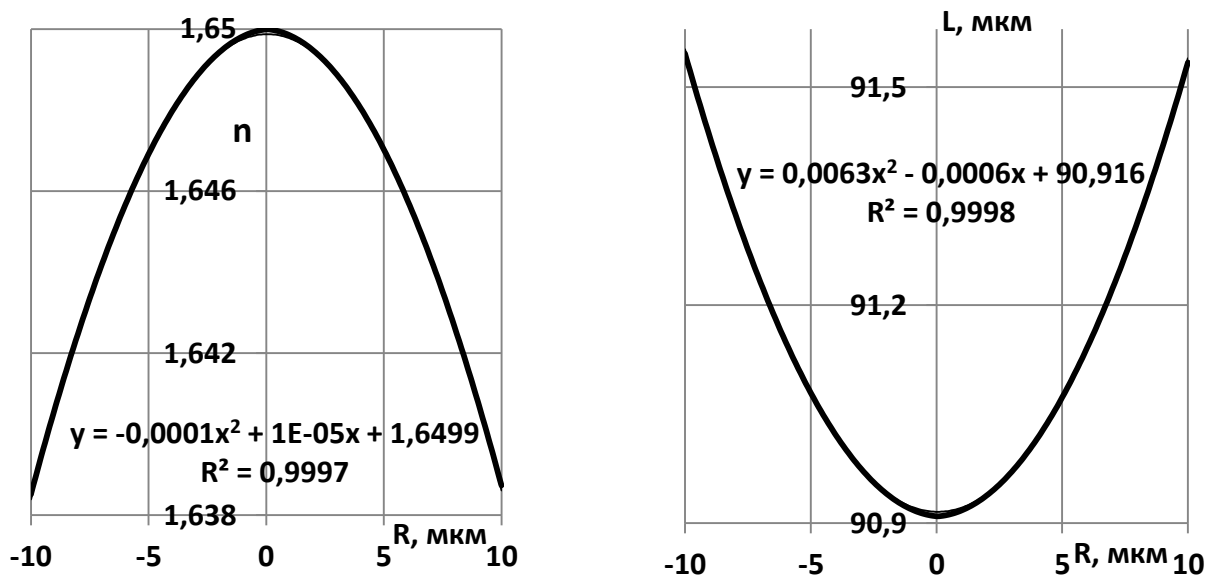


Рис.4.1.5. Зависимость показателя преломления от радиальной координаты и соответствующий ему (при толщине линзы 100 микрон) профиль фронта волны от радиальной координаты.

Для S рассеивающих фокусное расстояние отрицательное (ниже оно в таблице и на графиках по абсолютной величине) а для B собирающих фокусное расстояние положительное. Следовательно, величина K_{33}/K_{11} мало влияет на фокусное расстояние у малоугловых (15-0-15 и 75-90-75) образцов, и при этом фокусное расстояние очень похожее у рассеивающих и собирающих линз с

одинаковыми радиусами и толщиной. Отсюда вывод, что главным образом 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 квазисферический, то имеет место фокусировка прошедшего излучения. Фокусное расстояние (в мкм) отсчитывается от выхода луча из линзы (рис.4.1.6). Предполагается что после выхода из линзы луч в оптически изотропной среде, показатель преломления которой средний между наибольшим и наименьшим (на рис.4.1.6 наибольшее $n=1.509$, наименьшее $n=1.5$, таким образом для расчетов принято $n=1.5045$). В воздухе, соответственно, фокусное расстояние в полтора раза меньше (рис.4.1.6).

Таблица 4.1.1.

Величина фокусного расстояния в зависимости от толщины и радиуса для микролинзы с В 15-0-15 распределением директора ЖК с $K_{33}/K_{11}=0,5$.

<i>Толщина в мкм</i>	Радиус в мкм						
	10	25	40	55	70	85	100
10	830	5560	12500	25000	40000	62500	83330
25	330	2170	5560	10000	15625	23810	33560
40	220	1250	3570	6250	10000	16130	22730
55	160	960	2500	5000	7140	11900	15630
70	120	710	1670	3850	5950	8330	11900
85	100	625	1430	2940	4550	7140	10000
100	90	540	1250	2500	4170	6250	8330

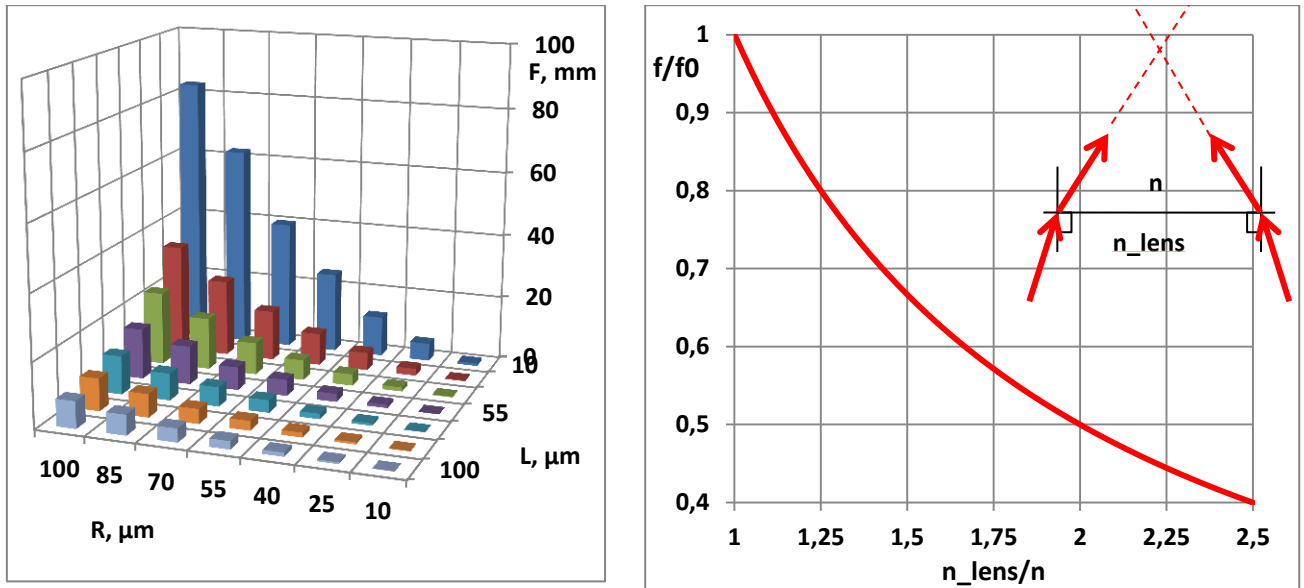


Рис.4.1.6. Зависимость фокусного расстояния. Слева: от толщины и радиуса микролинзы. Справа: от показателя преломления среды.

Рассмотрим случай: падающий параллельно оси цилиндрической поры неполяризованный (с круговой поляризацией) луч света. Половина интенсивности луча (для которой актуален обыкновенный показатель преломления ЖК) пройдет через ЖК линзу, не преломившись, а вторая половина интенсивности (для которой актуален необыкновенный показатель преломления луча) преломится в соответствии с рассмотренным выше. Фронт волны квазисферический (рис.4.1.5), фокусируется в центре сферы, фокусные расстояния на рис.4.1.6. в табл.4.1.1. Сфокусируется в результате свет с круговой поляризацией, как для стеклянной линзы.

§4. Видеосистема на основе линз ЖК, аналогичных сферическим

Очень малый угол обзора (апертура) является характерной особенностью рассмотренных выше линз ЖК. В матрице, состоящей из пар фотоэлемент-линза ЖК, для использования в качестве индивидуальных (на один фотоэлемент) фокусирующих элементов это удобно. Картинку (фотографию), отображаемую на экране по принципу: один фотоэлемент матрицы – один пиксель изображения, такая матрица позволяет получить. Угол обзора,

соответствующий одному фотоприемному элементу, при этом соответствует углу отображения одного пикселя экрана. Матрица приемных элементов (пар линза ЖК – фотоэлемент) изогнута на соответствующий угол для того, чтобы обеспечить требуемое поле зрения фото/видео системы,.

Разумеется, чтобы при уплотнении пикселей в какой-либо части картинки суметь отобразить ее в соответствующем (улучшенном) разрешении отображающий экран должен иметь достаточно высокую разрешающую способность. Фотоприемная матрица изменяет изгиб так, чтобы увеличить плотность фотоприемных элементов в требуемом угловом секторе в случае если требуется уплотнить пиксели изображения на экране в какой-либо его части,

Нередко требует локального повышения разрешающей способности (лицо, номерной знак), если в некоторый момент времени есть объект (автомобиль, человек) в поле зрения видеокамеры (используемой в видеосистемах безопасности). За счет усложнения ее узла крепления (поворотная вокруг одной или даже двух осей) и повышения стоимости оптики камеры (регулируемая в широких пределах) это достигается. Кроме того, остается незафиксированным все, что происходило в это время на периферии ее зоны ответственности, фактически сужается поле зрения камеры.

Стоимость видеосистемы невелика, если линзы энергонезависимые (не требующие средств управления ими), недорогие в изготовлении (при изготовлении пористого листа заданы размеры цилиндрических пор, которые заполняет ЖК). Невелика стоимость гибкого матричного модуля (фактически, листа), с конструктивными элементами его регулируемого неравномерного изгиба. За счет снижения плотности приемных элементов в неприоритетных секторах (но сохраняя за ними видеоконтроль в принципе), предлагаемая в данной работе видеосистема позволяет уплотнить изображение в заданном угловом секторе.

Чтобы соответствовать высококачественному отображающему экрану, число приемных элементов, потенциально, может быть велико. Уплотнение

изображения может производиться в таком случае в отдельных кадрах (коротких последовательностях кадров за время регулирования плотности изображения) в интересах автоматизированных распознающих программ (номера, лица). С разного рода средствами, регистрирующими движение (датчики движения), оплату/предъявление электронных пропусков, и т.д. такая система хорошо совместима.

Только за счет углового размера поля обзора приемного элемента (пары линза ЖК – фотоэлемент) может быть ограничение угловых размеров пикселя изображения. В первую очередь, оно определяется, характеристиками линзы ЖК. В принципе, уплотнение изображения не ограничено изгибом приемной матрицы. Она вся может стать плоской. Следовательно, выгодно малое поле зрения одного приемного элемента.

4.1. Светофильтры в скрещенных поляроидах

Выше рассмотрены нематические ячейки ЖК. На их основе 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.4.1.7.

Как показано на рис.4.1.7, 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. Красный в RGB имеет длину волны $\lambda=650$ нм, светофильтр имеет соответствующий максимум пропускания на 657 нм. Зеленый в RGB имеет длину волны $\lambda=530$ нм, светофильтр имеет соответствующий максимум пропускания на 537 нм. Синий в RGB имеет длину волны $\lambda=460$ нм, светофильтр имеет соответствующий максимум пропускания на 454 нм. 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.

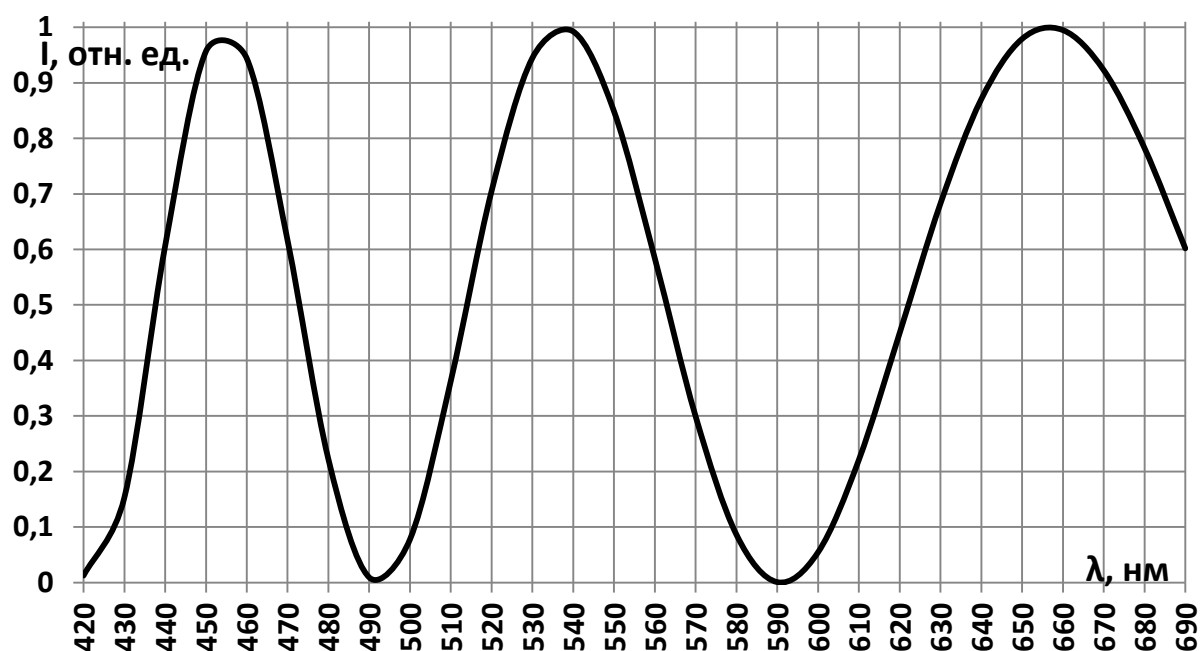


Рис.4.1.7. Интенсивность пропускания нормально падающего луча света от длины волны. Скрещенные поляроиды. Толщина слоя ЖК 19,7мкм.

4.1. В параллельных поляроидах

На основе нематической ячейки ЖК 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, приведенное на рис.4.1.8.

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 $L=21.45$ мкм обеспечивает распределение пропускания от длины волны, соответствующее светофильтру на три RGB цвета. Красный в RGB имеет длину волны $\lambda=650$ нм, светофильтр имеет соответствующий максимум пропускания на 643 нм. Зеленый в RGB имеет длину волны $\lambda=530$ нм, светофильтр имеет соответствующий максимум пропускания на 537 нм.

Синий в RGB имеет длину волны $\lambda=460$ нм, светофильтр имеет соответствующий максимум пропускания на 460 нм. 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.

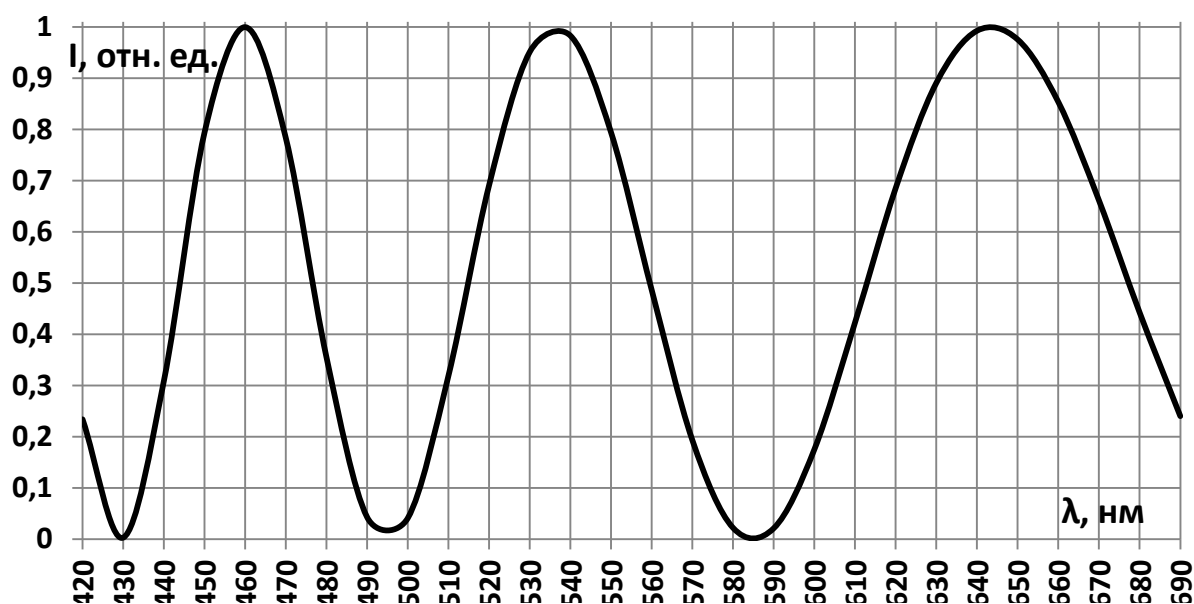


Рис.4.1.8. Интенсивность пропускания нормально падающего луча света от длины волны. Параллельные поляриды. Толщина слоя ЖК 21,45 мкм.

§5. Видеосистема на линзах ЖК, аналогичных цилиндрическим

5.1. Линзы ЖК, аналогичные цилиндрическим

В сочетании с описанными выше светофильтрами удобно использовать линзу ЖК (рис.4.1.9), 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. На рис.4.1.3-5 показаны упомянутая зависимость и фронт волны для собирающей и рассеивающей линз ЖК, аналогичных сферическим. Для линз ЖК, аналогичных цилиндрическим, актуален тот же рисунок, но вместо радиуса линзы на горизонтальной оси следует подразумевать полуширину линзы (расстояние от плоскости симметрии линзы).

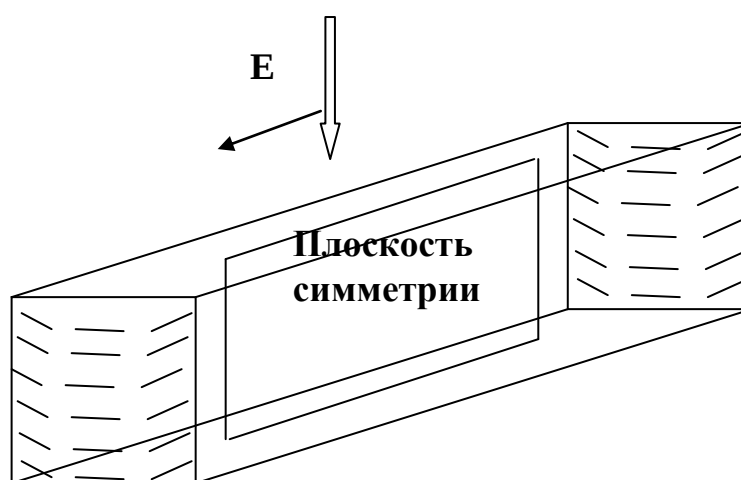


Рис.4.1.9. Линза ЖК. Оптически аналогична стеклянной цилиндрической линзе с плоскостью симметрии, параллельной плоскости поляризации падающего луча

Фронт волны на рис.4.1.5 для линзы ЖК, аналогичной цилиндрической, может считаться в сечении квазикруговым, хотя, в принципе, он параболический. Луч света падает нормально, поляризован перпендикулярно плоскости директора ЖК, пройдет линзу, формируя изображенный на рис.4.1.5 фронт волны. В результате 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.

5.2. Фотоэлементы RGB

Как показано выше, 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 пора матрицы, содержащая светофильтр (ЖК ячейку), линзу (ЖК ячейку) и, на фокусных расстояниях, три фотоприемника, заменяет сразу три монохромных приемных элемента.

5.3 Отражающие (зеркальные) линзы ЖК

Луч света отразится и пройдет еще раз сквозь слой нематического ЖК, если разместить зеркально отражающую поверхность сразу позади линзы (слоя ЖК). Фокусное расстояние будет такое же, как было рассмотрено выше на сквозное пропускание у слоя ЖК вдвое большей толщины. То есть, например, такое же фокусное расстояние, как слой в 10 мкм в линзе на просвет даст слой ЖК в 5 мкм в зеркальной линзе. Естественно, в таком случае глубина поры может быть больше фокусного расстояния, фотоприемник располагается перед линзой.

Часть 2. Диэлектрические свойства ЖК ячеек с различными ориентационными распределениями, приповерхностными углами и упругими характеристиками

2.1. Ячейки ЖК с линейным распределением директора по толщине

§1. Диэлектрические свойства жидких кристаллов (ЖК)

Данная часть посвящена исследованию диэлектрических свойств жидких кристаллов. Решена практическая задача моделирования емкостных свойств ЖК ячеек с различными приповерхностными углами и пространственным ориентационным распределением, в том числе в широком диапазоне упругих свойств ЖК.

Типичная зависимость компонент диэлектрической проницаемости нематического ЖК (4-пентил-4'-цианобифенил, в литературе 5ЦБ или 5СВ) $\epsilon_{\parallel}$ и $\epsilon_{\perp}$ и ее анизотропии $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ приведена в Главе 2. Величина ϵ измеряется мостовым методом. Для ее описания обычно используется теория Майера-Мейера (см. Главу 2). Из нее следует, что обычно диэлектрическая анизотропия пропорциональна первой степени параметра порядка. В ходе эксперимента для гибридных ЖК ячеек получаются результаты, значительно отличающиеся от результатов для ячеек, имеющих области с чистой планарной и чистой гомеотропной ориентацией директора ЖК. Отличие их емкостных свойств связано с тем, что ориентация ЖК в ячейках значительно отличается от ровно планарной или гомеотропной.

В связи с этим целесообразно оценить возможные значения $\Delta\epsilon$ в зависимости от краевых углов в ЖК ячейках в схеме на рис.2.9. При этом предполагается, что краевые углы в одной ячейке одинаковые на обеих ее сторонах и при этом по всей толщине слоя ЖК в ячейке угол наклона директора ЖК такой же, как и краевой угол.

Зависимость $\epsilon(\theta)$ в ЖК ячейке имеет вид:

$$\varepsilon^{eff}(\theta) = (\varepsilon_{\perp}^2 \sin^2 \theta + \varepsilon_{\parallel}^2 \cos^2 \theta)^{1/2} \quad (4.2.1.1)$$

а зависимость $\Delta\varepsilon^{\Phi}(\theta_1, \theta_2)$ имеет вид:

$$\Delta\varepsilon^{\Phi} = \varepsilon^{eff}(\theta_1) - \varepsilon^{eff}(\theta_2) \quad (4.2.1.2)$$

где углы отсчитываются от направления поля в ячейках (то есть между директором ЖК и направлением поля). Так как поле в ЖК ячейках направлено перпендикулярно поверхности ячейки, то углы в формулах (4.2.1.1) и (4.2.1.2) отличаются от угла директора ЖК и могут быть рассчитаны по следующей формуле: $\theta_{\text{диэлектр}} = |\pi/2 - \theta_{\text{ориентац}}|$. Таким образом $\Delta\varepsilon^{\Phi}$ находим как разность между $\varepsilon(\theta)$ ячеек, в одной из которых (почти планарной) угол θ_1 , а в другой (почти гомеотропной) угол θ_2 .

Упомянутые в формуле (4.2.1.2) величины $\varepsilon_{\perp}$ и $\varepsilon_{\parallel}$ вычисляются по формуле (4.2.1.1), при этом при угле $\theta=0$, $\varepsilon(\theta)=\varepsilon_{\parallel}$, а при угле $\theta=90^\circ$, $\varepsilon(\theta)=\varepsilon_{\perp}$. Таким образом, для пары ориентированных гомеотропно и планарно ЖК ячеек $\Delta\varepsilon^{\Phi}(\theta_1, \theta_2) = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ и тогда $\Delta\varepsilon^{\Phi} = \Delta\varepsilon$. На рис.4.2.1.1 показана зависимость $\Delta\varepsilon^{\Phi}$ от краевых (ориентационных) углов в ЖК ячейках.

Введено понятие диэлектрического отклика D_r (dielectric response) (4.2.1.3.a) в пространственно неоднородной анизотропной среде, пропорционального $\Delta\varepsilon^{\Phi}$ и обратно пропорционального сумме компонент диэлектрической проницаемости.

$$D_r = \frac{\varepsilon^{eff}(\theta_1) - \varepsilon^{eff}(\theta_2)}{\varepsilon^{eff}(\theta_1) + \varepsilon^{eff}(\theta_2)} \quad (4.2.1.3.a)$$

$$V_{OUT} = D_r V_{IN} \quad (4.2.1.3.b)$$

Как видно из рис.4.2.1.1, при отклонениях до 10° от правильной ориентации (планарной или гомеотропной), изменение $\Delta\varepsilon^{eff}(\theta_1, \theta_2)$ невелико (см. табл.4.2.1.1) и составляет менее 10%. Так, при отклонениях по 5° у обеих ячеек $\Delta\varepsilon^{eff}(5^\circ, 85^\circ) = 0,9818 \Delta\varepsilon^{eff}(0^\circ, 90^\circ)$ и отличается менее чем на 2%.

Таким образом, если в заранее откалиброванную мостовую схему (рис.2.9) поместить вместо одной пары ячеек C_1, C_4 или C_2, C_3 новые (одинаково изготовленные) ячейки (пару ячеек), то по изменению отклика D_r можно определить изменение $\Delta\varepsilon^{eff}$, а следовательно, краевой угол ЖК ячейки.

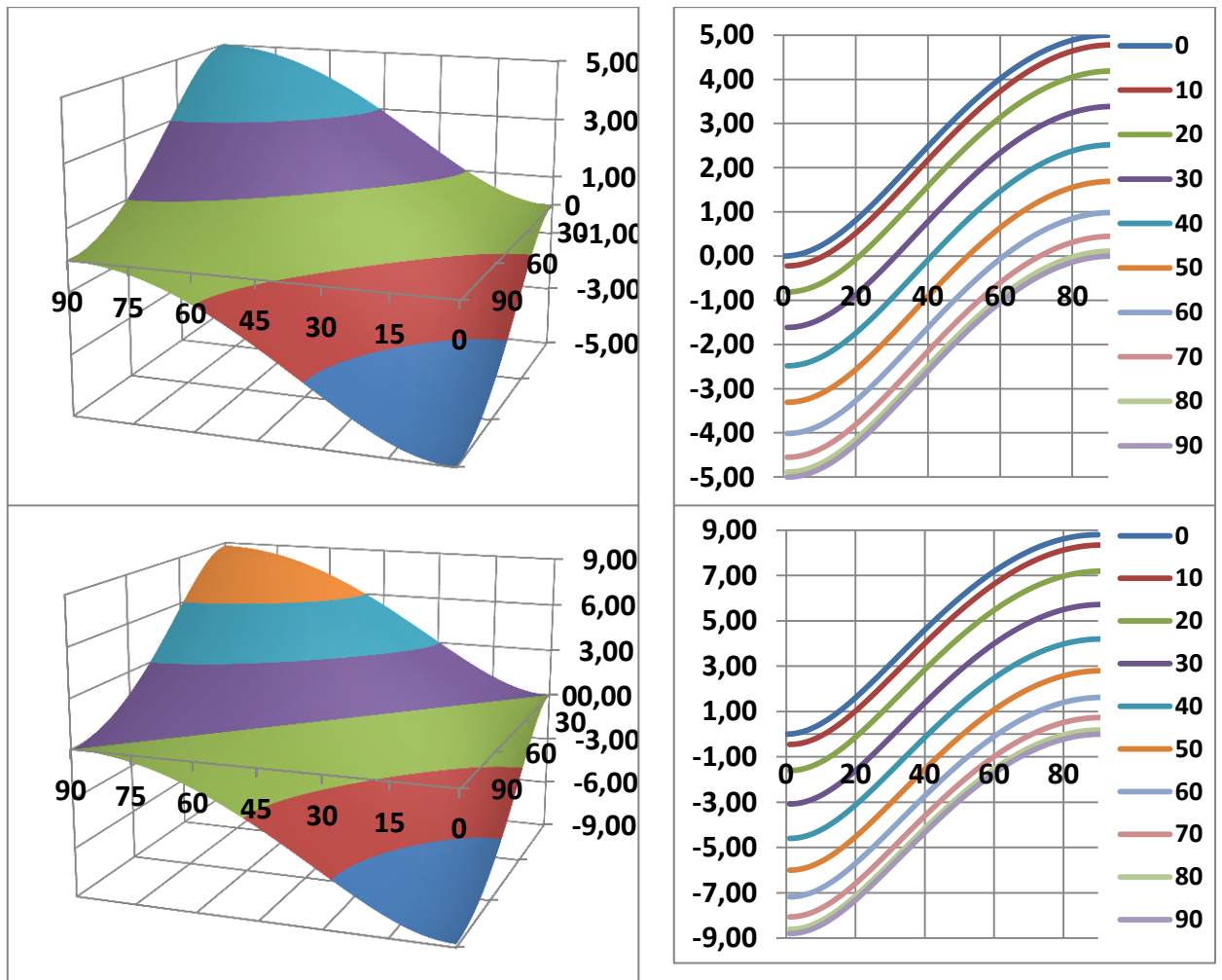


Рис.4.2.1.1. $\Delta\epsilon^{\text{eff}}(\theta_1, \theta_2)$ от приповерхностных углов в ячейках, сверху $\epsilon_{||}=10$, $\epsilon_{\perp}=5$, снизу $\epsilon_{||}=14,4$, $\epsilon_{\perp}=5,6$ (ЖК-1289 при 23°C).

Для исследуемой ячейки необходимо предварительно определить ее толщину, емкость и площадь поверхности. Тогда неизвестной величиной, влияющей на отклик D_r , останется $\Delta\epsilon^{\text{eff}}$, которое и измеряется с помощью мостовой схемы (рис.2.9). Учитывая погрешности, реально это можно сделать для ячеек с достаточно большими (больше 10°) отличиями приповерхностных углов от правильной ориентации (планарной и гомеотропной).

Иначе говоря, данный подход стоит применять к ячейкам с приповерхностными углами (одинаковыми на противоположных сторонах ячейки) от 10° до 80° . Если же измерить приповерхностный угол в ячейках другим способом, то тогда можно с помощью мостовой схемы определять параметры ячейки, такие как: толщину (если известна площадь); площадь (если известна толщина).

Таблица 4.2.1.1.

$\Delta\epsilon^{\text{eff}}(\theta_1, \theta_2)$ для ЖК-1289 $\epsilon_{\parallel}=14,4$, $\epsilon_{\perp}=5,6$ (при 23°C) и его сравнение с случаем идеальной ориентации (0°, 90°)

	80°		85°		90°
0°	8,34	0,9477	8,68	0,9864	8,80
5°	8,30	0,9432	8,64	0,9818	8,75
10°	8,16	0,9273	8,50	0,9659	8,61

Если есть дефекты ориентирующего покрытия, образуются произвольно ориентированные ЖК домены, и тогда под углом, определяемым по вышеизложенной методике, подразумевается эквивалентный угол для ячейки.

§2. Принцип работы ячейки

Электрическая схема ячейки показана в Главе 2 на рис.2.9. Рабочей средой ячейки является ЖК с положительной диэлектрической анизотропией ($\Delta\epsilon=\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}>0$, где $\epsilon_{\parallel}$ и $\epsilon_{\perp}$ - параллельная и перпендикулярная составляющие диэлектрической проницаемости, соответственно). При приложенном к ячейке электрическом потенциале директор ЖК изменяет распределение углов наклона директора ЖК по толщине ячейки, что меняет диэлектрические свойства ячейки. При изменении температуры изменяются параметры, характеризующие упорядочение молекул внутри жидкого кристалла. Это параметр порядка, анизотропия диэлектрической проницаемости и величина двулучепреломления. Для нас важно изменение диэлектрических свойств, изменение же других свойств не должно влиять на опыт.

$$C_1 = C_4 = \frac{\epsilon_{\perp} \epsilon_0 S}{d} \quad C_2 = C_3 = \frac{\epsilon_{\parallel} \epsilon_0 S}{d} \quad (4.2.1.4)$$

Следовательно, на эксперимент накладываются определенные ограничения. Они описаны в Главе 2. Поскольку зависимость отклика D_r зависит от $\epsilon_{\perp}$, $\epsilon_{\parallel}$, то можно оценить зависимость D_r от краевых углов в ячейках (рис.4.2.1.2). При этом предполагается, что углы в одной ячейке одинаковые на

обеих ее сторонах и при этом по всей толщине слоя ЖК в ячейке угол наклона директора ЖК такой же, как и приповерхностный угол.

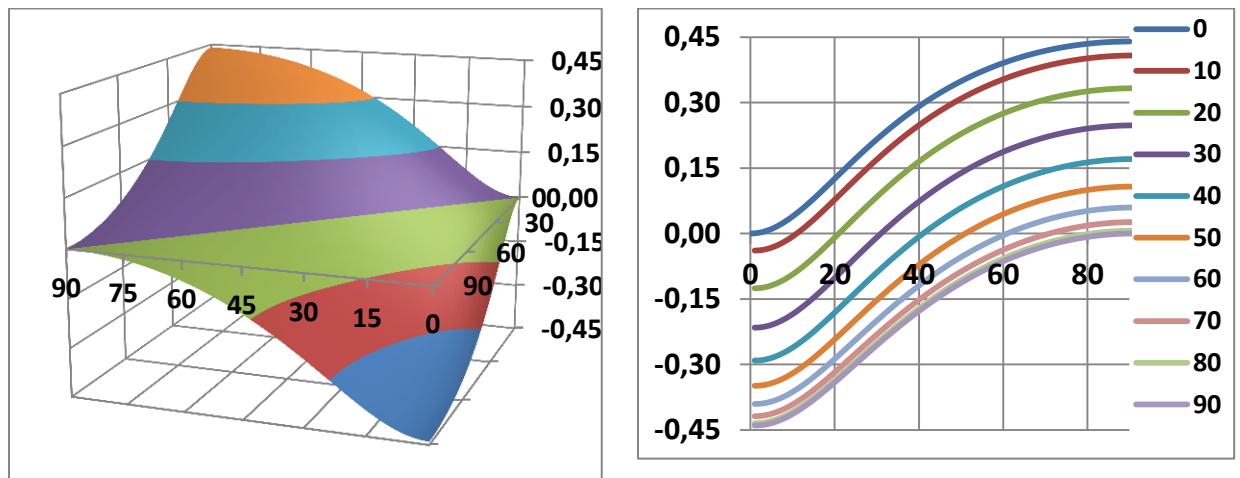


Рис.4.2.1.2. Зависимость D_r от приповерхностных углов, для однородных ячеек. для ЖК-1289 $\epsilon_{//}=14,4$, $\epsilon_{\perp}=5,6$ (при 23°C)

2.2. Ячейки ЖК с нелинейным распределением директора по толщине

§1. Распределение угла наклона директора ЖК по толщине ячейки

В Главе 3 показано распределение директора ЖК по толщине ячейки, смоделированное для случая нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$. Уточнены диапазоны параметров ячеек нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$, при которых актуальны модели их оптических свойств, разработанные в данной диссертационной работе. Случай нематических ЖК с $K_{11} \neq K_{33}$ важен в практическом применении.

§2. Зависимость диэлектрических свойств от угла наклона для ячеек с различными типами неоднородных распределений угла наклона директора ЖК

Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ^{eff} от угла преднаклона θ_0 была количественно определена для ЖК ячеек с различными законами распределения угла наклона по толщине ячейки. Были исследованы два типа

ячеек с симметричными граничными условиями: HybS и HybB. На рис.4.2.2.1, рис.4.2.2.2 и рис.4.2.2.3. изображена типичная зависимость $\epsilon^{\text{eff}}(K_{33}/K_{11})$ для S, B и Hyb90 распределений для $\epsilon_{//}=14,4$, $\epsilon_{\perp}=5,6$ (ЖК-1289 при 23°C).

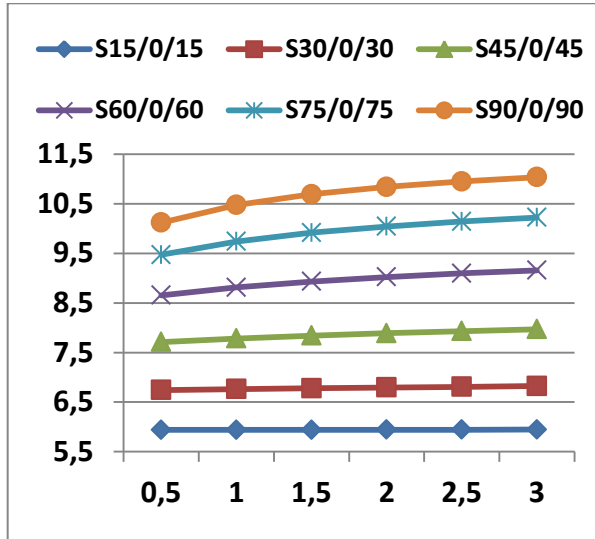


Рис.4.2.2.1. Зависимость $\epsilon^{\text{eff}}(K_{33}/K_{11})$ для S распр.-я с симм.-ми приповерхн.-ми углами от 15° до 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

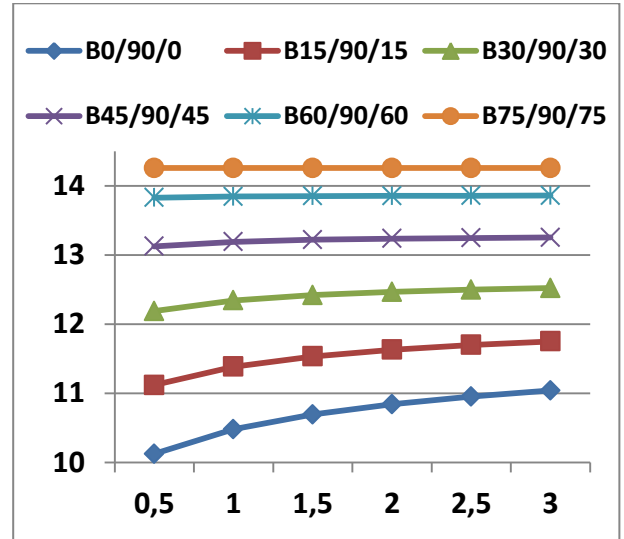


Рис.4.2.2.2. Зависимость $\epsilon^{\text{eff}}(K_{33}/K_{11})$ для B распр.-я с симм.-ми приповерхн.-ми углами от 0° до 75° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3.

Хорошо видно что ϵ^{eff} остается близка к случаю $K_{33}/K_{11}=1$ для многих смоделированных распределений. Одноконстантная модель при разнице приповерхностных углов и угла посередине ячейки до 30° вполне пригодна. Предложенная методика определения диэлектрических свойств ЖК адекватна для реально существующих ЖК систем в диапазоне разности приповерхностных углов и угла посередине ячейки не менее чем в 30°.

Показана возможность задания диэлектрических свойств ЖК ячейки S и B типов путем задания величины приповерхностного угла.

Хорошо видно, что ϵ^{eff} остается близка к случаю $K_{33}/K_{11}=1$ для многих смоделированных распределений. Одноконстантная модель вполне пригодна при разнице приповерхностных углов до 30°.

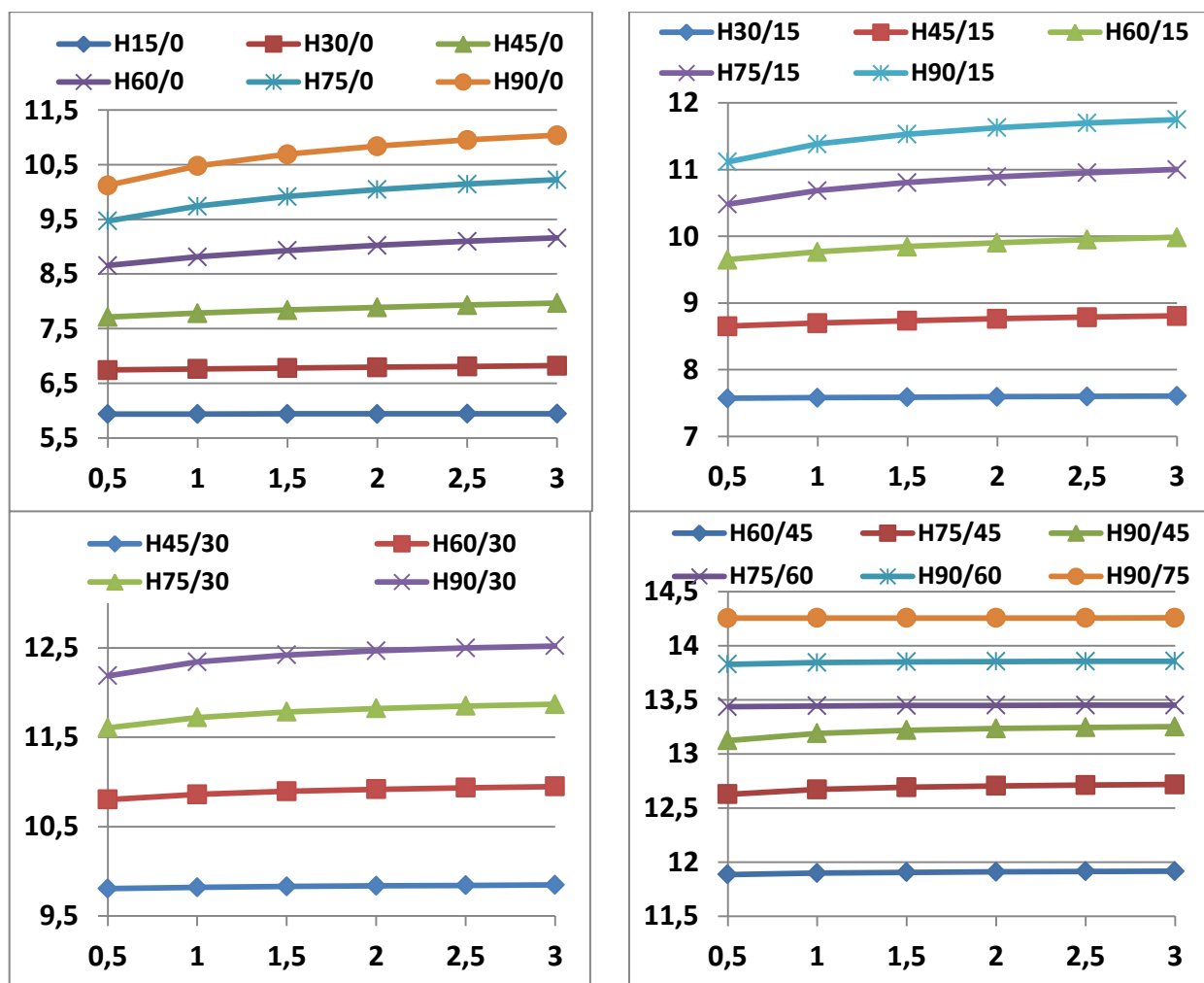


Рис.4.2.2.3. Зависимость $\epsilon^{\text{eff}}(K_{33}/K_{11})$ для Нуб90 распределения с несимметричными приповерхностными углами (ориентационными) от 0° до 90° и K_{33}/K_{11} от 0,5 до 3. $\epsilon_{//}=14,4$, $\epsilon_{\perp}=5,6$ (ЖК-1289 при 23°C).

Таким образом, показана возможность задания диэлектрических свойств ЖК ячейки Нуб90 типа путем задания величины приповерхностного угла. При управлении элементами ЖК дисплеев при помощи изменения величины приложенного поля это может иметь практическое значение.

На рис.4.2.2.4 показана величина отклика D_r для различных S и B распределений, рассмотренных выше. Над каждым графиком указана величина K_{33}/K_{11} . В таблице 4.2.2.1 приведены данные для отклика D_r , рассчитанного по одноконстантной модели ЖК ячеек. Они же использованы для соответствующего из графиков на рис.4.2.2.4. Как показано на рис.4.2.2.4, вполне можно пользоваться одноконстантной моделью для расчета отклика (D_r)

при различных упругих характеристиках ЖК материала и S или B конфигурациях.

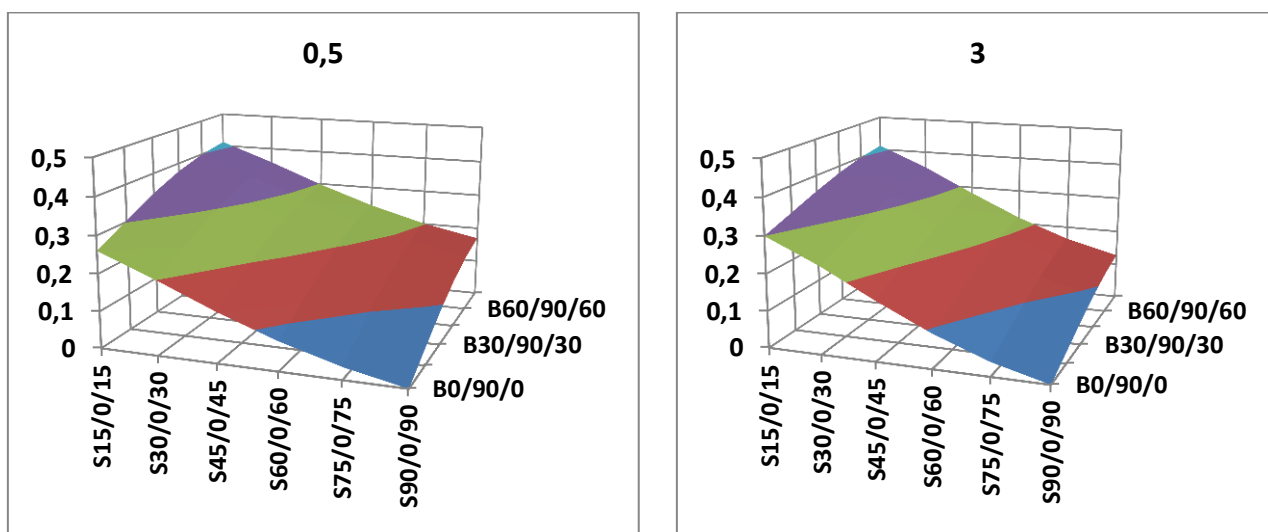


Рис.4.2.2.4. Величина отклика D_r для различных S и B распределений при значениях K_{33}/K_{11} 0,5 и 3. $\varepsilon_{//}=14,4$, $\varepsilon_{\perp}=5,6$ (ЖК-1289 при 23°C).

Таблица 4.2.2.1.

Величина D_r , рассчитанная при значении $K_{33}/K_{11} = 1$. $\varepsilon_{//}=14,4$, $\varepsilon_{\perp}=5,6$.

	<i>S15/0/15</i>	<i>S30/0/30</i>	<i>S45/0/45</i>	<i>S60/0/60</i>	<i>S75/0/75</i>	<i>S90/0/90</i>
<i>B0/90/0</i>	0,27	0,21	0,15	0,09	0,04	0
<i>B15/90/15</i>	0,31	0,25	0,19	0,13	0,08	0,04
<i>B30/90/30</i>	0,35	0,29	0,23	0,17	0,12	0,08
<i>B45/90/45</i>	0,38	0,32	0,26	0,20	0,15	0,11
<i>B60/90/60</i>	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,14
<i>B75/90/75</i>	0,41	0,36	0,29	0,24	0,19	0,15

2.3. Зависимости ориентационно-диэлектрических свойств ЖК ячеек от температуры

§1.Зависимость диэлектрических свойств от температуры

Ниже, на рис.4.2.3.1, показана зависимость отклика D_r от температуры для схемы с ячейками, содержащими ЖК-1277, ячейки с Н ориентацией, с симметричными краевыми углами.

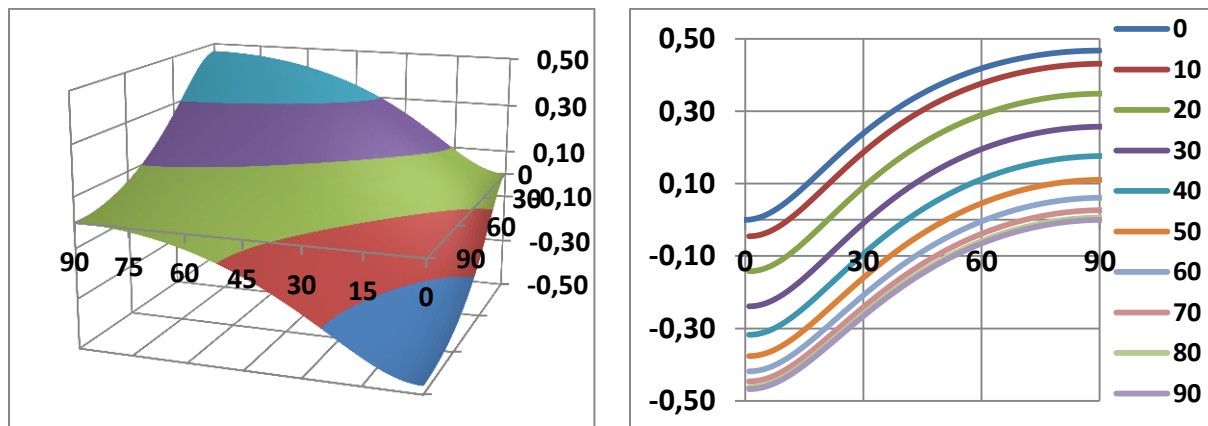


Рис.4.2.3.1.а. $\varepsilon_{//}=10,2$, $\varepsilon_{\perp}=3,7$, $T=0^{\circ}\text{C}$

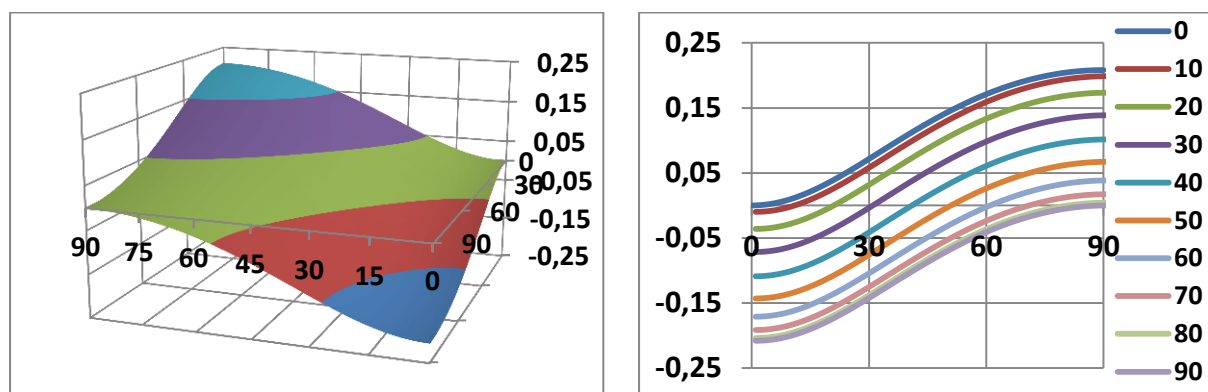


Рис.4.2.3.1.б. $\varepsilon_{//}=8,24$, $\varepsilon_{\perp}=5,4$, $T=58,9^{\circ}\text{C}$

По одной из осей показан приповерхностный угол одной из ячеек, по другой оси показан приповерхностный угол другой ячейки. По вертикальной оси показан отклик D_r . Справа его же профили относительно одной из осей приповерхностных углов, значения по другой оси (краевые углы второй пары ячеек) показаны в подписях к линиям графиков.

Как видно из рисунков, с ростом температуры вид зависимости отклика от приповерхностных углов в схеме с ЖК ячейками Нуб90 типа, с симметричными приповерхностными углами, остается качественно тем же, хотя некоторые количественные изменения очевидны. Ниже, на рис.4.2.3.2, показана зависимость отклика D_r от температуры для схемы с ячейками с ЖК-

1277, ячейки с S и B ориентацией, с симметричными приповерхностными углами.

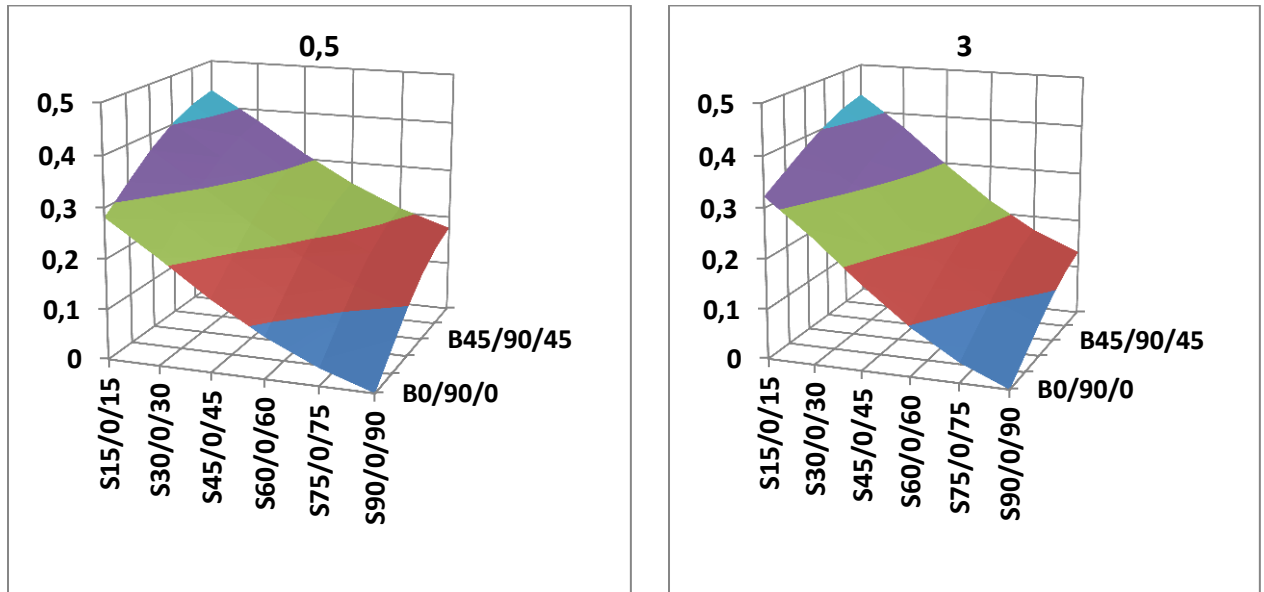


Рис.4.2.3.2.а. $\varepsilon_{//}=10,2$, $\varepsilon_{\perp}=3,7$, $T=0^{\circ}\text{C}$

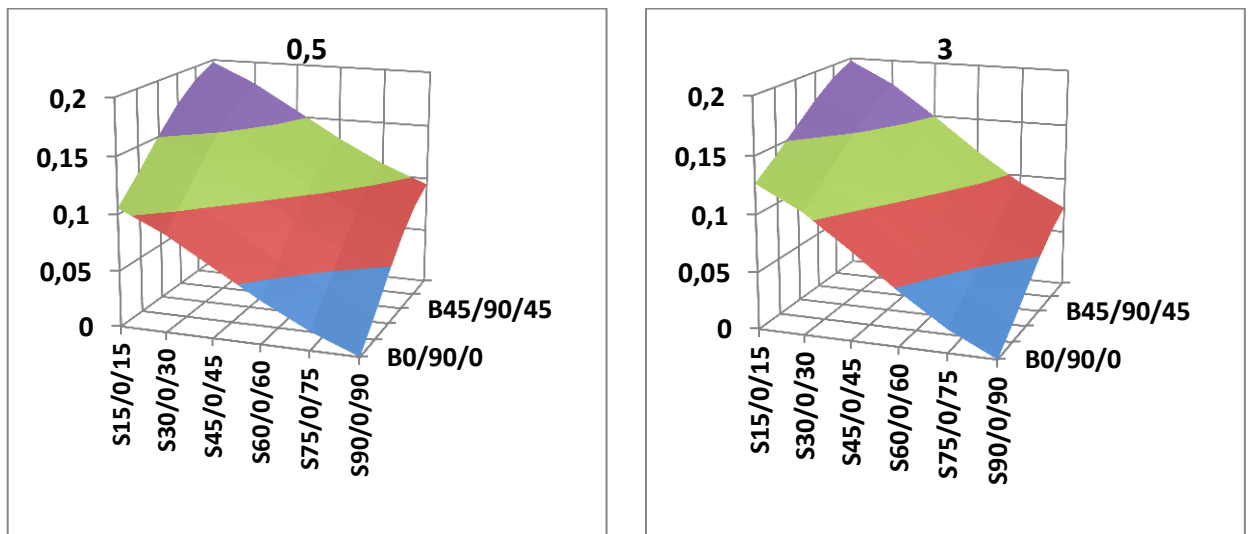


Рис.4.2.3.2.б. $\varepsilon_{//}=8,24$, $\varepsilon_{\perp}=5,4$, $T=58,9^{\circ}\text{C}$

По одной из осей показан приповерхностный угол одной из ячеек (S типа), по другой оси показан приповерхностный угол другой ячейки (B типа). По вертикальной оси показан отклик. Как видно из рис.4.2.3.2, при изменении (с температурой) диэлектрических характеристик ЖК-1277, происходят

заметные количественные изменения отклика, но качественно вид зависимости отклика от приповерхностных углов в ячейках S типа и В типа сохраняется.

§2. Количественная зависимость ε^{eff} Нуб90 ячейки с несимметричными приповерхностными углами от температуры

На рис.4.2.3.3. показана зависимость ε^{eff} Нуб90 ячейки с несимметричными приповерхностными углами от значений K_{33}/K_{11} . Показаны зависимости при различной температуре и, соответственно, различных диэлектрических характеристиках ЖК материала.

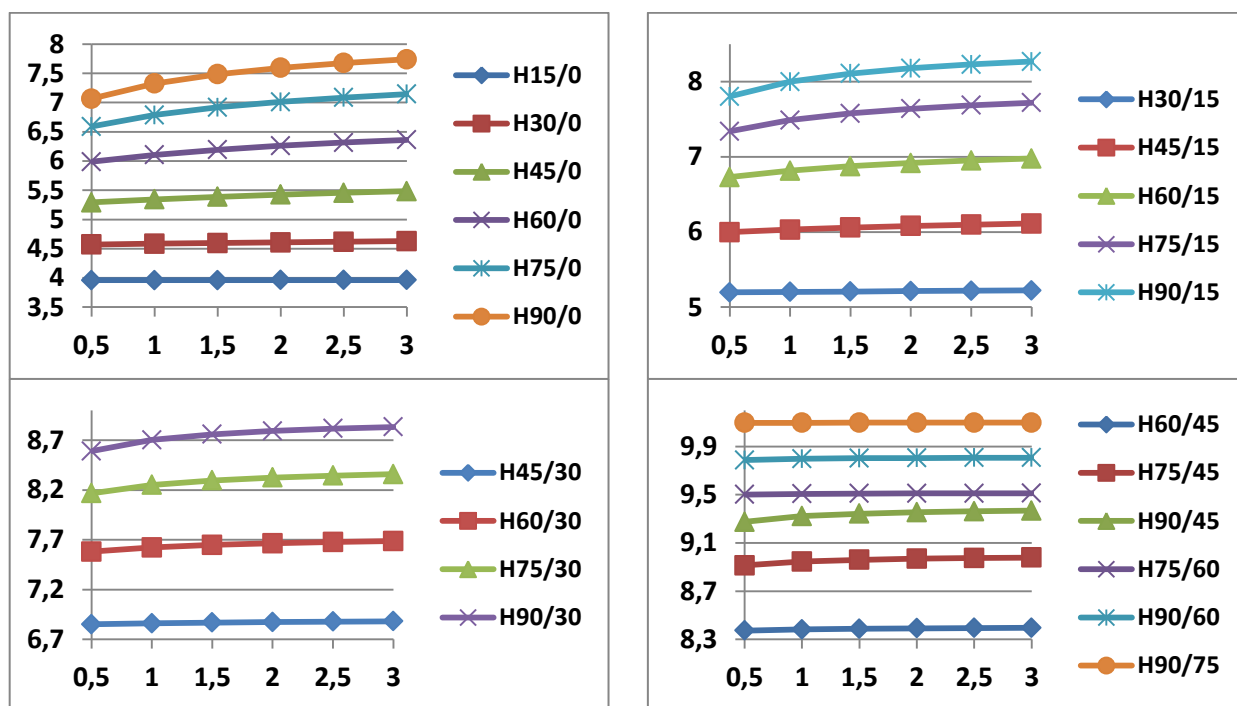
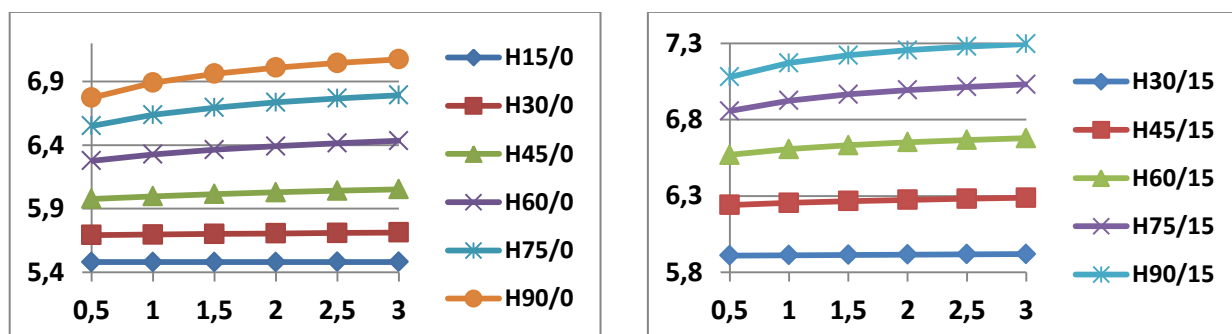
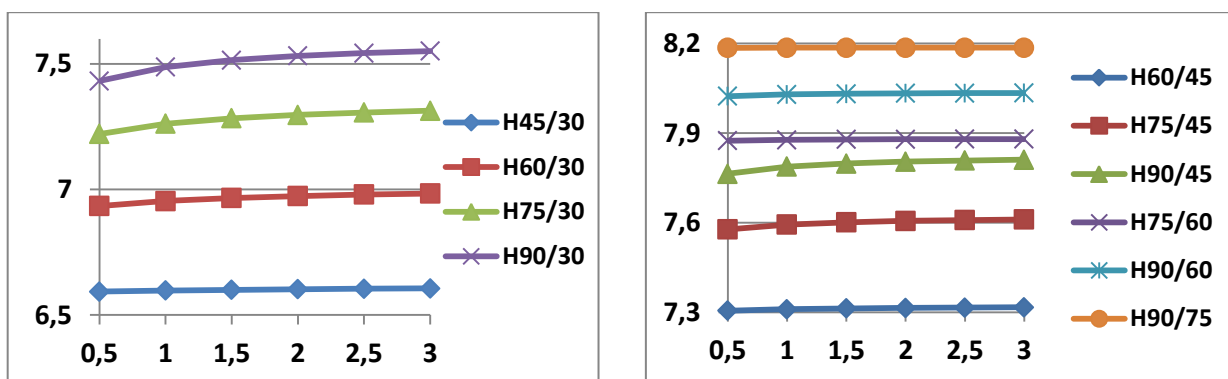


Рис.4.2.3.3.а. при $\varepsilon_{//}=10,2$, $\varepsilon_{\perp}=3,7$, $T=0^{\circ}\text{C}$.

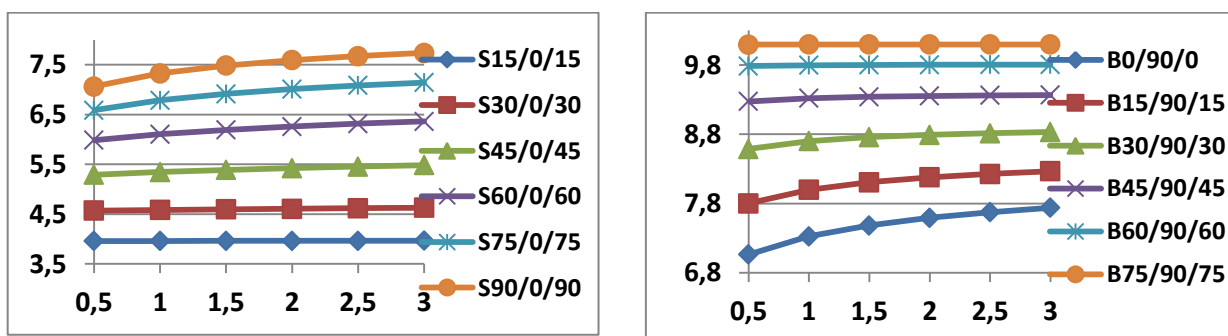


Рис.4.2.3.3.б. При $\epsilon_{//}=8,24$, $\epsilon_{\perp}=5,4$, $T=58,9^{\circ}\text{C}$

Как видно из рис.4.2.3.3, изменение ϵ^{eff} Нуб90 ячейки с несимметричными приповерхностными углами может быть до 10% в зависимости от значений K_{33}/K_{11} . Полученные данные позволяют задавать диэлектрические свойства ЖК ячеек, предопределяя приповерхностный угол.

§3. Количественная зависимость ϵ^{eff} для НубS и НубV ячеек с симметричными приповерхностными углами от температуры

На рис.4.2.3.4.показана зависимость ϵ^{eff} НубS и НубV ячейки с симметричными приповерхностными углами от значений K_{33}/K_{11} . Показаны зависимости при различной температуре и, соответственно, различных диэлектрических характеристиках ЖК материала.

Рис.4.2.3.4.а. при $\epsilon_{//}=10,2$, $\epsilon_{\perp}=3,7$, $T=0^{\circ}\text{C}$.

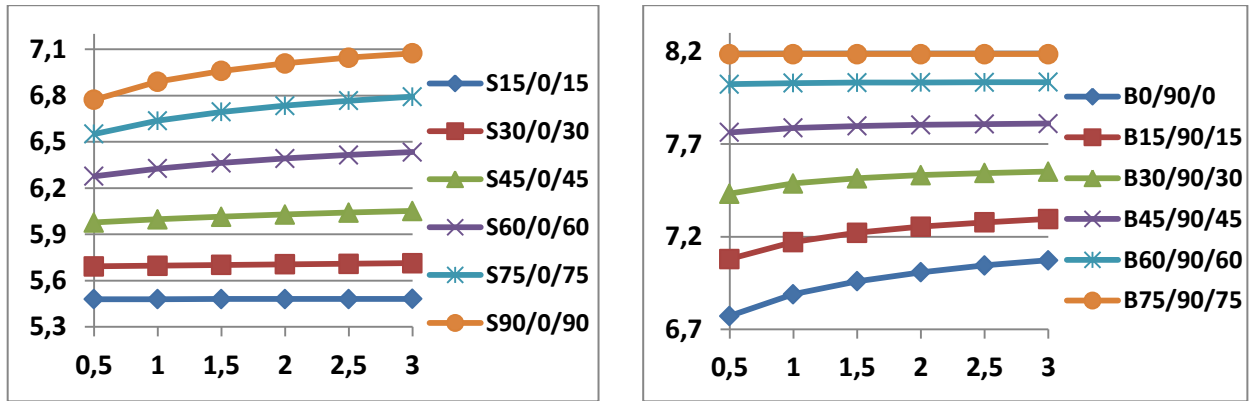


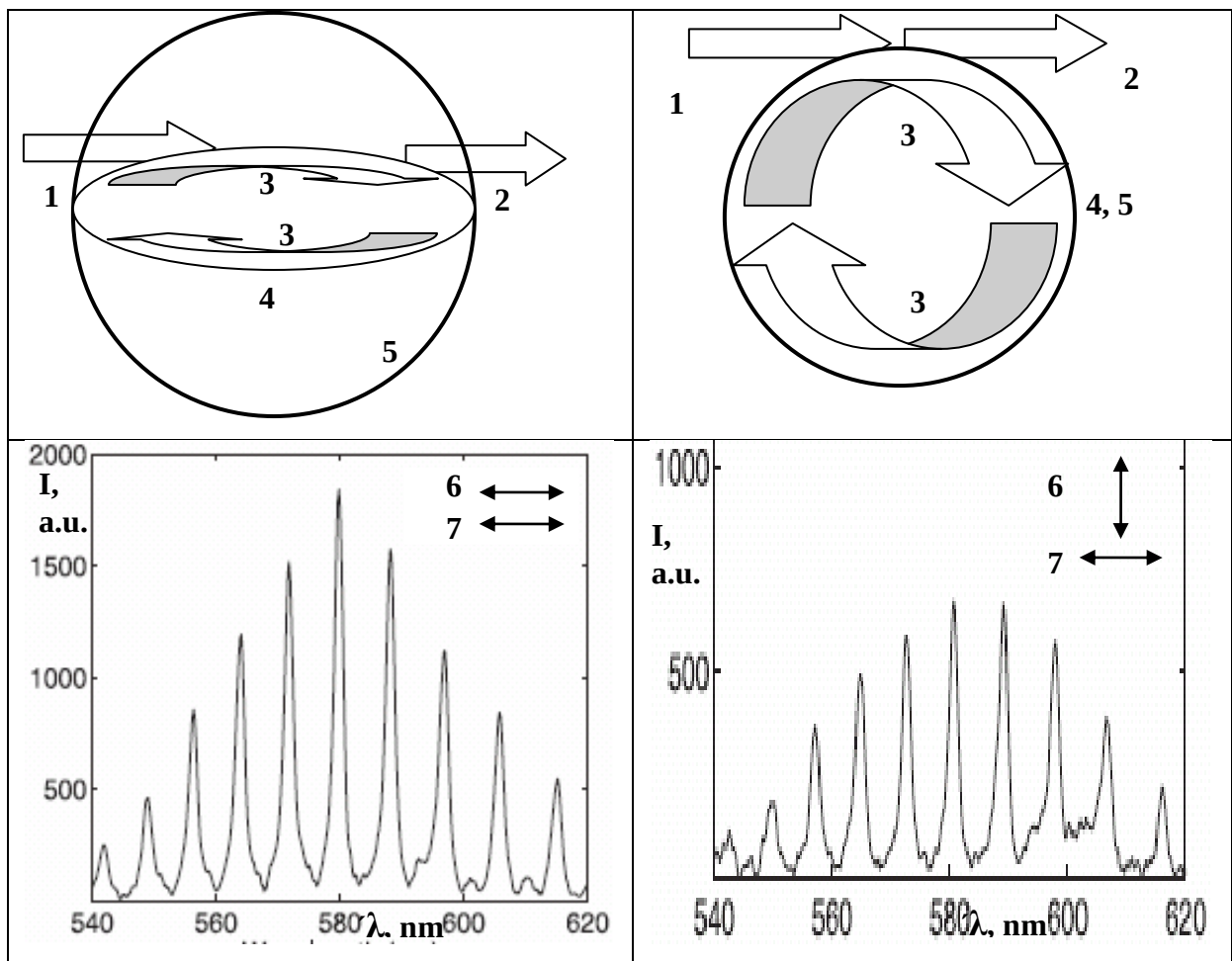
Рис.4.2.3.4.б. При $\varepsilon_{//}=8,24$, $\varepsilon_{\perp}=5,4$, $T=58,9^{\circ}\text{C}$

Как видно из рис.4.2.3.4, изменение ε^{eff} S или B ячейки с несимметричными краевыми углами может быть до 10% в зависимости от значений K_{33}/K_{11} . Следовательно, в целом актуальны модели диэлектрических свойств, разработанные для одноконстантного приближения.

Часть 3. Оптические свойства ЖК-композитов

3.1. Резонансное преобразование поляризованного света

Как показано на рис.4.3.1.1, луч света претерпевает полное внутреннее преломление (отражение) на границе раздела двух диэлектрических сред с подходящим соотношением показателей преломления и движется в тонком слое вблизи поверхности ЖК капли, которая используется в качестве микрорезонатора [153, 154].



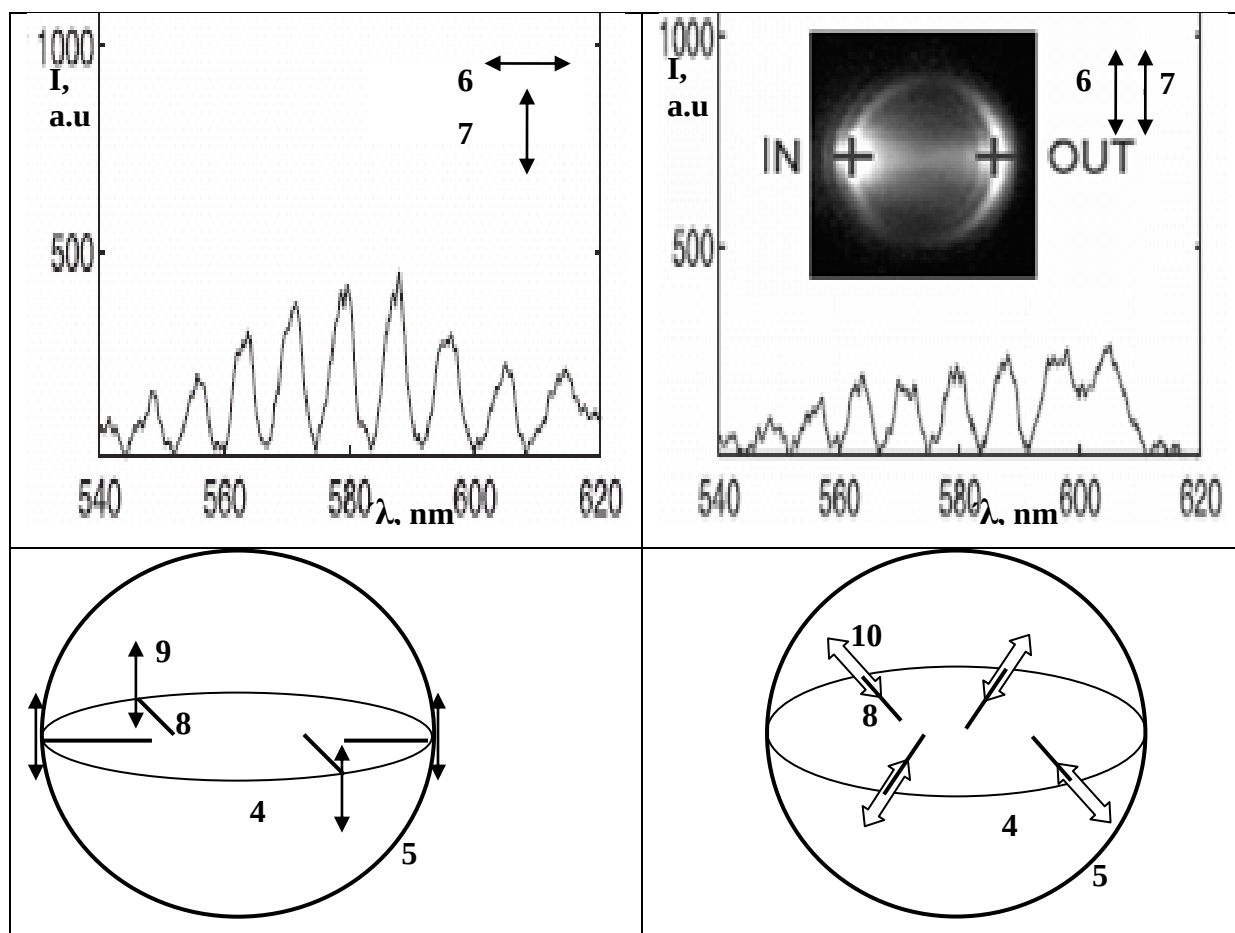


Рис.4.3.1.1. Поляризационные свойства WGM резонанса в малых (диаметр 11,7мкм) ЖК каплях-резонаторах. **1** падающий по касательной луч; **2** выходящий (тоже по касательной) луч; **3** луч, претерпевающий многократное полное внутреннее преломление в ЖК капле и обходящий ее вокруг; **4** диаметральная плоскость капли (в нее входит луч 1 и выходит луч 2), содержащая луч 3; **5** капля ЖК; **6** поляризация падающего луча 1 (лазер); **7** плоскость анализатора; **8** гомеотропно (радиально) ориентированная молекула ЖК; **9** поляризация луча перпендикулярна оси ЖК молекул; **10** поляризация луча в плоскости осей ЖК молекул [154].

Получение жидкокристаллических композитов на основе боросилоксана и нематического жидкого кристалла ЖК-1282 описано в Главе 2. Боросилоксан получен по методике, адаптированной для данной задачи из патента РФ [151]. Микроскопические исследования данных образцов показали, что композиты имеют выраженную двухфазную природу, где ЖК-фаза заключена в каплях размером от единиц до десятков микрон. Структура композитов такова, что на поверхности постоянно присутствует только силиконовый материал, обволакивая и смачивая ЖК во внутреннем объеме.

Тот тип поляризации волны, для которого является резонансной частота воздействующего поля, то есть близкой к его собственной частоте, возникнет (возбудится) в шаре, если диэлектрический шар будет подвержен воздействию внешней электромагнитной волны. Амплитуды других типов волн, как показано на рис.4.3.1.1 будут значительно меньше амплитуды резонансного типа [154].

Электромагнитная (световая) волна шепчущей галереи уже может существовать в диэлектрическом шаре, радиус которого порядка десятка микрон, т.к. длина волны света много меньше радиуса [154].

При гомеотропно или планарно ориентирующей поверхности домена, состоящей из полимерного материала (при радиально или тангенциально ориентированном директоре ЖК) можно пропускание луча лазера каплей рассматривать по аналогии с описанными в данной работе сферическим и доменами. Результаты будут одинаковые. Луч света будет формировать при анализаторе, скрещенном с плоскостью поляризации входящего луча, как смоделированные ранее в данной работе зависимости интенсивности прошедшего луча, так и изображенные на рис.4.3.1.1 спектры WGM-резонансных лучей для скрещенных плоскостей поляризации луча и анализатора. Разумеется, для каждой совокупности характеристик капли, включая и ее диаметр, будет индивидуальное распределение, принципиально сходное с рис.4.3.1.1. Будет формироваться многополосный спектр с неравномерной интенсивностью полос.

Если обеспечить несколько фиксированных диаметров капель ЖК, то получим соответствующие несколько лучей WGM-резонансных максимумов для капель, с заранее predetermined пропорцией их интенсивностей. Используя матрицу с цилиндрическими порами и поместив в поры нити композита ЖК-борсилоксан, описанного выше, решим эту задачу.

Важно отметить, что на рис.4.3.1.1. изображен [153] случай, когда луч вводится в точку на поверхности сферы, приблизительно по касательной

(рис.4.3.1.2), аналогично луч вводится и в цилиндрическое тело, и выходит преимущественно из точек на диаметральной окружности.

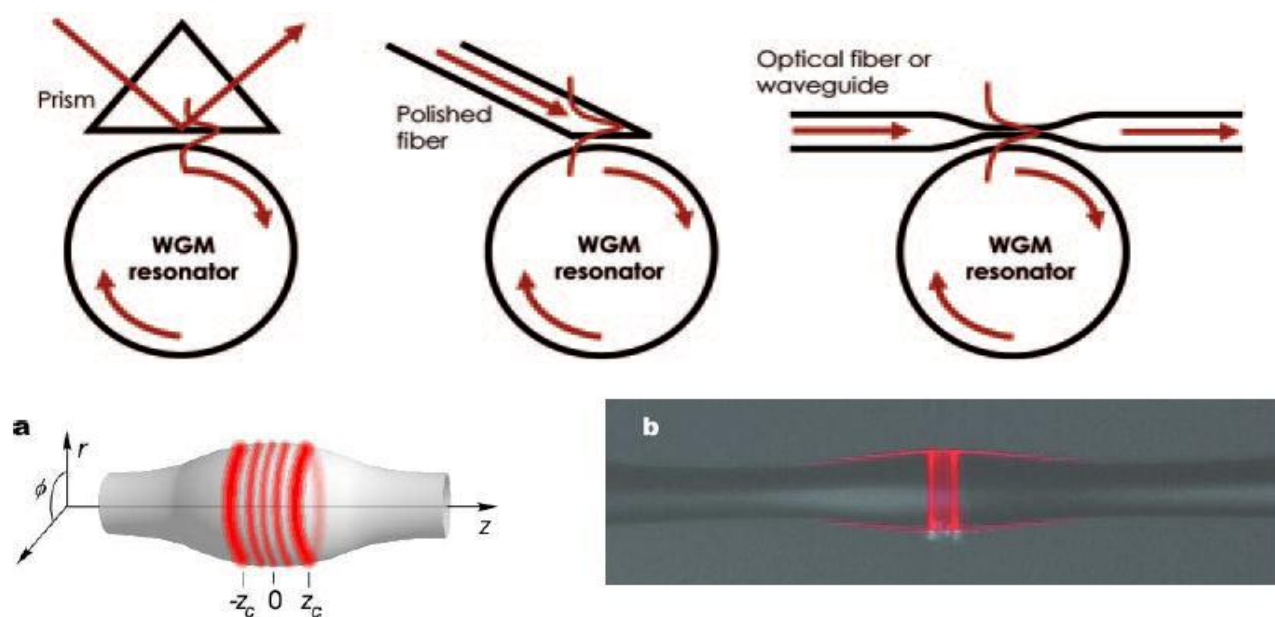


Рис.4.3.1.2. Луч вводится в точку на поверхности по касательной и выходит преимущественно из точек на диаметральной окружности [153]

В данной работе луч входит по касательной во все точки узкого кольца (на соответствующей проекции поверхности капли) с WGM эффектом и во всю остальную площадь поверхности просто на просвет, как рассмотрено в предыдущих частях работы. Будет формироваться полый (трубчатый) луч, содержащий совокупность кольцевых в сечении лучей с различными длинами волн и различной поляризацией.

Впервые предложен на основе ЖК-композиата оптический трансформатор (преобразователь) луча света в заранее predetermined совокупность поляризованных лучей с заданными узкими частотными полосами, плоскостями поляризации и интенсивностями.

3.2. Управление поляризацией и интенсивностью поляризованного света

Изготовление ЖК-композиата на основе поликапролактона описано в Главе 2. Образец композиата, как показали микроскопические исследования в скрещенных поляризаторах, представляет собой полимерную нить,

включающую протяженный микроцилиндр с ЖК. Поперечное сечение нити, как показали исследования в проходящем свете имеет внутренне отверстие овальной формы. Можно предложить способ изготовления твист-структуры на основании полученных экспериментальных результатов. В соответствии с экспериментальными результатами, следует изготавливать короткую композитную нить, содержащую, тонкий ЖК цилиндр, который имеет поперечное сечение, схематически подобное изображенному в Главе 2. Один ее конец следует затем повернуть на $\pi/2$. При прохождении луча света вдоль ЖК цилиндра будет происходить, как в 90° твист-ячейке, поворот плоскости поляризации. Угол наклона директора ЖК к направлению прохождения луча отсчитывается от основания ячейки, как выше в Главе 3.

От удлинения при вытягивании зависит угол наклона. Цилиндрическая ЖК ячейка внутри нити будет по распределению полярного угла наклона директора аналогична рассмотренным ранее ячейкам ЖК с неоднородным распределением директора, если задать градиент относительного удлинения при вытягивании, то есть различные участки композитной нити вытягивать различно. Но при этом будет иметь линейно изменяющийся по длине нити угол закрутки директора. Предлагаемая в данной работе ЖК-композитная структура представляет собой матрицу из цилиндрических пор с нитями вышеописанного композита в них. На выходных торцах пор с твист-структурами размещаются анализаторы, совпадающие с плоскостью поляризации выходящего света. Прилагая поле, регулируем интенсивность пропускания через твист-ячейки.

В дальнейшем будем называть подложкой ячейки торец цилиндрической поры в матрице. Для ячейки ЖК в параллельных поляроидах (анализатор и поляризатор параллельны друг другу) оценим интенсивность I прошедшего света. Толщину слоя ЖК назовем L . Луч падает нормально, поляризация луча совпадает с входным поляризатором. Пусть плоскость директора ЖК на входной поверхности тоже совпадает с поляризатором. Интенсивность света будет равна [155]:

$$I = \frac{\sin^2(\varphi_t \sqrt{1+q^2})}{1+q^2} \quad (4.3.2.1) [155]$$

где φ_t - угол закрутки твиста, а $q = \pi L \Delta n / \lambda \varphi$. $\varphi = \pi/2$ для твист-эффекта 90° . Формула (4.3.2.1) описывает функцию $I(L/\lambda)$, она осциллирует [155]. На рис.4.3.2.1 приведены [30] распределения углов по толщине в твист-ячейке в зависимости от приложенного поля.

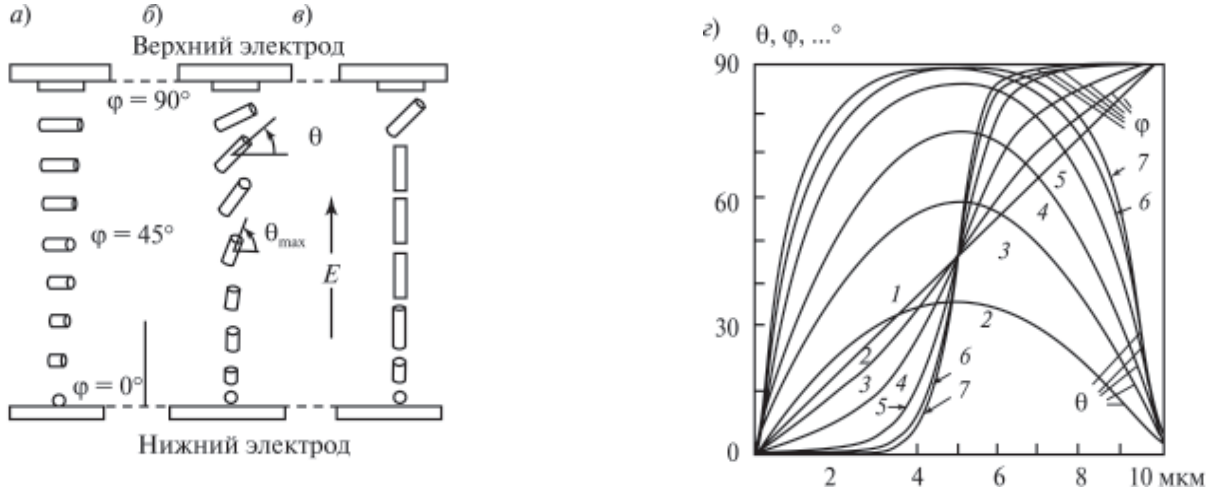


Рис.4.3.2.1. Распределение ориентации директора ЖК по толщине твист-ячейки: а) в отсутствии поля; б) при $U \geq U_n$; в) при $U \gg U_n$; г) зависимость углов θ и φ от толщины, где под номером 1 при поле меньше порогового, а под номерами от 2 до 7 при поле, возрастающем до $4U_n$ [30, 169].

Как показано на рис.4.3.2.1, при отсутствии поля распределение углов по толщине ячейки можно считать линейным, в том числе для случая $K_{33}/K_{11}=1$ будет линейным и распределение угла θ по толщине ячейки. Исходя из того, что $q = \frac{\pi d \Delta n}{\lambda \varphi_t}$ (4.3.2.2) [155], и в то же время разность фазовых задержек $\Delta \Phi = \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda}$ (4.3.2.3), получим $q = \frac{\Delta \Phi}{2\varphi_t}$ (4.3.2.4). Следовательно, интенсивность пропускания в параллельных поляризаторах можно рассчитать по формуле (4.3.2.1) для различных пространственных распределений полярного угла наклона директора. На рис.4.3.2.2 показана при параллельных поляризаторах зависимость интенсивности пропускания I от симметричных приповерхностных углов θ и толщины ЖК слоя L . $n_o=1.5$, $n_e=1.6$, длина волны света $0.63 \mu\text{м}$, угол закрутки твиста 90° , плоскость поляризации входящего луча света совпадает с директором ЖК на входной поверхности ЖК ячейки. На

рис.4.3.2.2.а показана для STH , то есть твист-гибридной ячейки ЖК. На рис.4.3.2.2.б показана для STS , то есть твист-сплей ячейки ЖК. На рис.4.3.2.2.в показана для STB , то есть твист-бенд ячейки. Аналогично вышеописанным симметричным твист-ячейкам, можно изготовить ЖК-композит с несимметричными краевыми углами твист-ячеек. Расчет их пропускания осуществляется аналогично симметричным.

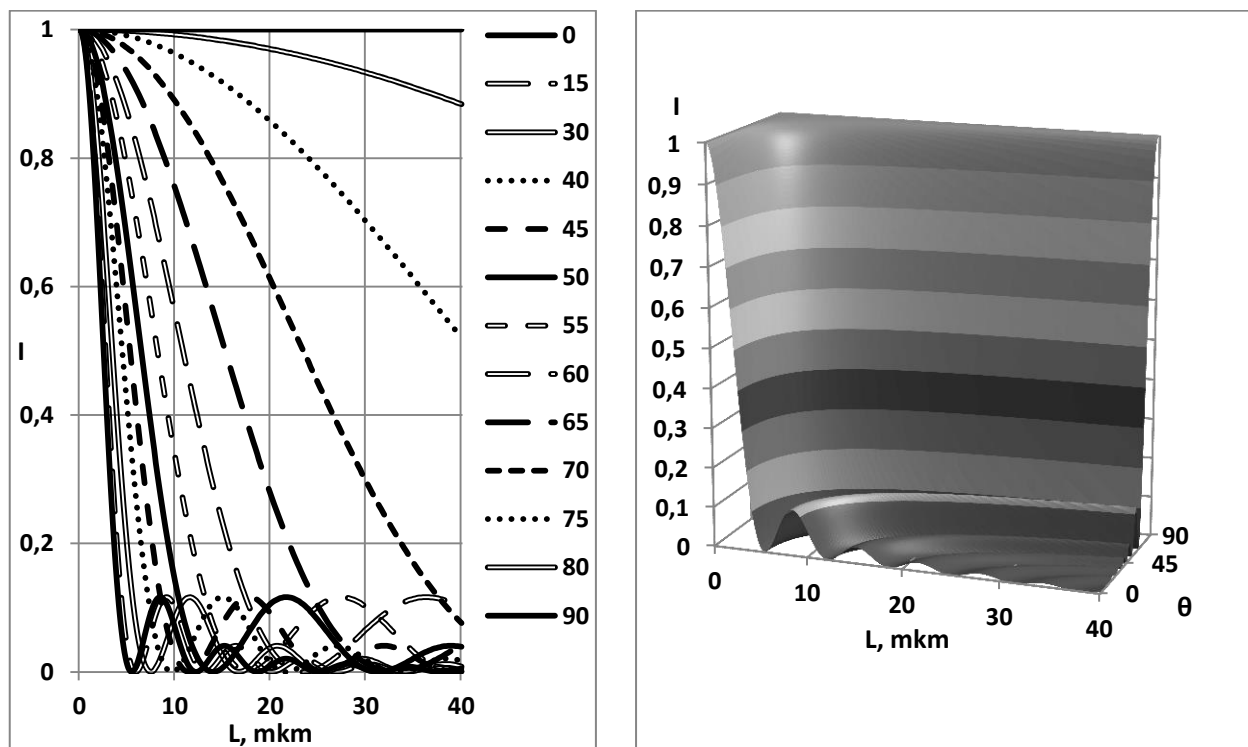


Рис.4.3.2.2.а. Для STH , то есть твист-гибридной ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами, зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов θ и толщины L слоя.

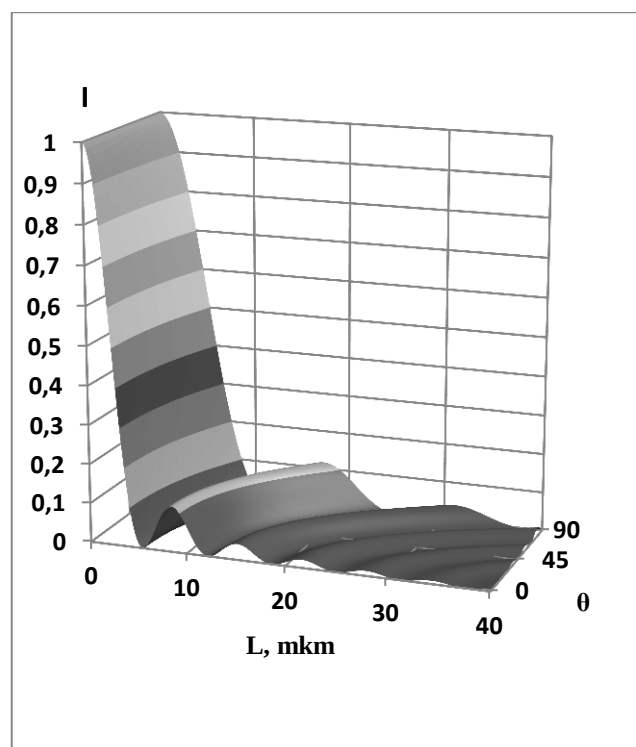
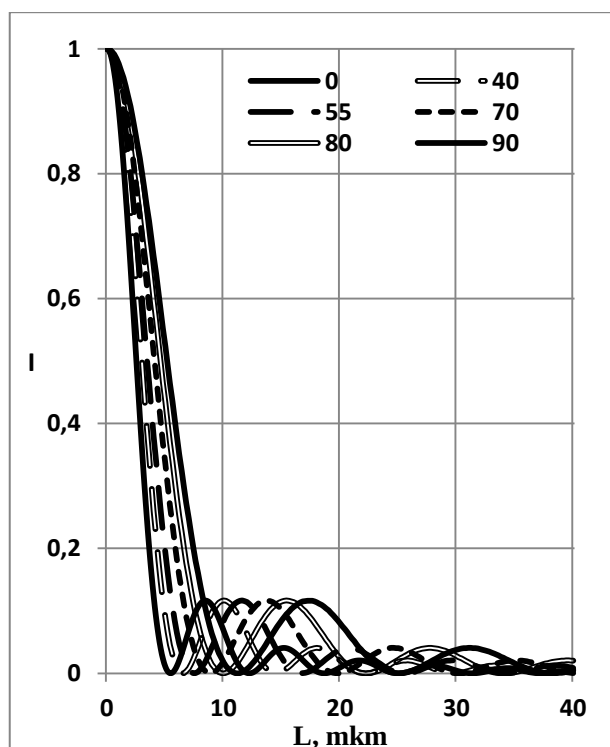


Рис.4.3.2.2.б. Для STS, то есть твист-сплей ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами, зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов θ и толщины L слоя.

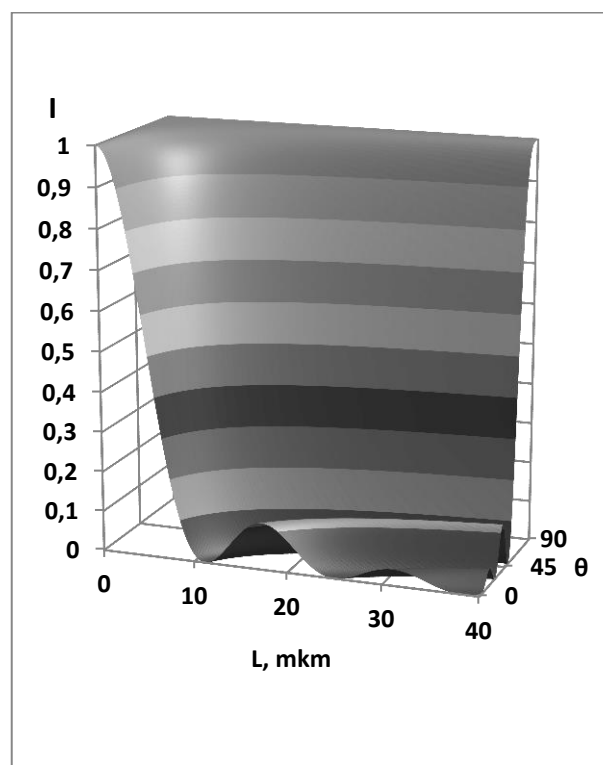
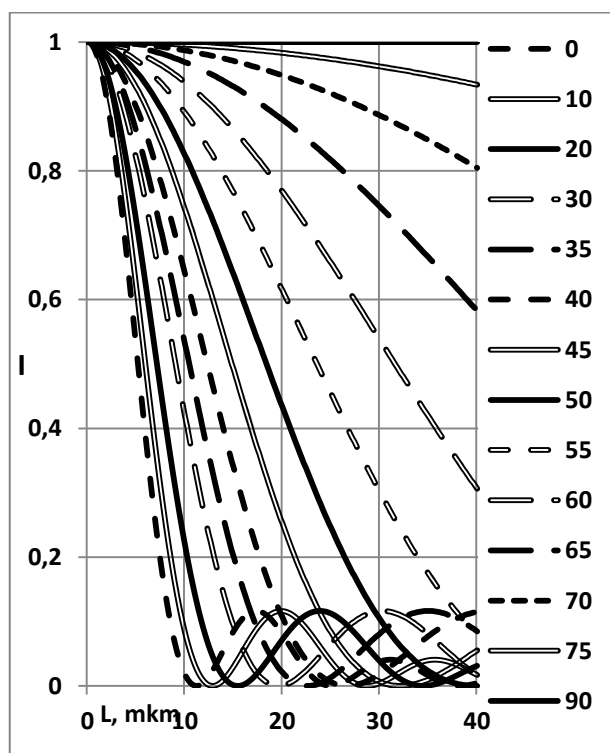


Рис.4.3.2.2.в. Для STB, то есть твист-бенд ячейки ЖК с симметричными приповерхностными углами, зависимость интенсивности пропускания I при параллельных поляризаторах от приповерхностных углов θ и толщины L слоя.

3.3. Матричные ЖК-композитные структуры, регулирующие освещение дифракционной решетки

Матричные твист-структуры могут использоваться и для управления поляризацией и интенсивностью света, падающего на дифракционную решетку. В зависимости от геометрического расположения элементов матричной структуры, пропускающих свет с наибольшей интенсивностью, можно реализовать различные дифракционные картины (рис.4.3.3.1). При рандомизированном распределении интенсивно пропускающих элементов матрицы, фазы волн не скоррелированы, распределения накладываются аддитивно, наблюдаем усиленную в N раз (то есть по числу элементов N) дифракционную картину от одной структурной единицы. Периодическая структура светлых элементов матрицы дает соответствующую дифракционную картину. Показаны слева направо картины для числа светлых элементов N от двух до шести, расположенных в вершинах правильных N -угольников (N -угольников).

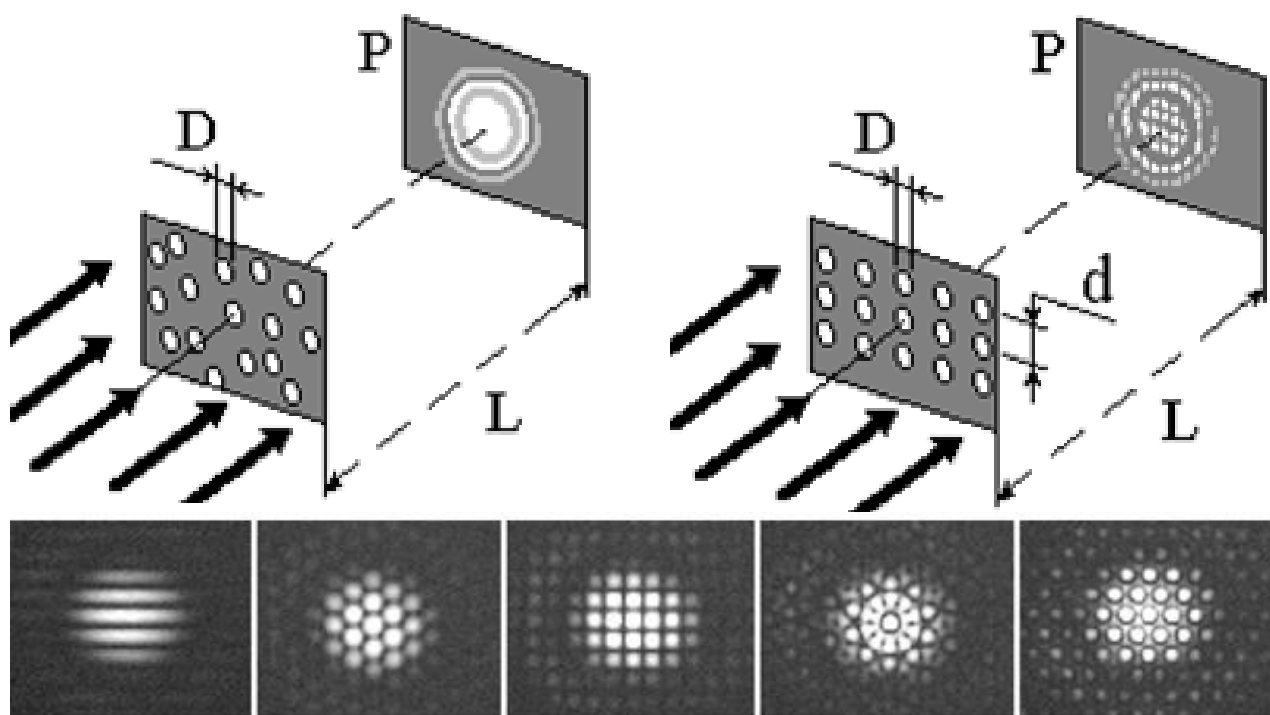


Рис.4.3.3.1. Слева направо дифракционные картины для числа светлых элементов N от двух до шести, в вершинах правильных N -угольников.

В [124, 149-150, 168] было отмечено, что в вихревом (вращающем плоскость поляризации) луче мелкие частицы вращаются, и, прижатые лучом (давлением света) к поверхности экрана (в максимуме интенсивности, например, при фокусировке в кольцо), перемещаются (катятся) по циклоидоподобным траекториям. Если в матрице, по аналогии с шахматной доской (клетка черная - клетка белая) задать расположение элементов с плоскостями поляризации в одной или в другой (перпендикулярной первой) плоскости, то дифракционные картины от них будут накладываться и поляризация в световых пятнах на экране будет определяться их относительной интенсивностью. Следовательно, если задать колебания их интенсивности (осцилляции) по закону от времени, то можно обеспечить вращение плоскости поляризации в дифракционных максимумах с любой периодичностью. Это может быть важно для многолучевого оптического пинцета [157-168].

В сочетании с выше рассмотренным матричным WGM преобразователем света, можно формировать любое сочетание лучей света с различной поляризацией, длиной волны и интенсивностью. Такое сочетание лучей света может быть индивидуальным для различных участков дифракционной решетки. Капли в ЖК-композиатах, как было отмечено выше, обеспечивают трубчатые лучи и кольцеобразные дифракционные светлые пятна на экране, что позволяет заключать в них частицы с малым (относительно основной среды) показателем преломления. Это может быть важно для оптического пинцета.

Дифракционная решетка может быть организована, как было рассмотрено ранее в данной работе, из матрицы управляемых дифракционных оптических ЖК элементов. Таким образом, может быть реализовано любое распределение прошедшего через оптическую систему света по направлению (углам), интенсивности, поляризации, длине волны.

На рис.4.3.3.2 показан блок из четырех элементов с различной поляризацией луча на выходе, благодаря различному углу твист-закрутки. На такие блоки (как один из вариантов) разбивается матричная структура. Каждый

блок задает поляризацию проходящего через него луча света, регулируя пропускание составляющих блок твист-ячеек электрическим полем. Затем луч света с заданной поляризацией поступает на дифракционную решетку.

Управление интенсивностью света с той или иной поляризацией, падающего на дифракционную решетку, осуществляется следующим образом. Каждая твист-ячейка имеет на выходе анализатор, плоскость пропускания которого соответствует плоскости поляризации выходящего из данной ячейки света. При приложении к твист-ячейке управляющего поля, интенсивность пропускания будет снижаться. Для обеспечения полного погашения света ячейкой, необходимы углы закрутки твиста больше или равные $\pi/2$.

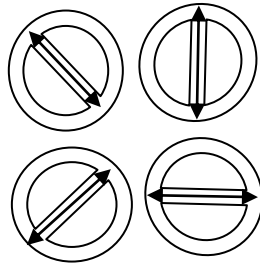


Рис.4.3.3.2. Блок из четырех элементов матрицы твист-ячеек с различной поляризацией луча на выходе, благодаря различному углу твист-закрутки.

Задавая различные комбинации поляризации и интенсивности света, падающего на дифракционную решетку из оптически анизотропного материала, можно добиться чрезвычайно широкого разнообразия возможных распределений интенсивности и поляризации в дифракционной картине.

Разработана конструкция и методика использования ячеек ЖК-композитов с электроуправляемыми оптическими свойствами, регулирующих поляризацию, спектральный состав и интенсивность луча света, падающего на дифракционную решетку или матрицу фотоэлементов, актуальных для элементной базы средств отображения и обработки информации.

Часть 4. Фокусирующее-дифракционное ЖК устройство с неоднородным радиальным распределением директора

В различных оптических системах широко используются основанные на различных принципах фокусирующие системы: дифрагирующие (зонные пластинки Френеля) и преломляющие (линзы). В то же время задачи, ставящиеся перед столь различными средствами, существенно различаются. Они могут оснащаться параллельно фокусирующими приемниками луча света как линзовыми, так и дифракционными, с различными фокусными расстояниями, в зависимости от назначения оптических систем. Поэтому они могут использоваться как поочередно, так и одновременно.

Задача универсального управляемого элемента адаптивной оптики с частотой смены кадров в ЖК оптических системах высокого быстродействия, переключаемого от использования как зонная пластинка к использованию как линза и наоборот, решена в работе. Для зон Френеля рассмотрены, например, в [156] принципы и основы теории построения. До точки В (рис.4.4.1) дойдет вдвое больше света, если закрыты все нечетные зоны, открыты все четные, начиная с центральной, чем без зонной пластинки. Если не поглощать свет, падающий на нечетные зоны, а сообщить ему изменение фазы на обратную, можно достигнуть еще большего эффекта усиления освещенности в точке В (в четыре раза), то есть оптическая толщина четных зон на половину длины волны отличается от нечетных.

Выше описаны плоские слои нематического ЖК, ограниченные с одной стороны подложкой с неориентирующим покрытием, подобранным (по составу) с учетом сорта ЖК с целью не оказывать влияния на приповерхностный угол преднаклона директора ЖК у неориентирующей поверхности, а с другой стороны ограниченные подложкой с ориентантом (задающей угол преднаклона директора у поверхности). Выше показано, что малой по величине напряженностью электрического поля может осуществляться управление ориентацией односторонне ориентированного слоя

ЖК. Обычно может быть от одного микрона и более толщина переходного слоя у поверхностей двусторонне ориентированных ЖК ячеек. Можно обеспечить для слоя с гомеотропной ориентацией директора ЖК на ориентированной стороне, (в пределах малых величин), планарную на другой (то есть гомеопланарную ячейку), и наоборот, гомеотропную по мере роста поля для слоя с планарной ориентацией директора ЖК на ориентированной стороне. Преимущество односторонне ориентированной ячейки ЖК в малом управляющем поле и быстрой переключении. От фазовой задержки планарной ячейки такой же толщины с тем же сортом ЖК фазовая задержка при малом управляющем поле составит около половины.

Криволинейный оптический рельеф тоже может быть обеспечен данным устройством, как показано выше, синусоида тоже может быть представлена большим числом ступеней, рельеф представляется мелкоступенчатым. Как упоминалось выше, сферической собирающей линзе ЖК линза соответствует если Φ убывает квадратично, а сферической рассеивающей линзе ЖК линза соответствует, если фазовая задержка Φ возрастает квадратично от центра линзы (имеет форму параболы). Таким образом, актуален переход к концентрическим полосам (равной ширины) от параллельных полос (с одинаковым в пределах одной полосы управляющим полем и фазовой задержкой). Для системы концентрических управляемых ЖК полос можно реализовать линзу, причем как рассеивающую так и собирающую, также и зонную пластинку.

$$\text{Радиус } m\text{-й зоны Френеля (рис.4.4.1)} \quad r_m = \sqrt{m \frac{ab}{a+b} \lambda} \quad (4.4.1).$$

Фотоприемник располагается в точке В. Каждая зона Френеля будет формироваться значительным числом ЖК концентрических полос, при малой ширине концентрических полос ЖК. Это позволяет в соответствии с изменением расстояния до точечного источника света в точке А перестраивать зонную пластинку. В силу наиболее вероятной технической реализации фотоприемника на фиксированном расстоянии от управляемого ЖК

оптического элемента, точка В на рис.4.4.1. совпадает с фокусом линзы и неподвижна, если фотоприемник расположен в фокусе собирающей ЖК линзы. К приему сигнала от находящегося на оптической оси устройства на заданном расстоянии точечного источника, зонная пластинка может, таким образом, управляемо адаптироваться.

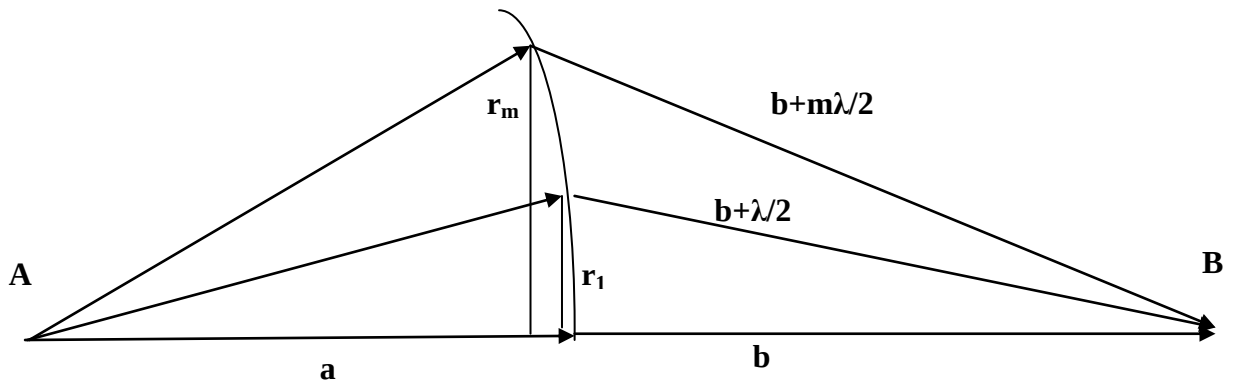


Рис.4.4.1. Центральная (при $m=1$) и смежная с ней (при $m=2$) зона Френеля.

На основе концентрически расположенных односторонне ориентированных ЖК слоев предложено фокусирующе-дифракционное универсальное управляемое ЖК устройство. Сигнал от расположенных на оптической оси устройства источников света можно разделять, переключаясь с помощью управляемой зонной пластинки Френеля между источниками, находящимися на различном расстоянии.

Предложено разделять сигнал от точечных источников с помощью дифракционной ЖК структуры, а остальные сигналы (световые потоки) с помощью ЖК линзы с регулируемыми характеристиками (собирающая или рассеивающая), с регулируемым фокусным расстоянием. Управляемая ЖК структура, решая вышеперечисленные задачи и при этом переключаемая со скоростью смены кадров в быстродействующих ЖК оптических системах, выполнит одновременно (квазиодновременно) видеосъемку с несколькими разными фокусными расстояниями (на несколько разных фотоприемников на одной оптической оси) как близких, так и удаленных объектов и, кроме того, примет сигнал от точечных источников на разных расстояниях на оптической оси.

Чтобы сфокусировать световой луч при оптическом манипулировании ультрамелкими частицами соответствующим образом, чрезвычайно важно знать расстояние до частицы. С видеосистемой, передающей информацию оператору светоманипулирующей установки – оптического пинцета, можно обнаруживать ультрамелкие частицы и классифицировать их с помощью подсветки поля зрения микроскопа. Затем дистанцию до частицы, которая, естественно, является источником света, рассеиваемого частицей, можно определять с помощью френелевской дифракции и получим отчетливый максимум сигнала фотоприемника при правильно подобранных параметрах (см. рис.4.4.1). Можно переходить после определения расстояния в обеспечиваемый ЖК линзой режим фокусировки луча света и манипулировать частицей, захватив ее в фокус и затем удаляя фокус с частицей или приближая.

Также и в том случае, если частица на оси системы загорожена ненужными частицами (другого сорта), предложенная система успешно применима. Таким образом, в оптическом манипулировании ультрамелкими частицами предложенная система перспективна.

Часть 5. ЖК-устройства с управляемым преломлением луча света

5.1. Проекционное устройство

§1. Проецирующий элемент и преимущества его использования

Чрезвычайно широко используются проекционные системы (проекторы). Вполне очевидна актуальность развития проекционной техники. На стоимость проекционной техники существенно влияет количество (обычно соответствующее количеству пикселей в изображении) управляемых оптических элементов. Характерными факторами, влияющими на качество изображения, являются: неоптимальный угол (отношение дистанции до экрана к его ширине), отличающийся от расчетного для проектора, и вынуждающий настраивать проекционную оптику, пренебрегая снижением качества изображения; неоптимальное расположение проектора (не на нормали к середине экрана), формирующее трапециевидную спроецированную картинку с соответствующими искажениями; неравномерность постороннего освещения поверхности (экрана), на который осуществляется проецирование, то есть наличие областей с пониженной контрастностью из-за интенсивного внешнего постороннего их освещения; проецирование на криволинейную поверхность при размещении рекламного экрана с учетом архитектурных и иных ограничений. Дополнительные технические требования создает выделение тепла проецирующим оборудованием, которое возрастает при увеличении светового потока (проецирование в дневных уличных условиях или на большой экран), влияет негативно на конструкцию и условия эксплуатации проекторов большой мощности.

В работе решена задача проекционного устройства, в котором до двух порядков меньше, чем число пикселей в формируемом (проецируемом) изображении, число управляемых оптических элементов, что снижает стоимость оборудования. Негативное влияние вышеперечисленных факторов

на качество проецируемого изображения значительно уменьшает использование предложенного в данной работе проекционного оборудования. Также при проецировании мощным световым потоком снижается влияние тепловыделения на конструкцию и условия эксплуатации. Предложены, для аккумуляторного проектора, конструктивные решения с улучшенной энергоэффективностью проецирования. На описанных выше ЖК слоях с фокусирующими, электроуправляемыми и, в соответствии с [156], анизотропными преломляющими свойствами основана элементная база предлагаемого в данной работе оборудования.

Описанный выше управляемый односторонне ориентированный слой ЖК представляет собой преломляющий элемент, с той лишь разницей, что управляющие электроды в виде прямоугольников, а не в виде длинных узких полос, то есть элемент разбит на маленькие квадратные области с управляемыми полем ориентационно-оптическими свойствами, подобен микродисплею. Фазовая задержка распределена так, что луч света преломляется мелкими ступеньками, как на склоненной под углом к направлению луча плоской поверхности. Принцип проецирования с использованием управляемого преломляющего элемента изображен на рис.4.5.1.1.

Луч света **1** проходит через ЖК ячейку, описанную выше, управляемого преломляющий элемент **3**. Он отклоняет на заданный угол (преломляет) луч света под влиянием управляющего поля. Затем луч света, который на разных краях преломляющего элемента преломляется на неодинаковый угол и имеет некоторое заметное расширение, границы расширяющегося луча показаны на рис.4.5.1.1 как **4** и **5**, падает на экран **6**, освещая область **7**, с учетом расширения луча. Таким образом, отношение полуширины освещенного проекционного экрана к размеру пикселя изображения определяется отношением максимального угла отклонения луча управляемым преломляющим элементом к угловой ширине отклоненного луча. Максимальное число строк (и столбцов)

для прямоугольного управляемого преломляющего элемента, освещающего также прямоугольную область экрана получим, удвоив эту величину.

Каждый из проекционных элементов обеспечивает на выделенной для него части экрана ограниченных размеров построчную развертку (как в экранах на электронно-лучевой трубке) изображения. На большой экран будет приходиться ограниченное число проекционных элементов.

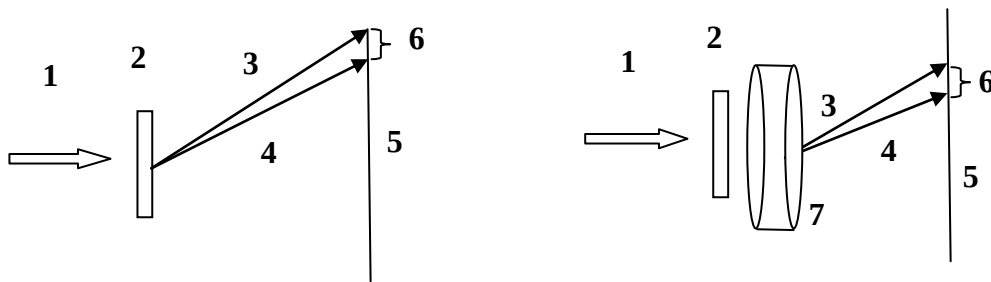


Рис.4.5.1.1. Принцип проецирования с использованием управляемого преломляющего элемента. Слева А) Луч света 1 поступает на управляемый преломляющий элемент 2. Он отклоняет (преломляет) луч света на заданный угол под влиянием управляющего поля. Затем луч света (так как на разных краях преломляющего элемента преломляется на неодинаковый угол, он имеет некоторое заметное расширение) границы которого показаны на рисунке как 3 и 4, падает на экран 5, освещая с учетом расширения луча область 6. Справа Б) Управляемая линза ЖК 7 коллимирует луч.

Количественные оценки вышеупомянутых величин имеют важнейшее практическое значение: расширение отклоненного луча (угловое); угол, на который может быть отклонен луч света; а также частота переключения регулятора интенсивности освещения и, конечно, частота переключения управляемого преломляющего элемента. Развертку изображения удобно использовать, как в электронно-лучевых трубках, построчную. При 25 кадрах в секунду (как в кинофильмах), если частота переключения односторонней ЖК ячейки составит сотни герц (Гц), то осветит соответствующее число строк пикселей проецируемого изображения. Число строк (или, в другом варианте, столбцов), таким образом, составляет несколько десятков. Имеется в виду, что проецируются три соответствующих цвета, изображение формируется в RGB

палитре. Проекционный элемент имеет источник (например, светодиод достаточной яркости) соответствующего цвета, обеспечивает только какой-то один цвет из трех. Дополнительно к изображенному на рис.4.5.1.1, если источник света широкого спектра, перед входом луча в твист-ячейку устанавливается светофильтр. Одну и ту же часть экрана покрывают три проекционных элемента (разных цветов), и каждый пиксель их лучи освещают в соответствии с полагающимися ему пропорциями цветов.

Оценен количественно угол, на который может быть отклонен луч, для односторонней ячейки ЖК с гомеотропной ориентацией на ориентированной (одной) стороне толщиной 11 мкм, с показателями преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.65$, отрицательной диэлектрической анизотропией. Управляющее поле формирует линейно изменяющееся значение эффективного показателя преломления. Показатель преломления изменяется вдоль направления, параллельного одной из сторон управляемого преломляющего элемента. Это направление на рис.4.5.1.2.а. показано по горизонтальной оси, так как эффективный показатель преломления аналогичен линейной координате вдоль ячейки. Координата по нормали к ЖК ячейке отложена по вертикальной оси, то есть вдоль предполагаемого направления падения луча света. Поверхность фронта волны изображена на рис.4.5.1.2.а.. Он параболический, но, как видно, совсем немного. Для всех точек фронта волны, изображенного на рис.4.5.1.2.а., угол, на который повернулся фронт волны (если ширина управляемого преломляющего элемента 10 мкм) по сравнению с первоначальным нормальным падением, составляет 5,71 градуса.

Однако луч преломится на выходе в среду (воздух) из управляемого преломляющего элемента, и он преломится сильнее там, где показатель преломления больше. Зависимость угла преломленного луча показана на рис.4.5.1.2.б. (угол отсчитывается от нормали, то есть от прежнего направления падения луча на преломляющее устройство). Как видно, зависимость линейная. Хотя формально горизонтальная ось подписана как относительная линейная

координата, зависимость показана фактически от такой же горизонтальной оси, как на рис.4.5.1.2.а.

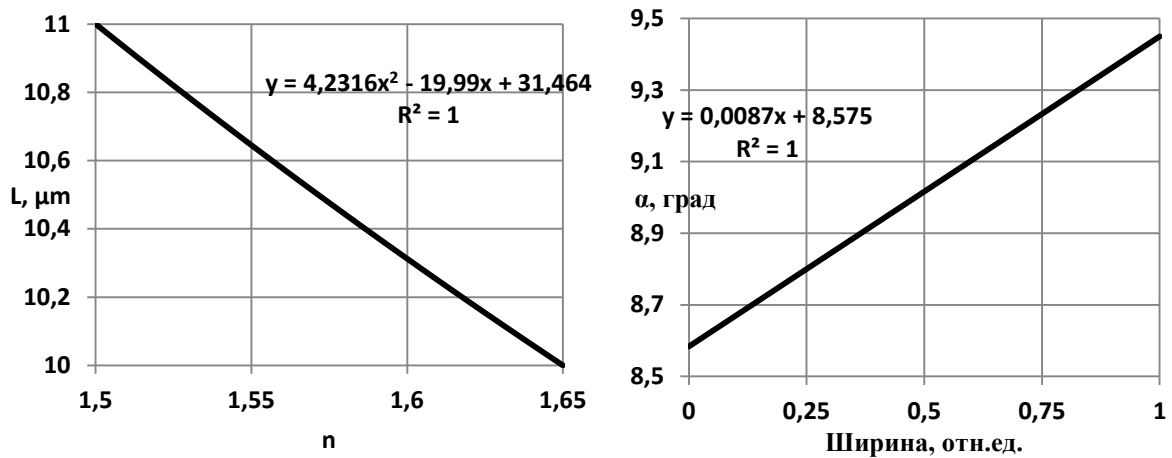


Рис.4.5.1.2. Слева А) Фронт волны нормально падающего луча света перед выходом из управляемого преломляющего элемента. Справа Б) Зависимость угла преломления (угол отсчитывается от нормали) от относительной ширины управляемого преломляющего элемента.

Таким образом, при расстоянии до экрана 1 м, как следует из рис.4.5.1.2.а., размеры области проецирования составят 30 см (сторона квадратной области проецирования), так как отклонение луча от нормали (полуширина области проецирования одного проекционного элемента) может быть 15 см.

Ширина области, освещенной расширившимся лучом, составит при этом (при отклонении луча на 15 см), как следует из рис.4.5.1.2.б., около 1,5см. Для средней части области проецирования отклонение будет меньше, расширение луча тоже уменьшится и освещенное пятно будет меньше в поперечнике. В области проецирования, таким образом, разместятся двадцать строк по двадцать пикселей в каждой. Проецирующее устройство, как очевидно из вышеизложенного, способно проецировать в достаточно широкой области проецирования четко различаемые (не перекрывающиеся своим краями друг с другом) пиксели, и притом достаточно много пикселей. Различия в размерах пикселей для зрительного восприятия обычно несущественны, гораздо важнее цветовая контрастность относительно соседних пикселей и количество света,

испускаемого пикселем. Как раз полностью обеспечены эти важнейшие требования.

§2. Конструктивные решения для предлагаемого проекционного оборудования

Рассмотрим проецирование, прежде всего, «на просвет» на большой плоский экран. Необходимую актуальность придает ему применение, например, в кинотеатрах. На рис.4.5.1.3.а. предлагаемое на основе вышеописанных проекционных элементов конструктивное решение. На достаточно прочном каркасе закреплен экран (фактически, развернутый рулон соответствующего материала). Обычно каркас имеет вид ажурной металлоконструкции, при больших размерах экрана часть элементов каркаса находится на некотором расстоянии позади экрана. Проекционные элементы закреплены на них. Каждый из них проецирует на относящуюся только к данному проекционному элементу одинаковую квадратную область проецирования, если все проекционные элементы одинаковые.

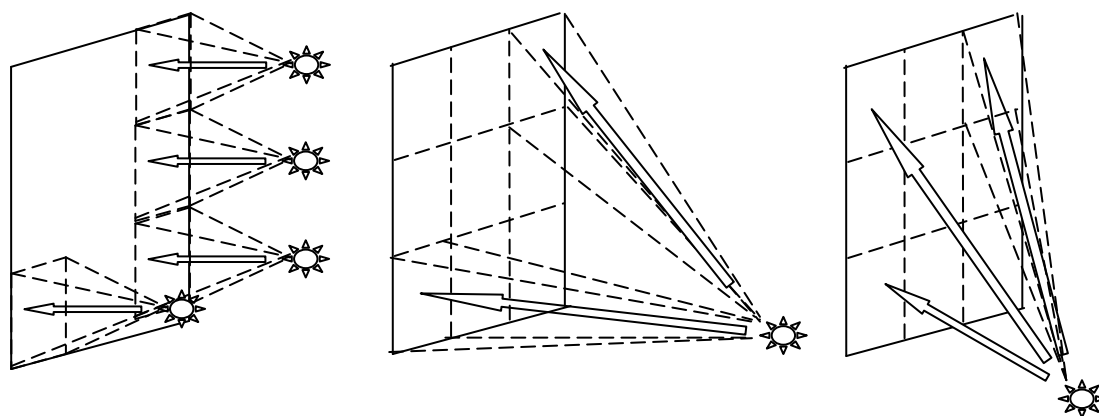


Рис. 4.5.1.3. Слева А) Конструктивное решение для большого проекционного экрана на просвет. Середина Б) Конструктивное решение для проецирования из смещенной позиции на большой проекционный рассеивающий экран. Разные проекционные элементы проецируют под разными углами. Справа В) Проецирование одним элементом в его области проецирования с неравным угловым расстоянием между центрами смежных пикселей во избежание трапецевидного искажения изображения.

Можно предложить этот же рис.4.5.1.3.а и как изображение большого рассеивающего проекционного экрана. В таком случае выполняются малозаметными (тонкими) конструкции, на которых закреплены проецирующие элементы. Такие экраны могут использоваться как рекламные, учебно-демонстрационные, и т.д. и укрепляться на стенах, как внешних (уличных), так и внутренних (в помещениях). Можно отметить, что можно обойтись простейшими средствами теплоотвода (ребрами охлаждения, например) при использовании значительного числа проекционных элементов ограниченной мощности, которые выделяют умеренное количество тепла (освещающих области проецирования умеренных размеров).

Визуальный дискомфорт таких экранов является основным недостатком (от видимых конструкций с проекционным оборудованием). Кроме того, монтаж конструкций с проекционным оборудованием медленнее, чем монтаж экрана (в простейшем случае он просто вывешивается). Проецирование из позиции, смещенной к краю экрана, актуально с учетом вышеизложенного. Обычный настольный проектор дает трапециевидную искаженную картинку в таком случае.

Блок из достаточного количества используется для проецирования из позиции не на нормали к середине экрана, как изображено на рис.4.5.1.3.б., каждый из проецирующих элементов, естественно, освещает соответствующую ему область проецирования. На рис.4.5.1.3.в изображено, как в таком случае избежать трапециевидного искажения изображения. Показано проецирование пикселей в общей для всего большого экрана прямоугольной матрице пикселей одним из проецирующих элементов. Для этого изменяется в системе координат проецирующего элемента их угловое распределение. С учетом заранее введенных в проектор сведений об угле проецирования (на самом деле, указывается пара углов), угловое положение каждого пикселя изменяется по отношению к центру экрана. Проектор преобразует данные о расстоянии до центра экрана, размерах (ширине и высоте) экрана в аналогичные для каждой из областей проецирования проекционными элементами. Затем проекционный

элемент выполняет расчет угловых координат каждого из пикселей в его области проецирования. Вычисленные данные записываются в память, до тех пор, пока не изменится положение проектора относительно экрана. Для проекционного экрана на пропускание актуален этот же рис.4.5.1.3.б,в.

Можно оснастить проекционный элемент фотоприемником узкого углового диапазона и вводить в проектор настройки для преодоления проблем с внешним неравномерным освещением экрана, будут освещены менее ярко некоторые участки области проецирования.

На краю области проецирования, то есть при максимальных углах отклонения луча, отношение между размером пикселя и расстоянием до экрана, как следует из рис.4.5.1.2.а,б, различаются примерно на два порядка. При меньших углах отклонения луча, то есть в средней части области, соотношение на один-два порядка лучше. Но следует ограничиваться узкой областью проецирования, если ограничиваться такими угловыми размерами проецируемого пикселя (при этом количество строк и пикселей в строке все равно не уменьшится). Тогда уже не получится без трапециевидного искажения изображения эффективно проецировать из смещенной позиции, но можно проецировать с большого расстояния. Следует для ограничения угла расширения луча использовать линзу ЖК, в том числе для максимальных углов его отклонения, как описано выше. Зависимость угла расширяющегося проекционного луча от координаты по ширине управляемого преломляющего элемента линейная, как было отмечено выше, на рис.4.5.1.2.б. Это означает, что расширяющийся луч выглядит приблизительно как исходящий из одной точки. Можно определить расстояние до нее, оно на при максимальном угле отклонения луча два порядка больше ширины управляемого преломляющего элемента, и при небольшом угле отклонения луча на четыре порядка больше ширины. То есть при ширине управляемого преломляющего элемента 10 мкм условная точка отстоит на 1мм для крайних углов и для небольших углов на 100мм. Следовательно, если фокус собирающей линзы будет в той точке, где кажется мнимый источник света и ЖК линза будет соосна с управляемым

преломляющим лучом (их центры будут на одной прямой, проходящей посередине выходящего луча, и фокусное расстояние задается в пределах от 1мм до 100мм), то луч будет коллимирован. Дополненный управляемой ЖК линзой проекционный элемент изображен на рис.4.5.1.1.б, линза может регулироваться под необходимые требования.

Даже при максимальных углах расширение луча сформирует пиксель шириной на четыре порядка меньше дистанции проецирования. То есть пиксель будет 1мм при расстоянии до экрана 10м. Размеры экрана (проецированного изображения) будут 4м шириной и 3м высотой при изображении 4000 на 3000 точек. Размеры будут 1.2м на 0.9м при изображении 1200 на 900 точек. Даже в довольно больших помещениях такой проектор может применяться для довольно мелкозернистого проецирования (зрители не различат отдельных пикселей изображения из-за их малой величины). Проектор может использоваться там же, где и проекторы иных типов, предположительно, дешевле их из-за меньшего количества управляемых элементов и превосходя их во многих эксплуатационных ситуациях.

Регулятор яркости поглощает в традиционном проекторе в среднем половину светового потока. Энергоэффективность важна для аккумуляторного проектора. Предложена оригинальная конструкция проектора, яркость регулируется аддитивно (накапливается), отсутствует использование поглощающих регуляторов яркости. Проецирующий в заданном цвете RGB палитры элемент может ни разу за время формирования кадра не осветить пиксель, и он будет иметь нулевую яркость. Может быть сформирован пиксель с высокой яркостью за счет времени его освещения, многократного по продолжительности (по сравнению с обычным). В соответствии с заданной яркостью пикселей перераспределяется, таким образом, световой поток от источника света. Поглощающий регулятор яркости пригодится если, в заданном цвете, вся область (в формируемом кадре) проецирования одного проекционного элемента должна быть черная, но такая ситуация бывает редко.

§3. Проекционный элемент с отдельным вертикальным и горизонтальным отклонением луча света

На рис.4.5.1.4. изображен управляемый элемент. Ячейка с нематическим жидким кристаллом входит в его состав. Луч света падает на ячейку под углом падения, обозначенным на рис.4.5.1.4 как γ . Регулируя ориентационное распределение директора ЖК прикладываемым к ячейке полем, тем самым регулируем вертикальный угол, на который преломляется луч света.

На рис.4.5.1.4 преломленный луч характеризуется углом преломления, он для одного случая не отличается от угла падения γ и не обозначен никаким специальным знаком, для другого обозначен как ϕ . При входе луча в ЖК ячейку, рассмотрим подробнее преломление луча. Оба варианта хода луча показаны на рис.4.5.1.4.а, то есть сверху слева, плоскость поляризации падающего луча света обозначена. Падает луч горизонтально в плоскости рисунка, он поляризован вертикально в плоскости рисунка. Директор ЖК в ячейке, показанный горизонтальными штрихами на рис.4.5.1.4.б, то есть сверху справа, ориентирован горизонтально в плоскости рисунка, параллельно ходу луча, параллельно его плоскости поляризации. Поле при этом отключено. На двух противоположных друг другу сторонах ячейки ЖК нанесено обеспечивающее необходимый азимутальный угол планарно ориентированного ЖК покрытие с микрорельефом, и в отсутствие поля достигается такая ориентация директора ЖК. На рис.4.5.1.4 не показаны обе снабженные прозрачными электродами и покрытые ориентантом поверхности ячейки ЖК, параллельные плоскости рисунка. Для прозрачного изотропного материала, через который луч идет до входа в ячейку, подобран показатель преломления, равный обыкновенному показателю преломления ЖК n_o .

Луч в таком случае [156] идет по прямой. Луч достигает криволинейной поверхности. Назовем ее линзой. Он преломится и выйдет на поверхности линзы. Преломление луча показано на рис.4.5.1.4.в, то есть снизу слева. Обозначен α угол его падения на поверхность линзы. Обозначен β угол

преломления луча. Директор ЖК в плоскости рисунка (в плоскости падения и преломления луча света) ориентирован по полю, перпендикулярно к первоначальному направлению директора, если поле включено (оно перпендикулярно плоскости рисунка) и его напряженность достаточно велика. Тогда луч преломится в соответствии с показателем преломления ЖК необыкновенным n_e , как показано на рис. рис.4.5.1.4.г, то есть снизу справа. Луч дойдет до поверхности линзы и выйдет, преломившись на ней.

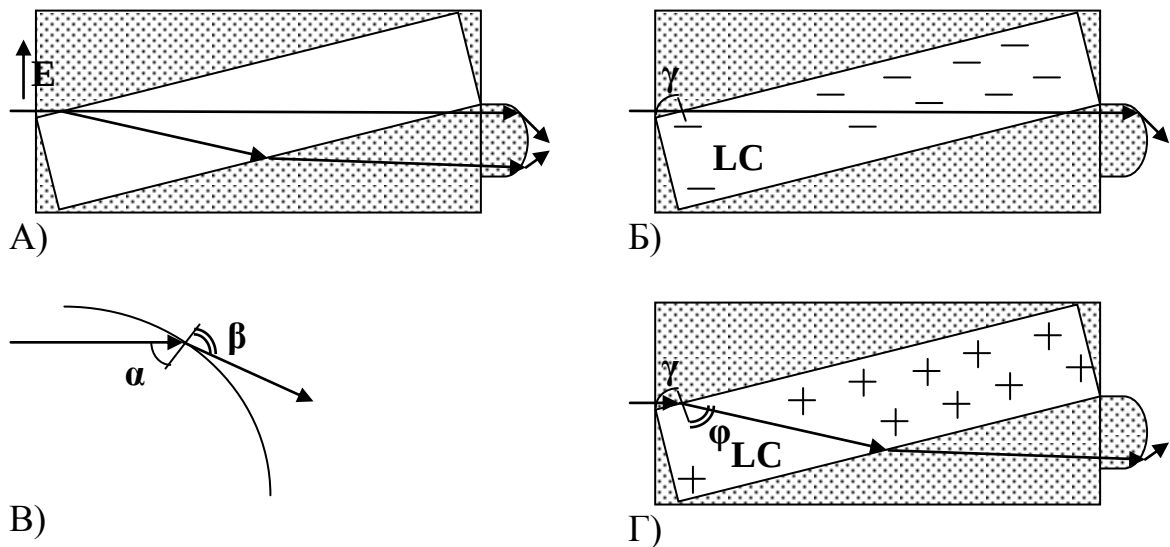


Рис.4.5.1.4. Под воздействием управляющего поля, ЖК ячейка отклоняет луч света по вертикали.

Обеспечим выход луча (регулируя полем ориентацию директора ЖК) через точку поверхности линзы, расположенную между точками выхода рассмотренных выше крайних лучей. Обеспечим в диапазоне между крайними значениями угол преломления выходящего луча. Вертикальный диапазон углов, в пределах которого зрители могут увидеть изображение на экране, и есть этот диапазон. Зачерним (покроем поглотителем) там, где к поверхности линзы приближается луч не преломившийся, то есть как на рис.4.5.1.4.б. Будем пользоваться лучом, преломившимся в соответствии с $n_e \geq n_e^{\text{eff}} > n_0$, для формирования изображения.

На рис.4.5.1.5. изображен обеспечивающий заданный горизонтальный угол луча света управляемый элемент. Ячейка с нематическим жидким кристаллом входит в его состав. Как и на рис.4.5.1.3 (с управляемым элементом, обеспечивающим заданный вертикальный угол), преломляется луч света, падающий на ячейку под углом падения, обозначенным как γ на рис.4.5.1.5. Угол преломления на рис.4.5.1.5, как и на рис.4.5.1.3, обозначен для одного случая как ϕ , для другого он не отличается от угла падения γ и не обозначен.,

Рассмотрим (подобно рис.4.5.1.3) преломление луча при входе в ЖК ячейку. Падающий луча света поляризован горизонтально перпендикулярно плоскости рисунка, падает луч горизонтально в плоскости рисунка рис.4.5.1.5.а. Директор ЖК в ячейке ориентирован параллельно плоскости поляризации луча на рис.4.5.1.5.б, то есть в среднем ряду слева, перпендикулярно его ходу, горизонтально, перпендикулярно плоскости рисунка. При этом поле включено и обеспечивает в плоскости преломления луча полную переориентацию директора ЖК. В ячейке ЖК, на двух противоположных друг другу сторонах, снабженных прозрачными электродами, параллельных плоскости рис.4.5.1.5, нанесено обеспечивающее необходимый азимутальный угол планарно ориентированного ЖК покрытие с микрорельефом. Как было сказано выше, показатель преломления ЖК обыкновенный n_o равен показателю преломления прозрачного изотропного материала.

Если поле выключено, луч преломится в соответствии с показателем преломления ЖК необыкновенным n_e , так как директор ЖК ориентирован вертикально в плоскости рисунка, перпендикулярно к плоскости поляризации луча и к его ходу в плоскости рисунка (в плоскости падения и преломления луча света), как показано на рис.4.5.1.5.в, то есть в среднем ряду справа.

Регулируя полем, обеспечим выход луча через точку поверхности линзы, расположенную между точками выхода рассмотренных выше крайних лучей. Чтобы пользоваться для формирования изображения лучом, преломившимся в

соответствии с $n_e \geq n_e^{\text{eff}} > n_o$, на рис.4.5.1.5.б там, где к поверхности выхода приближается луч не преломившийся, зачерним (покроем поглотителем).

Оба элемента показаны рядом на рис.4.5.1.5.в, то есть внизу. Слева рассмотренный на рис.4.5.1.5.а-в регулятор горизонтального угла отклонения луча, справа рассмотренный на рис.4.5.1.4. регулятор вертикального угла отклонения луча. Регулятор вертикального угла отклонения луча показан в другой проекции, чем на рис.4.5.1.4. На рис.4.5.1.4 плоскость рисунка можно считать вертикальной плоскостью для углов работы проектора. Плоскость рис.4.5.1.5.в для регулятора вертикального угла можно считать горизонтальной плоскостью углов проектора.

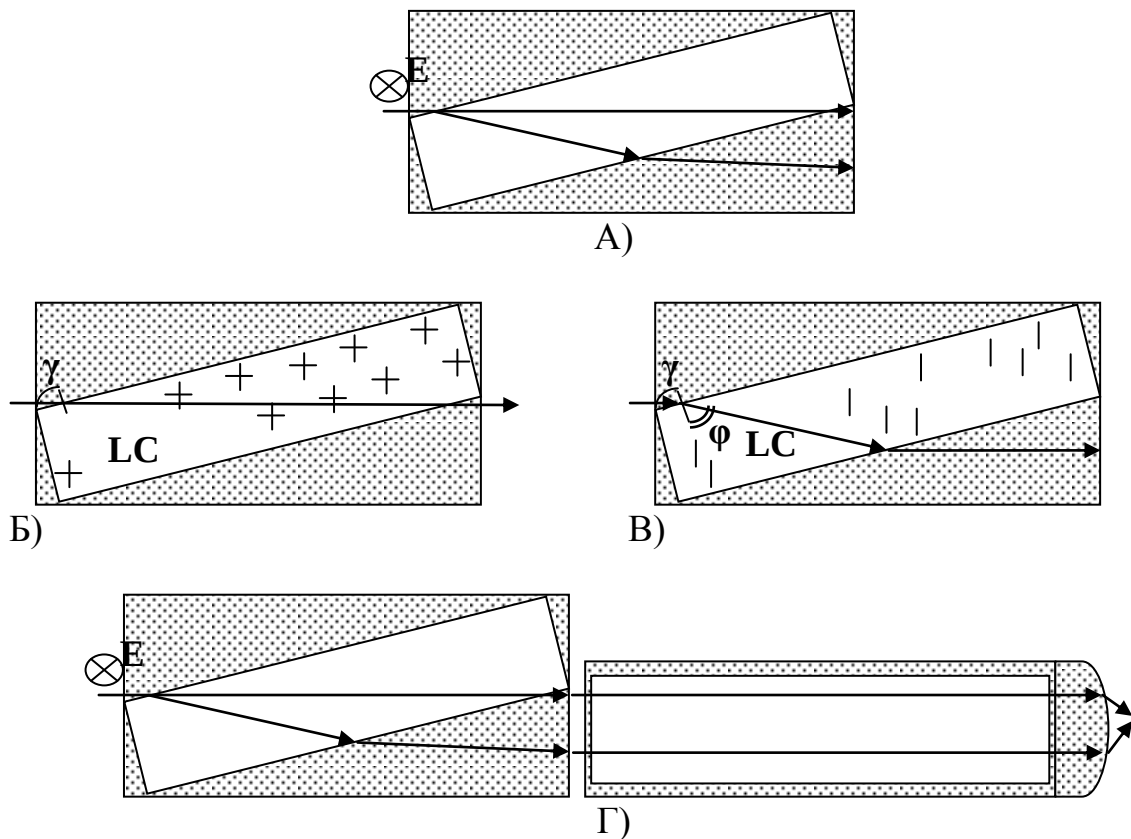


Рис.4.5.1.5. Управляемая полем ЖК ячейка отклоняет луч по горизонтали (внизу – в обеих плоскостях).

Луч света проходит через регулятор вертикальных углов дисплея (расположен в правой части рисунка) и попадает на линзу, преломляясь в диапазоне углов горизонтальных, как видно на рис.4.5.1.5.в, в зависимости от

регулятора горизонтального угла отклонения (расположен в левой части рис.4.5.1.5.в).

Количественные оценки имеют важнейшее практическое значение. Оценен количественно для ячейки ЖК, с показателями преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.65$, угол, на который может быть отклонен луч. Принят равным 76° угол падения луча γ , тогда равен 62° угол преломления ϕ .

Горизонтально идет луч не преломленный. Преломленный под углом преломления 62° луч отклоняется вниз на 14° в плоскости рис.4.5.1.4.

Угол падения α принят равным 41° , для преломления на линзе (вторая среда воздух), тогда угол преломления β равен 80° . Это означает на рис.4.5.1.4 для точки падения луча горизонтального, что образует 41° к горизонтали нормаль к поверхности линзы, тогда образует к горизонтали угол 39° преломленный линзой луч (отсчет угла вниз в плоскости рис.4.5.1.4).

Это означает для точки на рис.4.5.1.4 падения луча преломленного вниз на 14° , что нормаль к поверхности линзы образует 55° к горизонтали, тогда угол 25° (отсчет угла вверх в плоскости рис.4.5.1.4) образует к горизонтали преломленный линзой луч. Получаем 39° вправо и влево для горизонтальных углов. Примерные размеры элементов пикселя на рис.4.5.1.6.

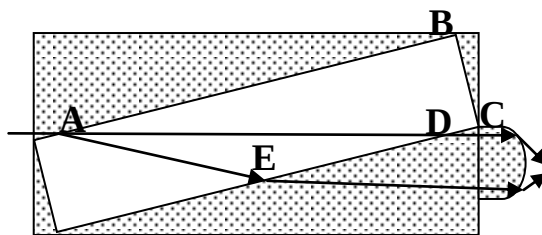


Рис.4.5.1.6. Обозначения отрезков.

Если между крайними точками выхода лучей из линзы около 100 мкм, то 200 мкм толщина слоя ЖК (отрезок BC) в ячейке на рис.4.5.1.4; 400 мкм расстояние (отрезок ED) между крайними точками выхода луча из ячейки; не менее 800 мкм сторона ячейки (отрезок AB). Около 300 мкм габарит пикселя по вертикали.

5.2. Дисплей на основе жидких кристаллов с многопользовательским направленным распределением визуальной информации

§1. Элемент (пиксель) дисплея и преимущества его использования

Чрезвычайно широко используются визуально отображающие информацию системы (экраны). Создает необходимость в соответствующем количестве экранов индивидуального назначения скопление большого числа потребителей визуально отображаемой и при этом индивидуально различной информации. В свою очередь, это может создавать дополнительные технические требования к планировке помещений, их архитектуре, и т.д. В данной работе предложено решение задачи об информационной визуально отображающей поверхности, которая могла бы показывать различным пользователям индивидуально различную информацию (видеоряд).

Отклонение луча от нормали (полуширина области наблюдения зрителем данного пикселя), как следует из рис.4.5.1.2, может быть 15 см при расстоянии до зрителя 1 м, и размеры пикселя составят 30 см (сторона квадратной области наблюдения зрителем данного пикселя). Как следует из рис.4.5.1.2, ширина области, освещенной расширившимся лучом, составит около 1,5см при отклонении луча на 15 см. Для средней части области проецирования отклонение будет меньше, расширение луча тоже уменьшится и освещенное пятно будет уже. Зритель не увидит изображение, а только область экрана шириной не более 1,5см, хотя ему необходимо одновременно видеть весь экран. При этом, чтобы увидеть именно данную область экрана, его глаза должны находиться в пределах строго определенной области шириной 30 см,. Необходимо решить две задачи: чтобы зритель одновременно видел лучи с разных краев дисплея, то есть его весь, расширить световой луч, прошедший через элемент дисплея; чтобы зрители могли располагаться многочисленно и не

загораживать экран друг другу, расширить углы отклонения луча до 60 градусов к нормали экрана.

Можно оснастить дисплей средствами, определяющими расстояние и направление на каждый из значительного числа маяков, 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.. Зритель будет тогда хорошо видеть изображение на дисплее, в направлении каждого из зрителей можно направлять световой поток от каждого из пикселей дисплея так, чтобы он проходил в каждой точке ограниченной по размерам области вокруг маяка.

Можно обслуживать значительное число зрителей при частоте кадров 25 кадров в секунду (как в кинофильмах), частоте переключения односторонней ячейки несколько сотен герц (Гц), передавая каждому из них индивидуальное изображение. То есть каждый зритель будет пользоваться дисплеем как своим, но находящимся на некотором увеличенном расстоянии от него и иметь свой пульт управления телевизором или клавиатуру компьютера (звук через наушники).

Следует, как описано выше, использовать линзу ЖК для увеличения угла расширения луча, а также для увеличения максимальных углов его отклонения. Зависимость угла (как было отмечено выше, на рис.4.5.1.2) расширяющегося проекционного луча от координаты по ширине управляемого преломляющего элемента линейная. Расширяющийся луч выглядит приблизительно как исходящий из одной точки, расстояние до которой можно определить. При максимальном угле отклонения луча оно на два порядка больше ширины управляемого преломляющего элемента, и при небольшом угле отклонения луча на четыре порядка больше ширины. То есть для крайних углов условная точка отстоит на 1мм при ширине управляемого преломляющего элемента 10 мкм и на 100мм для небольших углов. Следовательно, чтобы осветить область достаточной ширины вокруг индивидуального маяка зрителя, расширит световой поток от одного элемента до требуемого угла расхождения крайних

его лучей рассеивающая линза ЖК, фокус которой совпадает с упомянутой выше условной точкой. На рис.4.5.2.1 изображен дополненный управляемой (может регулироваться под необходимые требования) ЖК линзой элемент дисплея.

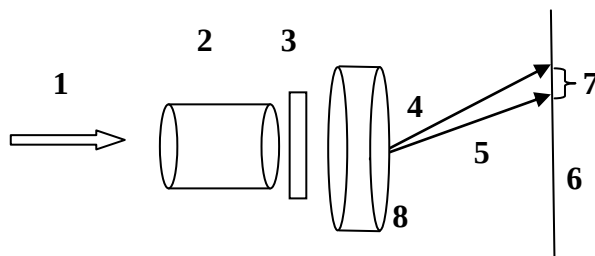


Рис.4.5.2.1. Элемент дисплея с использованием управляемого преломляющего элемента. Луч света **1** проходит через ячейку **2**, на торцах которой управляющие электроды, поляризатор и анализатор. Она регулирует интенсивность пропускания. Затем отрегулированный по интенсивности луч света поступает на управляемый 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.

Как показано выше, рассеивающая ЖК линза эквивалентна сферической стеклянной. На рис.4.5.2.2 показано, как луч преломляется, выходя из рассеивающей линзы **4**, в точке, где нормаль к поверхности линзы образует угол с осью линзы, и при этом угол луча к оси линзы значительно увеличивается. Так, например, при показателе преломления материала линзы 1.5 (стекло), угле **9** величиной 30 градусов между нормалью **8** в точке преломления луча и осью линзы (прямая **6** параллельна оси), и угле **3** между лучом **1** до преломления и осью (параллельна оси прямая **2**) величиной 5.7 градуса, угол **7** между лучом преломленным **5** и осью линзы (прямая **6** параллельна оси) приблизится к 60 градусам, то есть почти пойдет вдоль поверхности линзы в точке преломления.

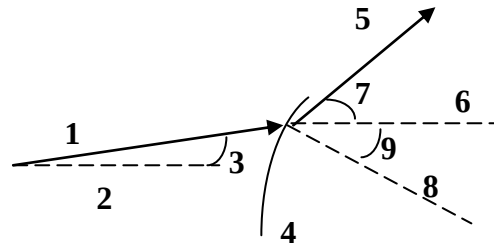


Рис.4.5.2.2. Луч преломляется, выходя из рассеивающей линзы **4**, в точке, где нормаль к поверхности линзы образует угол с осью линзы, и при этом угол луча к оси линзы значительно увеличивается. При угле **9** между нормалью **8** в точке преломления луча и осью линзы (прямая **6** параллельна оси), и угле **3** между лучом **1** до преломления и осью (параллельна оси прямая **2**), угол **7** между лучом преломленным **5** и осью линзы (прямая **6** параллельна оси) будет больше чем до преломления луча.

Как показано выше, для ЖК линзы вполне можно получить соответствие стеклянной линзе с углом нормали к поверхности с осью до 30 градусов включительно. Можно обеспечить, следовательно, отклонение луча до 60 градусов к нормали. При этом с двух метров расстояния будет освещена область в 30 сантиметров диаметром, то есть расширение луча резко увеличится и обеспечит освещение лучом области шириной в несколько раз меньше, чем расстояние до нее (до зрителя). Это позволяет зрителю располагать индивидуальный маяк на расстоянии несколько меньше 30см от органов зрения, в двух метрах от экрана, что в целом достаточно удобно.

Таким образом, технически возможно обеспечить группу зрителей индивидуальным изображением на экране для каждого зрителя и поставленная задача решена. Однако в составе каждого пикселя экрана при этом возрастает количество управляемых элементов, что делает его дороже. Однако один экран может быть удобен при наличии каких-либо ограничений на размещение нескольких экранов и заменяет их.

§2. Элемент (пиксель) дисплея с отдельным вертикальным и горизонтальным отклонением луча света

Управляемый элемент аналогичен (с той разницей, что линза выполняется не собирающая, а рассеивающая) предложенному выше для проектора. Приведенные выше рассуждения об углах и размерах актуальны для него. Кратко повторим их.

Оценен количественно угол, на который может быть отклонен луч, для ячейки ЖК, с показателями преломления $n_o=1.5$, $n_e=1.65$. Образуется к горизонтали угол 39° луч, преломленный линзой вниз. Образуется к горизонтали угол 25° луч, преломленный линзой вверх. Получаем 39° вправо и влево для горизонтальных углов. По вертикали габарит пикселя около 300 мкм.

5.3. Многопользовательский жидкокристаллический дисплей с фиксированными индивидуальными секторами размещения зрителей

§1. Основные новые оптические элементы предлагаемого ЖК дисплея

Предложен дисплей, показывающий различную визуальную информацию различным группам пользователей, расположенным в фиксированных секторах. Пиксели ЖК дисплея обеспечивают за время показа одного кадра, как показано на рис.4.5.3.1, каждому фиксированному сектору (характеризуется строго определенным диапазоном углов по вертикали и горизонтали) со зрителями индивидуальный видеоряд.

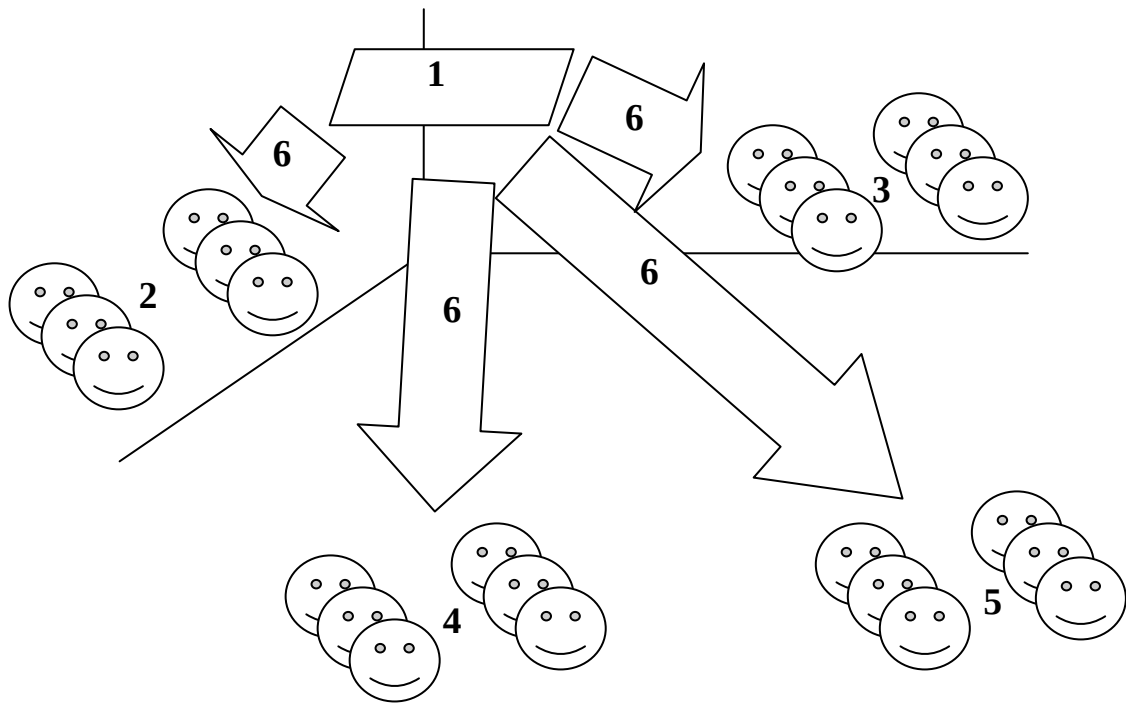


Рис.4.5.3.1. 1 отображающая поверхность; 2, 3, 4, 5 области с потребителями информации, видящими индивидуальное для каждой области изображение; 6 испускаемые отображающей поверхностью информационные (световые) потоки.

В состав пикселя (рис.4.5.3.2) входит регулятор горизонтальных углов отклонения, описанный выше, он направляет луч на неуправляемые оптические элементы. Каждый элемент (рис.4.5.3.3) снабжен линзой, рассеивающей луч в его фиксированный сектор. Яркость пикселя изображения, видимого зрителями в заданном фиксированном секторе, определяется временем освещения лучом света оптического элемента, перенаправляющего световой поток в данный фиксированный сектор. По закону зависимости угла от времени, так, чтобы время освещения каждого из оптических элементов соответствовало яркости пикселей изображений, передаваемых ими в их фиксированных секторах, луч света поворачивается управляемым регулятором горизонтальных углов, излишки светового потока поглощаются черными поглощающими элементами, расположенными между оптическими элементами.

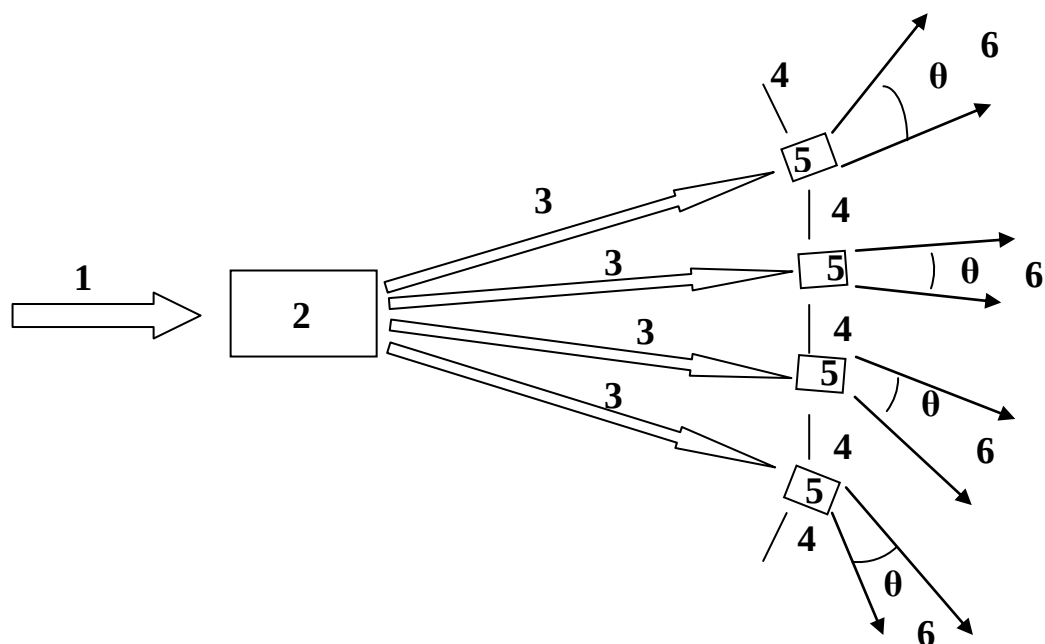


Рис.4.5.3.2. 1 луч подсветки; 2 управляемая ЖК ячейка, отклоняющая луч в плоскости рисунка; 3 отклоненные световые потоки; 4 поглотители; 5 рассеиватели света равномерно в заданных угловых диапазонах; 6 потоки света в заданных угловых диапазонах.

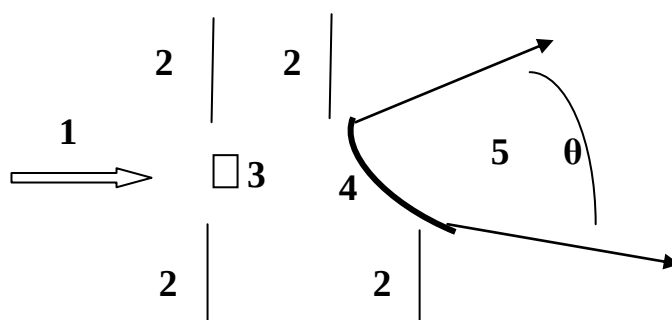


Рис.4.5.3.3. 1 прошедший управляемую ЖК ячейку луч; 2 поглотители; 3 люминесцентный элемент; 4 криволинейная поверхность, преломляющая луч света в направлении зрителей; 5 световой поток к зрителям.

Управляемый регулятор углов с частотой переключения 100 Гц обеспечит передачу луча на четыре оптических элемента и, соответственно, фиксированных сектора с различными индивидуально видеоизображениями по 25 кадров в секунду. Для управляемого регулятора горизонтальных углов наиболее удобен луч лазера, позволяющий избежать обусловленного зависимостью показателей преломления от длины волны заметного углового расхождения выходящего луча. Это позволит в регуляторе горизонтальных

углов уменьшить толщину слоя жидкого кристалла, увеличить скорость переключения. С ростом быстродействия регулятора возрастает количество секторов с индивидуальным видеорядом, но сокращается время послания светового сигнала в каждый из них, создавая эффект короткой яркой вспышки, что повышает утомляемость зрения при длительном просмотре. Узкий спектр луча (например, лазер) некомфортен для зрения при длительном просмотре.

К преимуществам люминесцентного элемента в конструкции на рис.4.5.3.3 можно отнести то, что он продлевает короткую вспышку света и уширяет в увеличенных длинах волн спектр светового луча. Комфортны для зрения умеренно узкие диапазоны длин волн RGB палитры. Для луча лазера на длине волны, кратчайшей для соответствующего цветового RGB диапазона, люминесцентный элемент расширит его спектр до комфортного. Для люминесцентного элемента испускание света во все стороны можно отнести к недостаткам, что резко уменьшает попадающее на криволинейную выходную поверхность (линзу) количество света. Следовательно, люминесцентный элемент может быть исключен из конструкции в случае, когда требуется энергоэкономный дисплей и не вполне подходит для энергоэкономных систем.

Возможно исключение, в целях удешевления конструкции, криволинейной выходной поверхности (линзы). Использовать в таком случае диафрагмирование черными поглощающими элементами светового потока от люминесцентного элемента для обеспечения фиксированного сектора размещения зрителей световым потоком. Однако, так как криволинейная выходная поверхность (линза) позволяет собрать в фиксированном секторе световой поток от люминесцентного элемента из более широкого диапазона углов, чем фиксированный сектор, снизится доля светового потока, направляемая к зрителям.

Линза позволяет расфокусировать (линза расфокусирующая) световой поток в заданный фиксированный сектор размещения зрителей для варианта конструкции без люминесцентного элемента.

Линза позволяет повысить энергоэффективность, собрать (линза фокусирующая) широкоугольный световой поток от люминесцентного элемента в заданный фиксированный сектор размещения зрителей для варианта конструкции, включающего люминесцентный элемент.

§2. Индивидуальное распределение светового потока для зрителя, перемещающегося в пределах фиксированного сектора

На рис.4.5.3.4 показан пример деления на фиксированные зоны, в которых могут обслуживаться по несколько зрителей, всего визуального пространства дисплея. Перемещение индивидуальных световых потоков в пределах одного фиксированного сектора обеспечивается поворотом луча в одной плоскости. Ближний к экрану край светового пятна движется по внутренней (ближней к экрану) границе фиксированного сектора, а внешний край - по внешней. Индивидуальные пользователи расположены в ряд с произвольными интервалами и произвольно меняются местами в ряду. Они не должны совмещаться, тогда их световые потоки смешаются. Пользователь находится (его органы зрения) на некоторой высоте. Границы фиксированных секторов проектируются на некоторой высоте, экран вешивается на расчетной высоте и склоняется на заданный угол. Изменение этих параметров приводит к изменению формы фиксированных секторов и может осуществляться именно с этой целью. Возможны экраны для эксплуатации в амфитеатре и в иных помещениях заранее заданной геометрии.

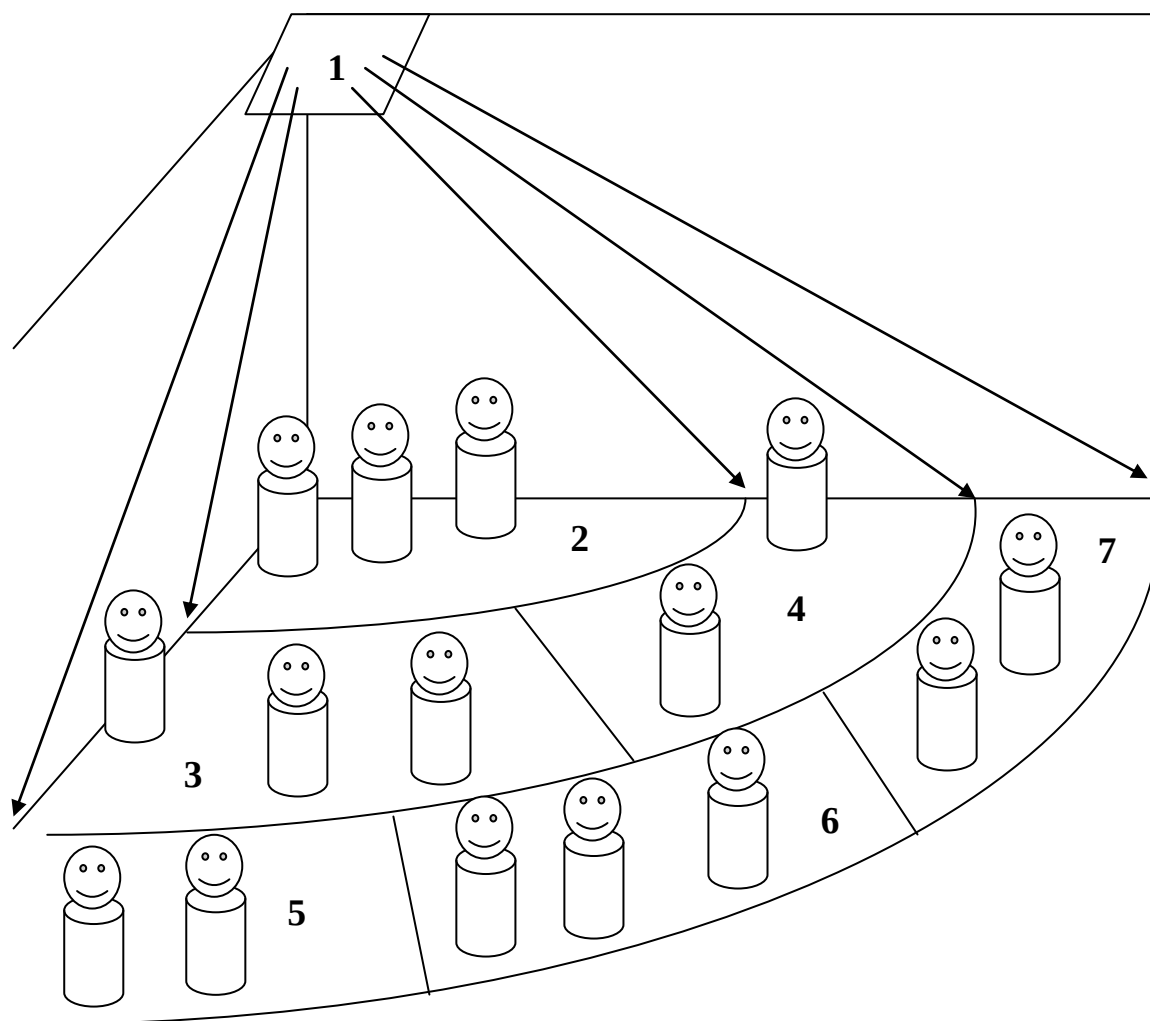


Рис.4.5.3.4. 1 отображающая поверхность; 2, 3, 4, 5, 6, 7 заданные угловые диапазоны, в которых видна индивидуальная для каждого диапазона видеоинформация.

Оптические элементы (рис.4.5.3.5) управляемые, предназначены для регулирования горизонтальных углов отклонения луча света в сравнительно узких фиксированных секторах со зрителями, что позволяет значительно уменьшить габариты элементов и увеличить скорость переключения. Скорость составит приблизительно сотни переключений в секунду и позволит разместить в каждом фиксированном секторе, при 25 кадрах в секунду, 10-20 зрителей, то есть сто и более человек в помещении, обеспечить индивидуальное видеоизображение для зрителей, притом могущих переходить с места на место. Если зритель переходит в другой фиксированный сектор, то он там и обслуживается далее.

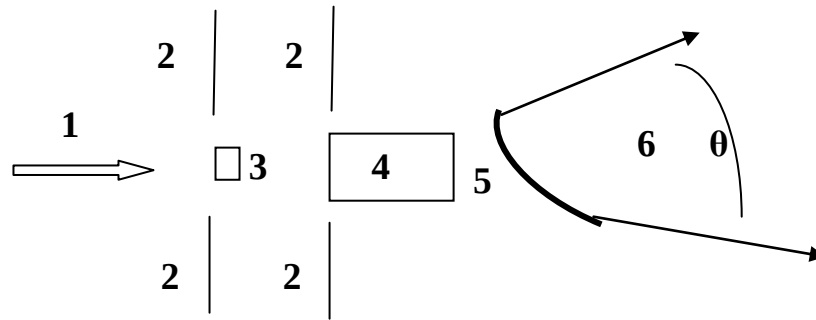


Рис.4.5.3.5. 1 прошедший управляемую ЖК ячейку луч света; 2 поглотители; 3 люминесцентный элемент; 4 управляемая ЖК ячейка направляет луч на заданную часть криволинейной поверхности; 5 криволинейная поверхность, преломляющая луч к зрителям; 6 угловой диапазон расположения зрителей.

Как показано на рис.4.5.3.5, луч света падает на люминесцентный элемент и управляемый регулятор углов отклонения луча света успевает много раз переключиться между пользователями, посылая каждому из них свет от люминесцентного элемента, при свечении люминесцентного элемента до следующей смены кадра. Регулятор отклоняет луч на малые углы, направляя его на различные участки линзы и этим определяя, куда он будет преломлен выходной криволинейной поверхностью, направляющей его к индивидуальному зрителю в фиксированном секторе.

На рис.4.5.3.6 показана яркость люминесцентного элемента в зависимости от времени, убывающая по экспоненте, и яркость формируемых для зрителей световых импульсов. Яркость пикселя определяется временем, в течение которого световой луч посылается к данному зрителю. Излишек света люминесцентного элемента направляется в конце цикла обслуживания зрителей на поглотитель, так как яркость одного и того же пикселя в нескольких индивидуально различных видеокдрах не бывает максимальной во всех из них. Изменяющаяся со временем яркость люминесцентного элемента и различная продолжительность импульсов обеспечивают для каждого из световых импульсов различную площадь под кривой зависимости яркости от времени. Следовательно, видимая различными зрителями яркость пикселя различна. К концу интервала времени показа одного кадра, яркость

люминесцентного элемента для формирования максимально яркого пикселя в кадре какого-либо зрителя еще достаточно велика. Интервалы переключения оптического элемента чередуются с полезными интервалами времени.

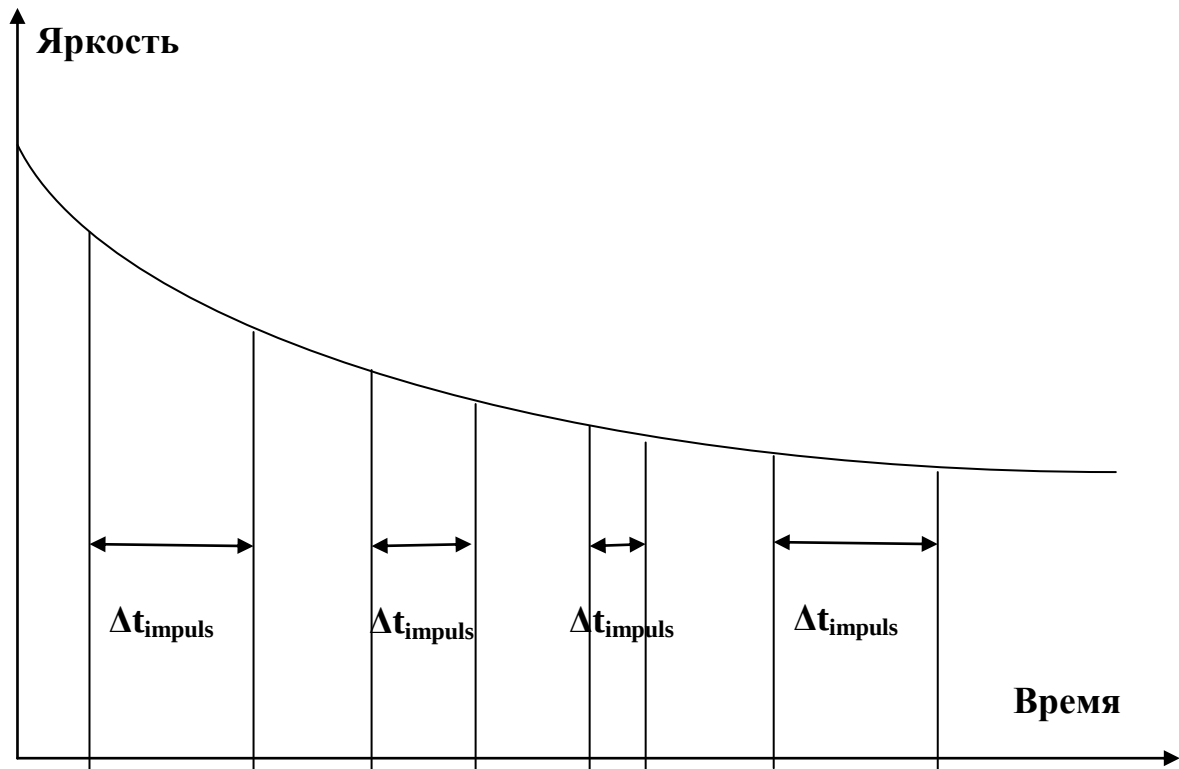


Рис.4.5.3.6. Интервалы времени отображения информации чередуются с интервалами переключения оптического элемента.

Лишь часть испускаемого люминесцентным источником света используется. Однако в действительности энергоэффективность экрана вполне приемлемая. Традиционный дисплей, освещающий потолок помещения и прочие нефункциональные направления, освещает значительно большую площадь, чем сумма индивидуальных площадок. Та часть света, которая направляется к зрителям, создает достаточную яркость видимого ими экрана.

5.4. Формирование индивидуального и в том числе стереоскопического изображения очками на основе нематических жидких кристаллов

§1. Узкополосное (лазерное) формирование изображения. Очки

Предложено решение на основе ЖК очков (рис.4.5.4.1) актуальной проблемы: многопользовательского экрана (проекционного или ЖК дисплея) с индивидуальным интерактивным видеоизображением, в том числе в стереорежиме. Проекционное изображение формируется лазерным проектором. За время показа одного кадра проецируется большое число различных картинок для различных пользователей или их групп, кратковременно проецируя на экран картинку для определенного пользователя.

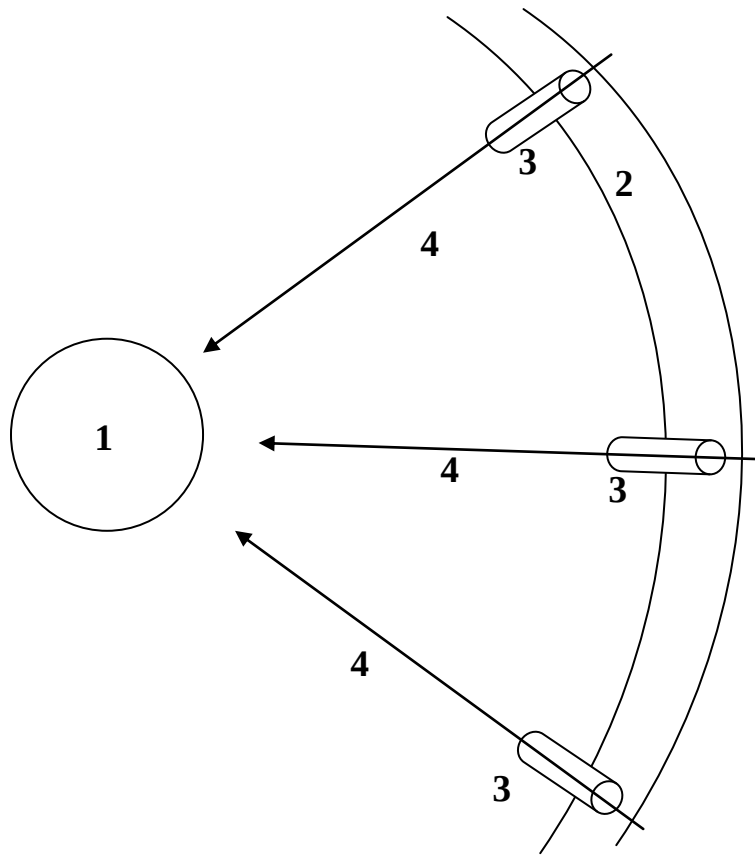


Рис.4.5.4.1. 1 глаз; 2 сферическая пористая матрица, центр совпадает с глазом; 3 поры в матрице, оси пор направлены на центр глаза; 4 направление на центр глаза.

Очки (рис.4.5.4.1) выполнены в виде матрицы, в порах которой, перпендикулярных поверхности матрицы, расположены последовательно светофильтр (одного из трех проекционных цветов в одной поре, со спектральными диапазонами пропускания, согласованными с проекционными лучами света), затем люминофор. Узкий некомфортный спектральный диапазон

лазерного луча, прошедшего через светофильтры, преобразуется люминофором в комфортный, одного из составляющих RGB палитры. Выходной светофильтр в той же поре матрицы корректирует люминесцентный спектр. Выбирается состав люминофора, время угасания люминесценции которого соответствует 25 кадрам в секунду. Формируется комфортное изображение без вспышечного и без лазерного утомления зрения. ЖК очки подбираются под индивидуальные параметры зрителей, под расстояние между центрами глаз. Их матричные поры направлены осями на центр глазного яблока, матричная структура ограничена сферическими поверхностями с центром, совпадающим с центром глазного яблока человека. Расстояние от люминесцентного слоя до выходного сечения поры матрицы подбирается так, что выходящий из матричных пор световой поток диафрагмируется выходным углом, соответствующим освещению всего глазного яблока, чтобы человек видел как середину поля зрения, так и периферию.

§2. Узкополосное (лазерное) формирование изображения с поляризационным разделением для разных зрителей

Поляризационный светофильтр расположен поверх очков. Зрителям с взаимно перпендикулярной поляризацией их очков это позволяет видеть индивидуальные картинки. Аналогично для стереоизображения можно формировать «правую» и «левую» картинки для одного зрителя. Проектор оснащается планарной ЖК ячейкой, обеспечивающей разность фаз Φ , в отсутствие поля соответствующую одному из двух направлений поляризации проецирующего света. При приложенном поле, разность фаз Φ изменяется и плоскость поляризации выходящего лазерного луча перпендикулярна предыдущей, при заданном потенциале на электродах. Таких ЖК ячеек необходимо три (для всех лучей проектора). Следовательно, необходим проектор с раздельным проецированием тремя разными световыми лучами.

§3. Узкополосное формирование изображения с повременным разделением

Обеспечим просмотр зрителем его картинки, используя ЖК очки с переключением «прозрачно» / «не прозрачно», в его индивидуальное время просмотра. Прошедший через оптический затвор ЖК очков свет преобразуется, как описано выше, предотвращая вспышечное и лазерное утомление зрения. При быстродействии проектора в сотни кадров в секунду, для индивидуальных зрителей или их групп десять и более индивидуальных картинок по 25 кадров в секунду. Обеспечим вдвое меньшее количество зрителей стереоизображениями, показывая поочередно «правую» и «левую» картинки при условии, что их ЖК очки переключаются в соответствующем режиме, то есть поочередно правый и левый глаза очков. Используя поляризационные светофильтры, разные для разных глаз очков зрителя, можно обеспечить стереорежим с строго одновременным видением изображения правым и левым глазами, что более комфортно.

§4. Узкополосное формирование изображения с спектральным разделением для разных зрителей

Несколько не зависящих друг от друга проекторов проецируют на один экран. Спектральные полосы проекторов согласованы и не перекрываются. С проекторами согласованы полосы пропускания светофильтров ЖК очков, разные зрители видят картинки от разных проекторов. Требуется исходный свет для люминесцентных слоев по верхнему частотному краю соответствующего RGB диапазона или превышающий его. Нужны проецирующие лучи фиолетовой части спектра для люминесцентного формирования синей части RGB. Они дойдут до ультрафиолетовой части спектра, которая сильно поглощается воздухом, если увеличивать число не перекрывающихся спектрально лучей. При этом возможны затруднения с подходящим материалом для проекционного экрана. Таким образом, число индивидуальных проецируемых картинок не превысит десятка. Однако для

пользователей, чьи ЖК очки пропускают одни и те же диапазоны проецирующих лучей, спектральное разделение может сочетаться с вышеописанными повременными принципами разделения картинок, и будет несколько десятков или сто зрителей (или групп зрителей) с индивидуальным видеорядом на проекционном экране. Общие энергозатраты на проецирование возрастут и будут пропорциональны числу индивидуальных видеокартинок.

Аналогичные принципы применимы и к ЖК дисплеям.

§5. Многопользовательский стереодисплей

Выше рассмотрены принципы размещения зрителей так, чтобы ЖК дисплей показывал каждому из зрителей его индивидуальную картинку. Зрителю, имеющему один или пару маячков, свободно передвигающемуся перед ЖК дисплеем, может быть показана стереопара из двух картинок для правого и левого глаза. Если зритель носит один маячок (примерно на переносице), ЖК дисплей формирует два световых потока для этого зрителя, один поток не соприкасается с маячком и освещает область правее, другой, аналогично, левее. Для пары маячков, над правым и левым глазами, световые потоки ориентируются по маячкам, голову можно наклонять.

Чем дальше находится зритель от ЖК дисплея, тем более края освещенных зон видения изображения размываются. При стереопросмотре расстояния скорее характерны для работы на компьютере, чем для просмотра большого коллективного экрана. Обе эти проблемы требуют использования луча лазера для увеличения числа пользователей и расстояния стереовидения. Для преодоления связанных с быстро переключающимся лазерным изображением отмеченных выше недостатков, зритель может быть снабжен специальными очками, описанными выше.

5.5. Формирование жидкокристаллическим объемным дисплеем реалистичного стереоскопического изображения

§1. Основные новые оптические элементы предлагаемого ЖК дисплея

Предложены новые принципы функционирования и конструктивные решения ЖК дисплея с объемным отображающим пространством. Требуются пиксели, распределенные в объеме (воксели) и воспроизводящие рассеяние света точками поверхности предмета, заданное распределение испускаемого света по направлениям. Внутри изображаемого предмета, если он предполагается непрозрачным, пиксель не светит. В объеме вертикально располагаются световоды, в торце они соединены с источником поляризованного света одного из цветов RGB. С заданным шагом по вертикали пиксели (воксели) располагаются на каждом световоде. Визуально наблюдаемый светящийся элемент изображения образуют на трех параллельных световодах три пикселя RGB цветов. Каждый пиксель состоит из нескольких колец, разделенных на несколько сегментов, вокруг световода. Чтобы свет, поступающий в сегмент (субпиксель) из световода, рассеивался в заданном диапазоне углов с заданным распределением интенсивности по направлениям, каждый субпиксель имеет внешнюю поверхность соответствующей криволинейной формы. Субпиксели верхнего кольца светят в смежных с вертикалью направлениях вверх. Симметрично, нижнее кольцо светит вниз. Остальные кольца субпикселей светят в заданных диапазонах вертикальных углов, обеспечивая все диапазоны. Субпиксели каждого кольца светят с таким разделением диапазонов горизонтальных углов, что обеспечивают все диапазоны. Конструктивно обусловленное освещение элементами пикселя по направлениям и регулирование времени свечения каждого из них используется для обеспечения требуемого распределения света по направлениям. Каждым из цветов RGB палитры в каждом из конструктивно заданных угловых поддиапазонов можно задать большое число градаций яркости. Регулируя приложенным электрическим полем пространственное распределение директора нематического ЖК, заполняющего субпиксель,

регулируя тем самым световой поток, поступающий в субпиксель из световода, осуществляется регулирование времени свечения каждого субпикселя.

Сечение световода стремится к такому, которое можно назвать плоскопараллельным с малой долей поверхности боковых сторон: прямоугольное, с большим отношением основной стороны к боковой. Поляризация света от источника в плоскости, параллельной плоскости основной стороны световода. Ориентация директора ЖК на поверхности, отделяющей его от световода, планарная, параллельно основному направлению луча света в световоде, то есть вертикально, при выключенном (не светящемся) состоянии ячейки (субпикселя). Ячейка односторонне ориентированная, как описано выше. Ее сторона, граничащая со световодом, покрыта материалом, не влияющим на ориентацию используемого сорта ЖК. Другая сторона ячейки покрыта ориентантом, задающим угол наклона директора ЖК в вертикальной плоскости, содержащей направление директора ЖК на поверхности, граничащей со световодом, и нормаль к поверхности световода. Ячейка планарная, то есть угол, заданный ориентантом, минимальный. При включенном (светящемся) состоянии ячейки (субпикселя) на поверхности, отделяющей его от световода, ориентация директора ЖК гомеотропная, горизонтально, то есть перпендикулярно основному направлению луча света в световоде. Используя прозрачные электроды, нанесенные на стенки ячейки, включением поля обеспечивается поворот директора ЖК, переориентирующего жидкий кристалл. В ячейке угол директора распределяется по ее толщине, в соответствии с напряженностью поля и упругими свойствами ЖК. На ориентированной стороне угол наклона директора ЖК не изменяется.

Пропускание света из световода в ячейку включается или выключается переориентированием директора ЖК в слое у поверхности, граничащей со световодом. Возьмем достаточно характерные показатели преломления нематического ЖК, $n_o=1,5$, $n_e=1,65$. Пусть показатель преломления среды, заполняющей световод $n_{light}=1,55$. Стенкой ячейки ЖК непосредственно является материал, заполняющий световод. Прозрачные электроды нанесены на

него. Пусть среда вне световода и пикселя, заполняющая объем дисплея, изотропна и имеет показатель преломления $n_{\text{out}}=1,5$. ЖК ориентирован планарно, вдоль основного направления света в световоде, когда ячейка выключена. Луч света, поляризованного параллельно основной (более длинной) стороне световода, неоднократно отражается от стенок световода. При отражении выбранное направление поляризации хорошо сохраняется. Показатель преломления материала световода больше, чем обыкновенный показатель преломления жидкого кристалла (так как условия падения луча света вдоль директора соответствуют падению по нормали на гомеотропную ячейку ЖК, эффективный показатель преломления жидкого кристалла равен обыкновенному), будет полное (так называемое полное внутреннее преломление) отражение луча света от границы раздела. Соответственно, в ячейку свет практически не будет поступать. ЖК ориентирован под действием поля гомеотропно, перпендикулярно к основному направлению света в световоде и перпендикулярно к его плоскости поляризации, когда ячейка включена. Будет преломление луча света на границе раздела, поскольку показатель преломления материала световода меньше, чем необыкновенный показатель преломления жидкого кристалла (условия падения луча света вдоль директора соответствуют падению по нормали на планарную ячейку ЖК, и эффективный показатель преломления жидкого кристалла равен необыкновенному). Следовательно, в ячейку ЖК поступит часть светового потока, идущего по световоду.

При расчете одного объемного кадра изображения, для световода учитывается, насколько световой поток ослабевает после прохождения мимо пикселя, отбирающего некоторую часть света. Это увеличивает расчетное время светопропускания для следующего пикселя.

Можно разделять объем дисплея в многозадачном многопользовательском интерактивном режиме, то есть каждый будет рассматривать ту часть объема, которая его интересует, в ближайшей к себе

части дисплея, задать ей режим освещения со своей стороны, и остальные пользователи ее не увидят.

Можно оснастить каждого пользователя индивидуальным маяком, и тогда световой поток будет направляться к нему от видимой с его стороны изображаемой объемной фигуры. Каждый будет видеть в интерактивном интерфейсе только изображение того объекта, которое он пожелает.

Места для пользователей можно разместить в фиксированных зонах. Как уже описано выше, каждый пиксель светит в совокупности фиксированных конструктивно диапазонов углов по вертикали и по горизонтали. Регулирование времени свечения соответствующих этим направлениям субпикселей используется для обеспечения требуемого распределения света по фиксированным направлениям. Индивидуально различный интерактивный объемный видеоряд могут смотреть столько пользователей (групп пользователей), сколько у пикселя объемного дисплея конструктивно заданных угловых поддиапазонов, аналогично рис.4.5.3.1. Исходя из предполагаемого размещения зрителей (групп зрителей), могут проектироваться пиксели объемного дисплея. Его можно устанавливать на потолке, на полу (подставке, столе) и использовать его с тех направлений, откуда он виден, соответственно, с небольшим числом фиксированных секторов и необслуживаемыми зонами, откуда нельзя увидеть дисплей. С помощью интерактивного интерфейса пользователь, желая посмотреть на другую сторону отображаемого объекта, поворачивает его изображение. Описанная выше конструкция пикселя показана на рис.4.5.5.1. Строго определенным диапазоном углов по вертикали и горизонтали характеризуется каждый фиксированный сектор пикселя и, соответственно, объемного дисплея, в пределах которого одним субпикселем направляется индивидуальный информативный световой поток. Группы зрителей в каждом из фиксированных секторов фактически видят световой поток от обращенного к ним субпикселя.

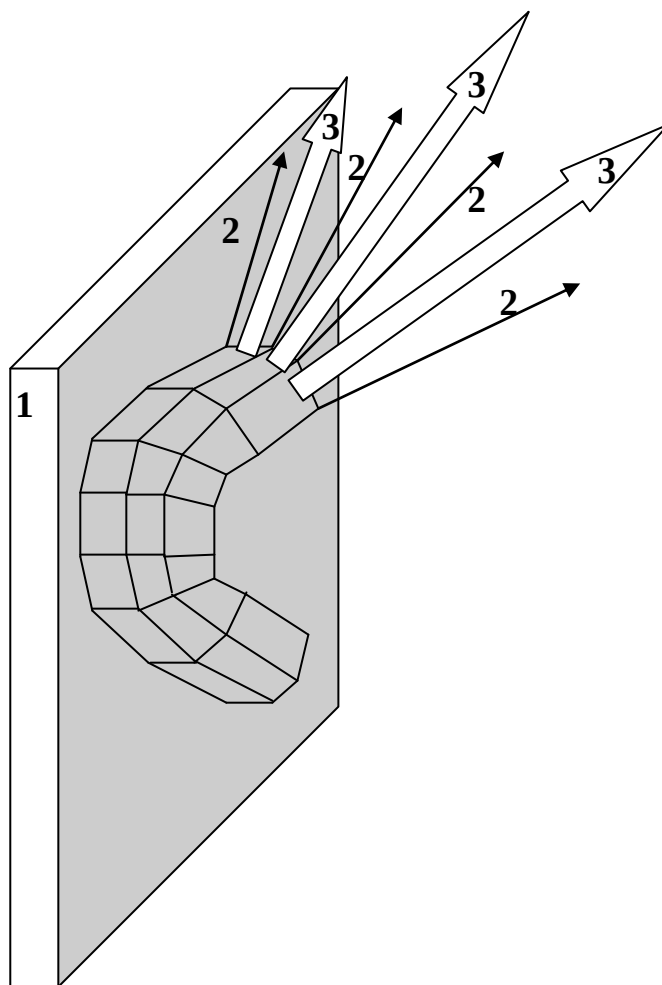


Рис. 4.5.5.1. 1 световод и фрагмент одной из половин пикселя на световоде. Многогранную поверхность пикселя образуют поверхности субпикселей; 2 границы световых потоков; 3 световые потоки в заданных угловых диапазонах, в каждом из которых формируется индивидуальный для каждого сектора объемный видеоряд.

Часть 6. Жидкокристаллические композитные ячейки для оптического пинцета

§1. Оптическое манипулирование объектами

Нашло широкое применение в различных областях науки и техники оптическое манипулирование диэлектрическими частицами от десятков нанометров до сотен микрометров, объектами от атомов до больших молекул, живыми биологическими объектами, а также сортировка таких объектов. Актуально создание расположенного непосредственно под предметным стеклом устройства для микроманипуляций.

Давление света воздействует на непрозрачную (поглощающую или отражающую) частицу, заставляя частицу перемещаться вдоль луча. Воздействие, перемещающее частицу как вдоль, так и поперек луча оказывает на прозрачную частицу световой пучок с неравномерной плотностью энергии в сечении. В сфокусированном луче частица с показателем преломления большим, чем у окружающей прозрачной среды (жидкости), перемещается к оси луча, а затем к фокусу, к наибольшей интенсивности пучка. Вылетают из области высокой интенсивности пучка частицы с показателем преломления меньшим, чем у окружающей среды, например, микропузырьки воздуха в глицерине [157].

Захват лучом диэлектрической частицы меньше (сопоставимой) длины световой волны происходит в соответствии с представлениями о световом потоке, как об электромагнитной волне. Нейтральная частица поляризуется, появляется дипольный момент. Частица, ориентируясь по полю, смещается в область максимальной интенсивности излучения [157].

Предложено в [158] покрыть дно кюветы отражающим слоем. Микроскопические объекты, находящиеся в кювете будут тогда в результате интерференции падающей и отраженной волн локализованы в пучностях стоячей волны. Предлагается использовать в [159], для локализации частиц с малым показателем преломления, продольно локализованную нулевую

интенсивность в фокусе (суперпозицию двух Лагерр-Гауссовых пучков, с специально подобранным фазовым сдвигом), окруженном областями высокой интенсивности.

Воздействуя на заряженную частицу (диполь), электрическое поле лазерного излучения ориентирует молекулу (диполь) вдоль направления поля при постоянном дипольном моменте. Не имеющие постоянного дипольного момента, нейтральные атомы и молекулы поляризуются под действием поля (оптический эффект Керра) [160]. Среда становится оптически анизотропной в области прохождения луча. На оси оптического луча собираются пучки поляризуемых молекул [160]. Могут быть захвачены нейтральные атомы в точку стабильного равновесия между максимумами интенсивности поля стоячих волн [161]. Параллельно распространяющийся пучок нейтральных атомов может быть отклонен лучом лазера при частоте света, настроенной близко к атомному резонансу, действующими на индуцированный атомный диполь поперечными дипольными силами давления излучения (пропорциональными градиенту электрического поля) [162]. Захватываются в центральной (осевой) темной части частицы с низким показателем преломления сильно сфокусированным кольцевым (полым) пучком [163]. Захвачены Лагерр-Гауссовым пучком ненулевого порядка холодные атомы рубидия [164]. Механизм рассеяния света и, соответственно, захвата, для частиц с радиусом много меньше длины волны излучения, для металлов и диэлектриков одинаков [165]. В кольцевой части Лаггер-Гауссова пучка ($m=1$) трехмерный захват металлических частиц осуществляется сразу под перетяжкой, пучок направлен снизу вверх, отмечено внеосевое вращение захваченной частицы [166]. Бесселевым пучком, направленным снизу вверх, осуществлены захват и манипулирование группой частиц [167].

Стабильно захватывать в сильно сфокусированном пучке большинство биологических объектов позволяет то, что они имеют показатель преломления выше, чем у воды.

§2. Оптические элементы на основе ЖК-композитов и их применение

Как описано выше, используя матрицу с цилиндрическими порами получим, поместив в них описанный выше композит с цилиндрической ЖК нитью по оси, возможность регулировать интенсивность (вплоть до полного его погашения) индивидуального луча света, прошедшего через одну из пор матрицы. Как было показано выше, может быть индивидуально задана поляризация индивидуального луча, но в дальнейшем при эксплуатации оборудования она не изменяется. Можно задавать одинаковую поляризацию для выбранных по какой-либо логике лучей (при изготовлении матрицы с ЖК композитом в порах), например, одинаковую для всех в заданной строке матрицы.

Надо учитывать, кроме того, что частица под влиянием тепловых колебаний выскочит из луча по мере снижения градиента интенсивности луча, приводящего захватываемую частицу к оси луча. Несфокусированный луч света утрачивает в своей удаленной части способность удерживать частицу, расширяясь по мере удаления от матрицы и снижая градиент. Можно устанавливать в порах матрицы для увеличения плотности потока энергии (интенсивности) на оси луча в его удаленной части, также еще и ЖК-линзы, специально разработанные для установки в матрице из цилиндрических пор, вслед за ЖК-композитным регулятором интенсивности и поляризации. Их фокусные расстояния определяются при изготовлении матрицы, их содержащей и составляют от десятков микрон до десятков миллиметров. В таком случае луч сможет по крайней мере от области захвата, близкой к матрице, перемещать давлением света захваченную частицу до области фокуса.

2.1. Оптический пинцет как аналог мембранной сепарации

Матрица показана на рис.4.6.1 слева и лучи света. Экран с отверстиями, расположенными так же, как поры матрицы изображен справа. Следовательно, каждый луч света будет перемещать захваченные в ближней к матрице области

частицы, в дальнюю область, отделенную экраном с отверстиями. Захват лучом селективен, на основе приведенных выше литературных данных, и лишь какая-то категория частиц будет успешно захватываться и перемещаться в дальнюю часть через перфорированный экран из смеси частиц с различными характеристиками, в том числе различными размерами и различными диапазонами прозрачности, что в свою очередь обусловлено их физической и химической природой.

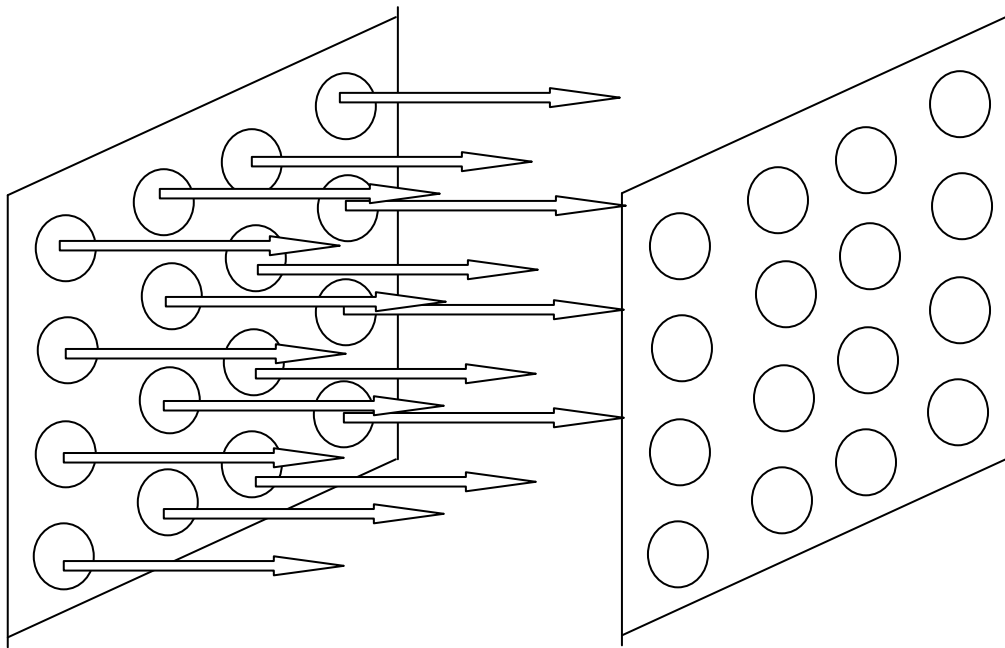


Рис.4.6.1. Разделение смеси частиц.

Будем полагать, что первоначально содержащий смесь частиц раствор добавили в ближнюю область, а в дальней области их не было. Тогда такой же эффект, как использование мембранных технологий с заданным селективным пропусканием дадут оптический захват и перемещение частиц. Отверстия перфорированного экрана действуют, пропуская частицы определенного сорта односторонне, как своего рода клапаны, то есть частицы не могут пройти обратно против направления луча. Отверстия составляют, в то же время, площадь на несколько порядков меньшую, чем площадь экрана. Следовательно, минимально диффузионное поступление в дальнюю (за экраном) область ненужных компонентов смеси.

Частицы, перемещенные лучом, благодаря тепловому движению (диффузии) заменяются вновь поступившими в луч, достаточно большая площадь боковой (цилиндрической) границы луча как зоны захвата. В то же время нежелательна высокая температура, так как ведет к выходу частиц из захвата.

2.2. Оптический пинцет для химического реактора.

Показано на рис.4.6.2, как селективно извлекаются из двух разных емкостей частицы веществ **A** и **B**, для чего можно применить (если данные вещества имеют разные диапазоны пропускания) два разных по длине волны луча. Также длина волны выбирается с учетом размеров частиц этих веществ. Через перфорированные (как на рис.4.6.1) экраны, они собираются в расположенную посередине емкость и в области, где одновременно находятся фокусы обоих встречных лучей, вступают в химическую реакцию. То есть фокусы совмещены настолько близко для каждой пары встречных лучей, насколько это возможно.

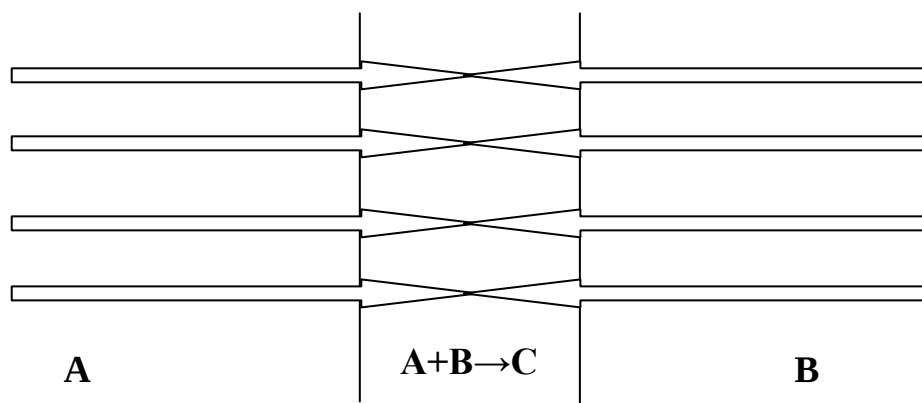


Рис.4.6.2. Сближение частиц разных сортов

Будут взаимно мешать концентрации частиц в фокусе соосные лучи, поэтому оси лучей должны быть параллельными и близкими друг к другу (на экспериментально определенном для них оптимальном расстоянии). Для реакции в области между фокусами концентрация реагентов будет наиболее благоприятная.

Таким образом, без участия остальных компонентов исходных смесей обеспечивается реакция именно нужных веществ. Кроме того, обеспечивается их высокая концентрация, что позволяет использовать бедные этими веществами исходные смеси и может быть необходимо для реакции при невысокой температуре.

2.3. Оптический пинцет для многостадийного химического реактора

На рис.4.6.3 показано для многостадийного химического процесса применение оптического пинцета. Обеспечим многостадийный процесс между частицами (твердыми или каплями эмульсии) при невысокой температуре, соединив, например трубами, показанные на рис.4.6.2 системы емкостей с реакциями $A+B \rightarrow C$ и $D+E \rightarrow F$ с системой емкостей с реакциями $C+F \rightarrow G$, что актуально в химической технологии.

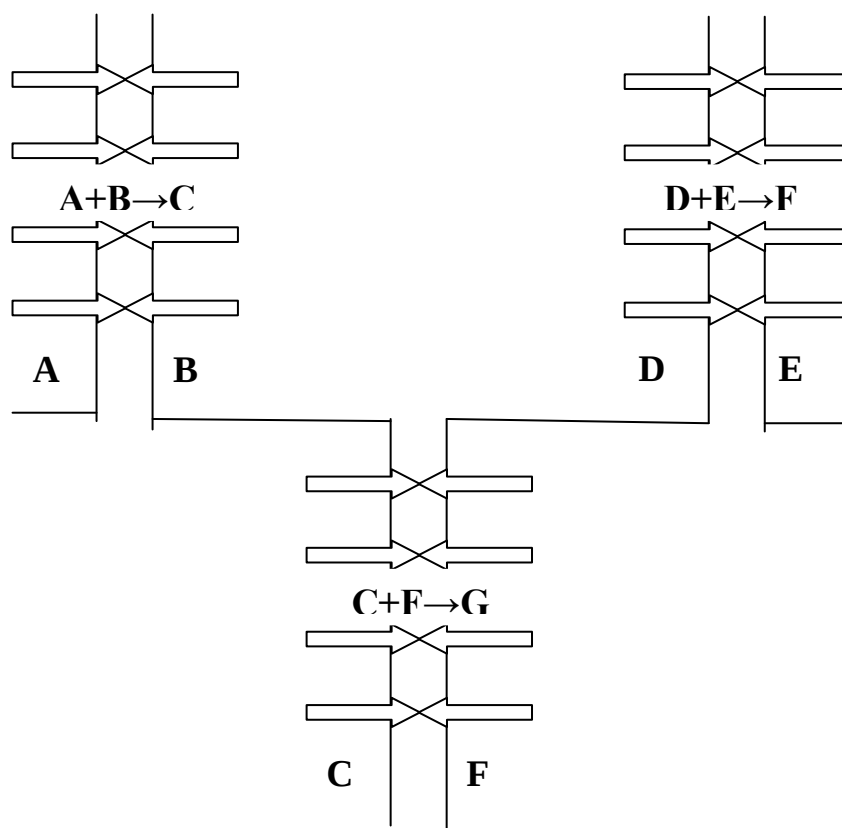


Рис.4.6.3. Сложная последовательность сближений частиц, например, для обеспечения реакций их друг с другом

2.4. Оптический пинцет с концентрированием захваченных частиц в местах скрещивания лучей

На рис.4.6.4 показаны исходящие из двух разных матриц в взаимно перпендикулярных направлениях, лежащих в плоскости рисунка, лучи оптического пинцета. Перпендикулярны плоскости рисунка их векторы электрического поля E . Благодаря совпадению плоскости поляризации, в местах скрещивания лучей образуются максимально интенсивные области, куда накапливаются частицы, захватываемые лучами. Таким образом, концентрировать частицы можно в нескольких различных местах на протяжении одного луча, а не в одном месте (оптическом фокусе).

Как уже упоминалось выше, регулировать интенсивность луча позволяют ЖК-компонитные элементы в порах матрицы, вплоть до его погашения. Таким образом, уменьшаем удержание частицы в месте пересечения лучей, уменьшая интенсивность луча, она сможет выйти оттуда и пойти вдоль оставшегося интенсивным луча. Это произойдет тогда, когда направление ее теплового колебания совпадет с направлением интенсивного луча и сможет превзойти удерживающую силу ослабленного луча. Следовательно, мы обеспечиваем, уменьшая интенсивность одного из скрещенных лучей, последовательное покидание места перекрещивания лучей частицами, отсортированными по их влияющим на их удержание параметрам. Эти частицы вдоль интенсивного луча дойдут до следующего места скрещивания и там остановятся. При этом они в зависимости от комплекса их характеристик, определяющих давление луча (оптические характеристики и размеры), сопротивление среды (геометрическая форма и размеры), движутся с различной скоростью.

Таким образом, перемещать и при этом сортировать частицы по широкому ряду их характеристик позволяет оптический пинцет со скрещенными, регулируемые по интенсивности лучами. Можно также и накапливать частицы с нужным сочетанием характеристик в нужном месте: А) в одном из мест скрещивания лучей; Б) в конце хода луча (на поверхности); В) в

емкости за перфорированным экраном (рис.4.6.1), расположенным перед фокусным расстоянием луча.

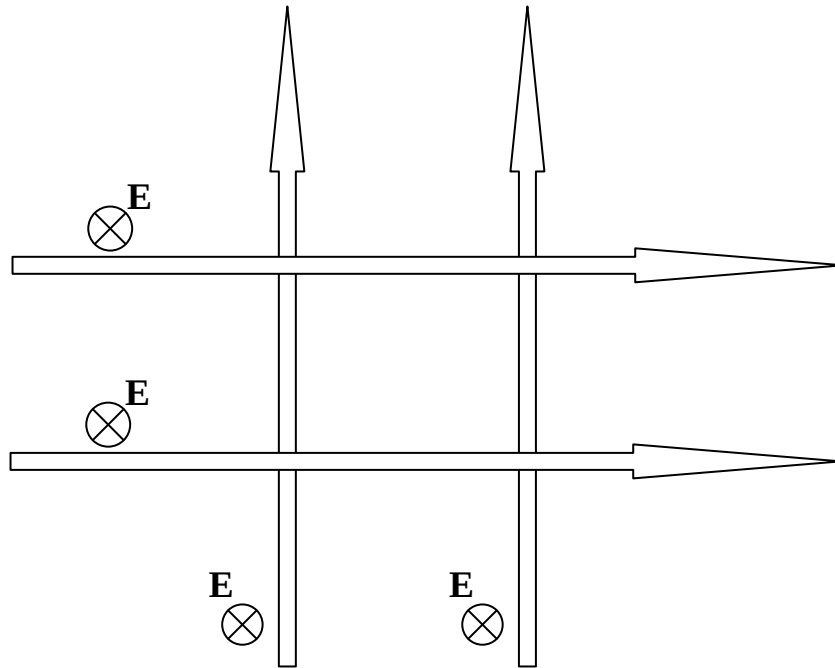


Рис.4.6.4. Сортировка частиц по широкому ряду параметров скрещенными лучами с регулируемой интенсивностью.

2.5. Оптический пинцет обеспечивает селекцию частиц по их способности покидать луч света

Матрица, из которой исходят лучи света, показана на рис.4.6.5 слева, а правее нее показана система перфорированных экранов. В пространстве между матрицей и первым из экранов частицы захватываются, туда и подается раствор со смесью разнообразных частиц. Луч света постепенно расширяется, и уменьшается привлекающий частицы на ось луча градиент интенсивности. Перемещаясь вдоль луча под давлением света, в соответствии со своими размерами, прозрачностью, показателем преломления, геометрической формой, то есть параметрами, определяющими их способность выйти из луча под влиянием тепловых колебаний при заданной температуре среды, частицы выходят из луча. Различные емкости, в которых накапливаются частицы, отсортированные по комплексу их характеристик, разделяет система

перфорированных экранов. Состав отсортированных частиц будет существенно различаться при различных температурных режимах.

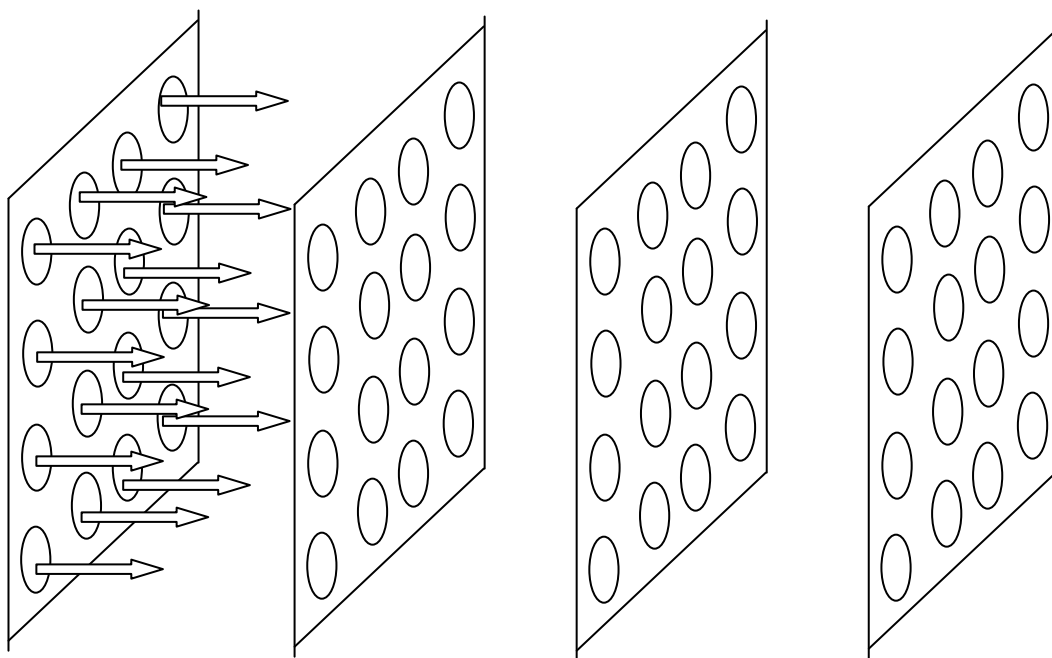


Рис.4.6.5. Сортировка частиц.

2.6. Оптический пинцет обеспечивает трехмерное манипулирование и селекцию частиц

Трехмерное оптическое манипулирование частицами показано на рис.4.6.6. Используются три матрицы, их способность формировать максимумы интенсивности излучения определяют поляризации лучей. Таким образом, частицы, скопившиеся в точках максимумов, в зависимости от регулирования интенсивности индивидуальных лучей, перемещаются вдоль соответствующего интенсивного луча.

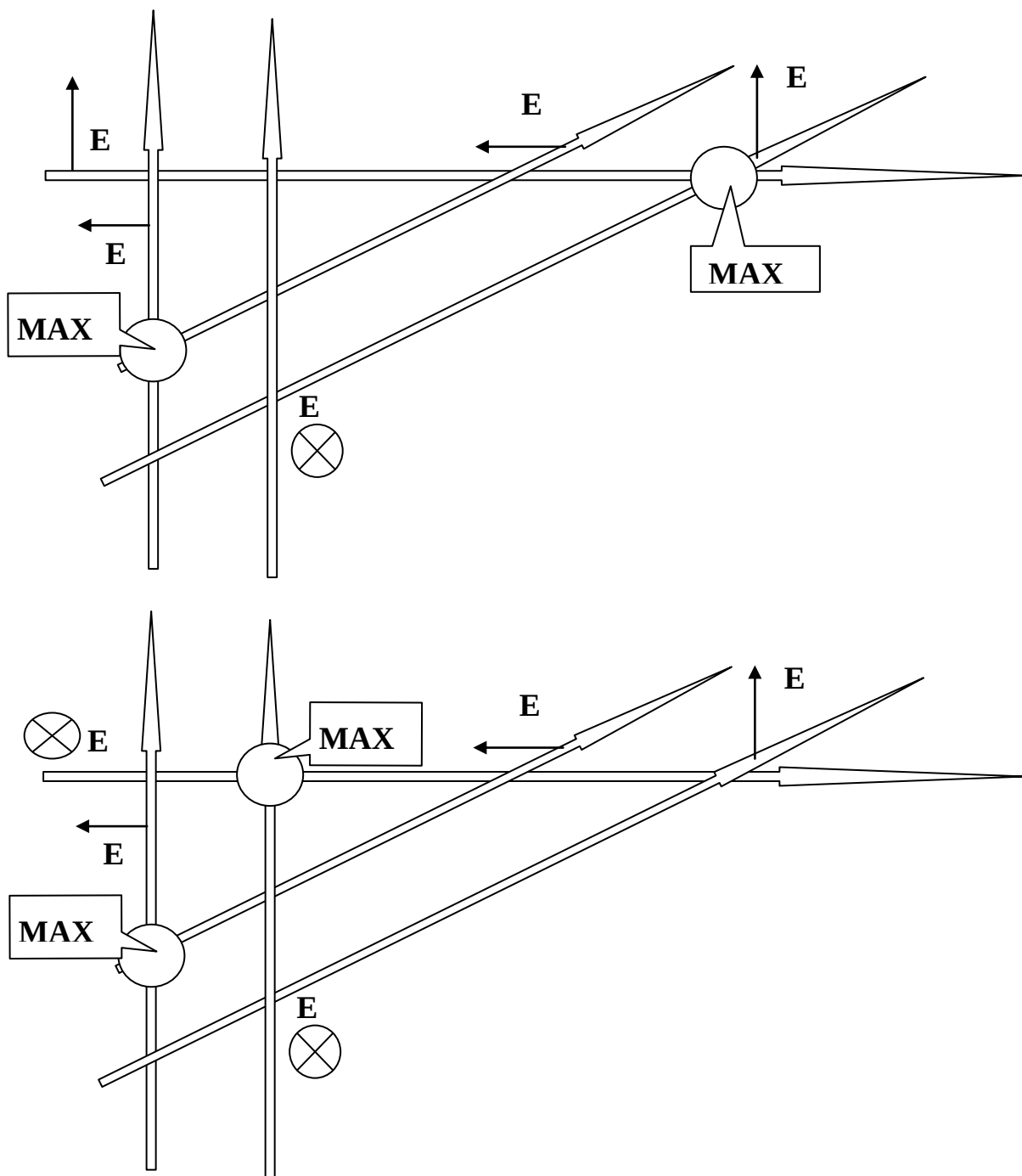


Рис.4.6.6. Трехмерное оптическое манипулирование.

2.7. Оптический пинцет с элементной базой с каплями ЖК

Получение и свойства ЖК-компози́тов с каплями ЖК рассмотрены выше. Луч света имеет в поперечном сечении темную область на оси в скрещенных поляризаторах на входе и выходе матрицы, в цилиндрических порах которой ЖК-композит с каплей ЖК в его объеме, на оси поры. Такие лучи в оптическом манипулировании используются с частицами с показателем преломления,

меньше чем у среды. Таким образом, возможны и для частиц с меньшим показателем преломления вышеописанные применения оптического пинцета, если матрицу оснастить ЖК-композитом с каплями ЖК.

Выше рассмотрены преобразующие исходный луч в совокупность сонаправленных лучей с различными длинами волн сферические капли как резонаторы WGM эффекта. Это позволяет широкое разнообразие различных частиц захватывать (от длины волны непосредственно зависит фокусное расстояние ЖК линз, описанных выше, так как необыкновенный показатель преломления ЖК зависит от длины волны), концентрировать их в различно расположенных фокусах.

Таким образом, возможности оптического манипулирования, описанного выше, увеличивает применение ЖК-композитов с каплями ЖК в качестве резонатора WGM эффекта.

В оптических манипуляторах могут быть использованы материалы на базе исследованных ЖК-композитов.

Предложены новые приложения оптического манипулирования в физических и химических технологиях, включающих манипулирование мелкими частицами.

Часть 7. Светоориентируемые ячейки нематического ЖК с одной стороной, покрытой ориентантом

§1. Светоориентируемая односторонне ориентированная ячейка ЖК

Управление ориентацией мелких частиц достаточно освоено с помощью воздействия луча света (в том числе инфракрасного). Механизм их ориентации изучен, в том числе под влиянием электрического поля поляризованного света. Как отмечено в [168], при соблюдении ряда условий, мелкие частицы при повороте плоскости поляризации ориентируются по электрическому полю луча света и могут вращаться. Хорошо известны ориентационные эффекты смесей довольно длинных (до несколько микрон) частиц и ЖК сред, их содержащих. Например, окрашенная длинная частица поворачивается под влиянием ЖК (синхронно), изменяется проекция окрашенных частиц в направлении наблюдения, и окраска слоя соответственно изменяется (эффект «гость-хозяин»).

Односторонне покрытая ориентантом ячейка с плоским слоем нематического ЖК и ее ориентирование электрическим полем была рассмотрена выше. Мелкоступенчатое изменение ориентационно-оптических свойств слоя ЖК в ячейке позволяет задавать то, что поверхность ЖК ячейки разделена на большое число пар прозрачных электродов. Для условно выделенных в виде узких полос ячеек управление оптическими свойствами выражается в управлении показателем преломления.

Выше рассмотрены позволяющие направлять в прозрачную среду равноотстоящие лучи света и регулировать их индивидуальную интенсивность матричные структуры ЖК-композит. Отмечена возможность создавать подсветку с различной поляризацией (от плоской до круговой) и различную динамику ее изменения благодаря индивидуально задаваемому углу поворота плоскости поляризации луча.

В данной работе предлагается добавлять хорошо ориентируемые лучом поляризованного света мелкие частицы в нематические ЖК. В таком случае

эффект, симметричный хорошо известному эффекту «гость-хозяин» (по существу, эффект Керра) будет формировать луч света, проходящий вдоль слоя ЖК. Ориентируемые лучом света частицы, с учетом упругой реакции нематического ЖК, окружающего их, будут стремиться к положению, определяемому направлением поляризации света и его интенсивностью. Если плоскость поляризации света перпендикулярна подложке, то можно обойтись без электродов, о которых говорилось выше в тексте, поле заменит собой то, которое создавалось бы электродами.

В таком случае, как показано на рис.4.7.1, появляется уникальная возможность формировать по толщине ячейки управляемое распределение директора ЖК, в том числе линейное. Толщина слоя ЖК, подвергающегося воздействию ориентирующего поля, определяется в зависимости от того, сколько рядов матрицы ЖК-композитных регуляторов светового потока включено (имеют значения интенсивности пропускания, отличные от нуля). Будет происходить переориентирование (который будет затем транслироваться до другой стороны ячейки ЖК) от угла θ_0 приповерхностного до угла θ_{const} . Разница между θ_0 и θ_{const} тем больше, чем интенсивней излучение (ориентирующее воздействие поля) и чем толще слой, просвечиваемый интенсивным ориентирующим потоком оптического (или инфракрасного) излучения с соответствующей (вертикальной на рис.4.7.1, в плоскости рисунка) поляризацией.

Если задать неравномерную послойно интенсивность просвечивающего излучения (отрегулировать матрицей ЖК-композитных регуляторов, описанной выше) то можно, очевидно, обеспечить линейное пространственное распределение директора ЖК в диапазоне от θ_0 до θ_{const} . Таким образом, получим систему, эквивалентную двум ЖК ячейкам, одна с постоянным углом θ_{const} наклона директора ЖК, другая с заданным распределением (в том числе, возможно, линейным) в диапазоне от θ_0 до θ_{const} . Во многих устройствах (например, в дисплеях пара ЖК регулятор пропускания и компенсатор) есть пара ЖК ячеек. Описаны выше оптические и диэлектрические свойства слоев

ЖК с линейным распределением директора. Управляя ориентационным распределением директора ЖК, как описано выше, можно получить различные периодические структуры, дифракционные свойства которых описаны выше в данной работе.

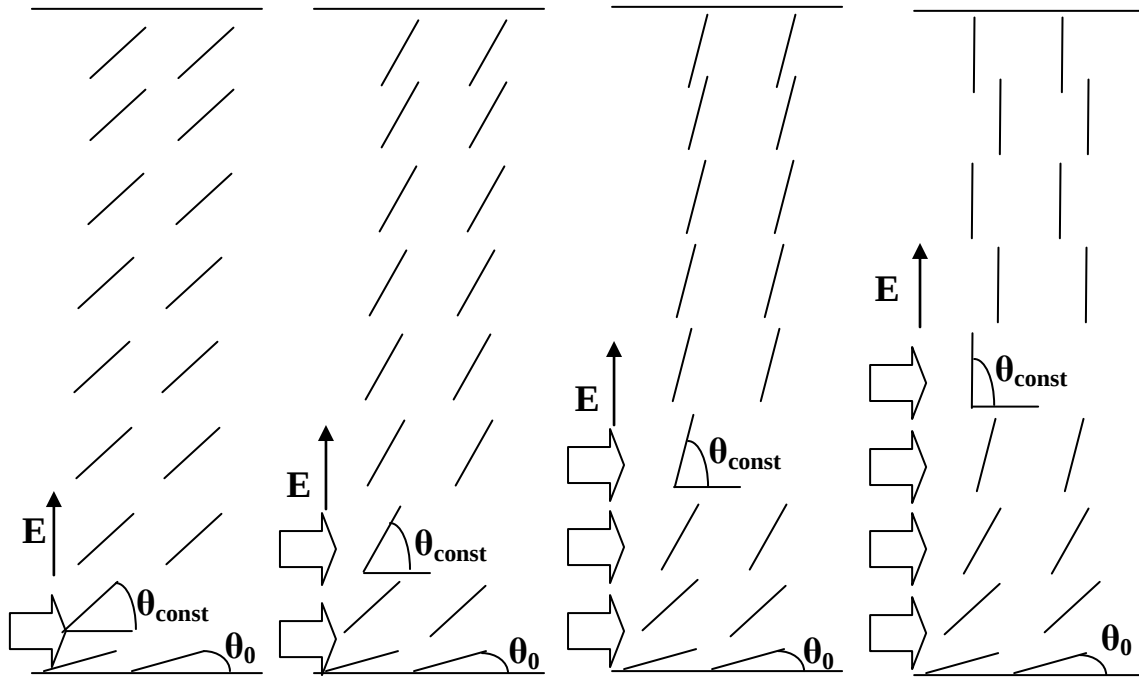
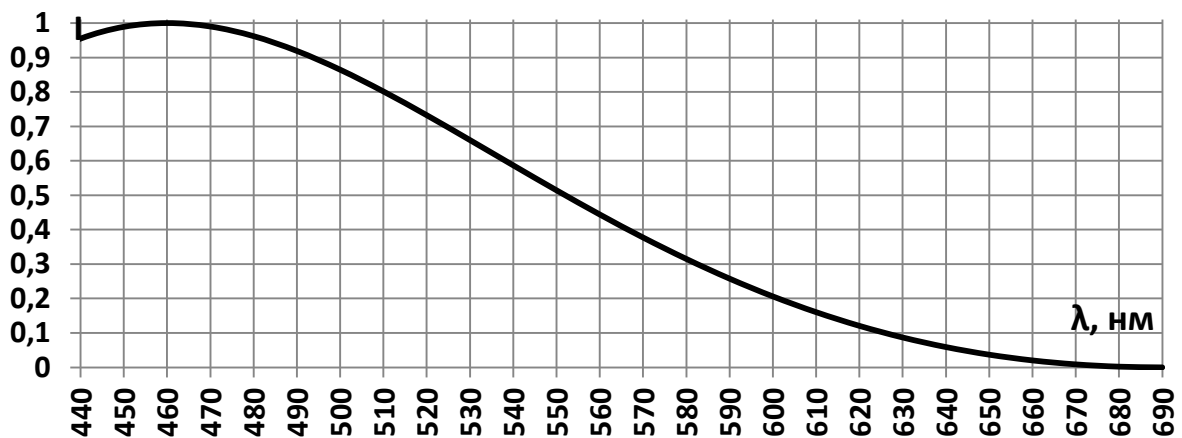


Рис.4.7.1. Разница между приповерхностным углом θ_0 и транслируемым до другой стороны ячейки углом θ_{const} возрастает с ростом толщины подвергающегося ориентирующему излучению слоя ЖК.

Кроме того, можно получать заранее заданное (в том числе такое, которое вообще невозможно получить с помощью электродов) распределение директора ЖК по толщине ячейки. Описаны выше оптические и диэлектрические свойства слоев ЖК с некоторыми нелинейными распределениями директора. Учитывая небольшую толщину просвечиваемого слоя, время переориентирования (особенно если учитывать емкостные эффекты в слоях покрытий и приповерхностных тонких слоях ЖК [155]) может быть значительно меньше, чем у ячеек с электродами. Таким образом, в быстро переключаемых оптических затворах, дифракционных, емкостных элементах могут использоваться светоориентируемые ячейки ЖК.

Избирательное пропускание узкого спектрального диапазона можно получить, регулируя фазовую задержку Φ в ячейке ЖК в скрещенных поляроидах (или в параллельных поляроидах). Например, успев переключиться три раза за время съемки (если речь идет о видеокамере) одного кадра или за время показа (если речь идет о дисплее/проекторе) кадра для одного из трех RGB цветов. Можно одновременно регулировать интенсивность (яркость). Также возможна обслуживающая сразу три фотоприемных элемента ЖК ячейка как трехполосный светофильтр RGB цветов.

На рис.4.7.2 показаны для ЖК ячейки в скрещенных поляроидах зависимости интенсивности пропускания от длины волны, показатели преломления нематического ЖК $n_o=1.5$, $n_e=1.65$, плоскость директора ЖК на 45° к поляризатору. Фазовая задержка выражена через эквивалент: фазовая задержка планарной ячейки ЖК с заданной толщиной и теми же параметрами. Это обусловлено тем, что удобнее ввести эквивалент – толщину планарного слоя ЖК, так как для разных длин волн фазовая задержка различна.



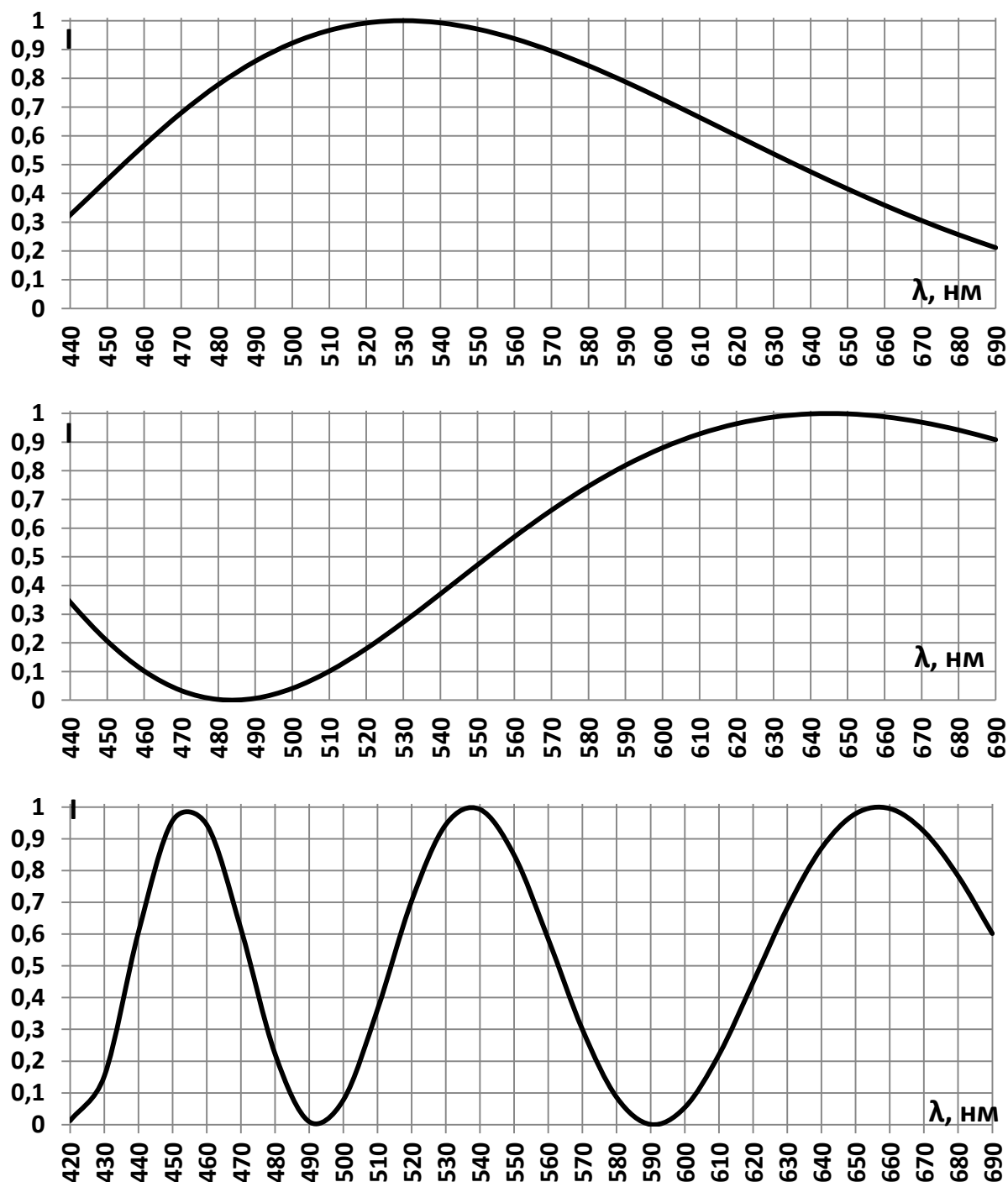
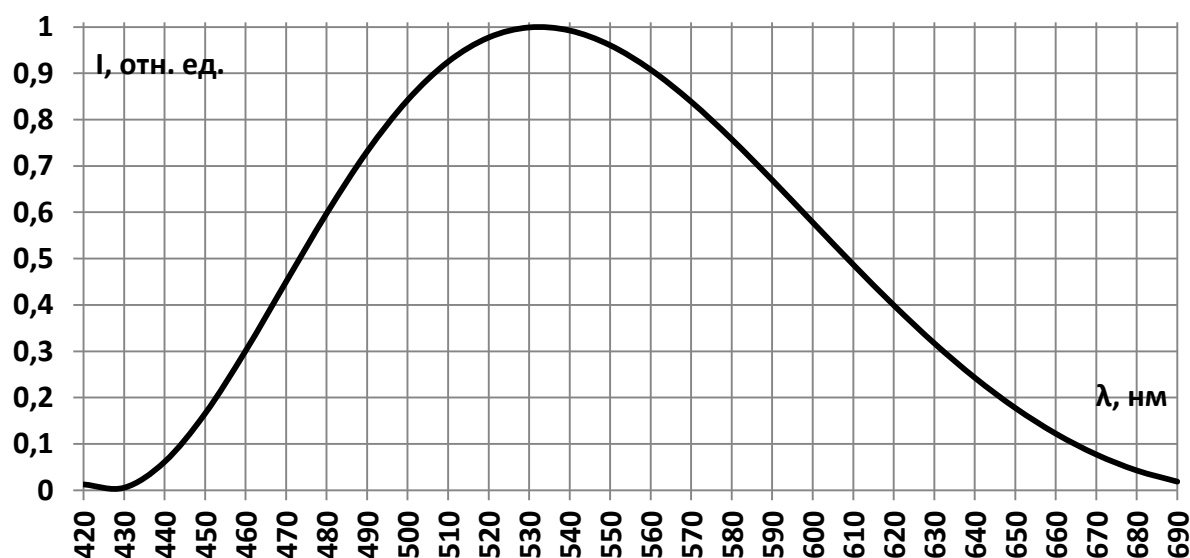
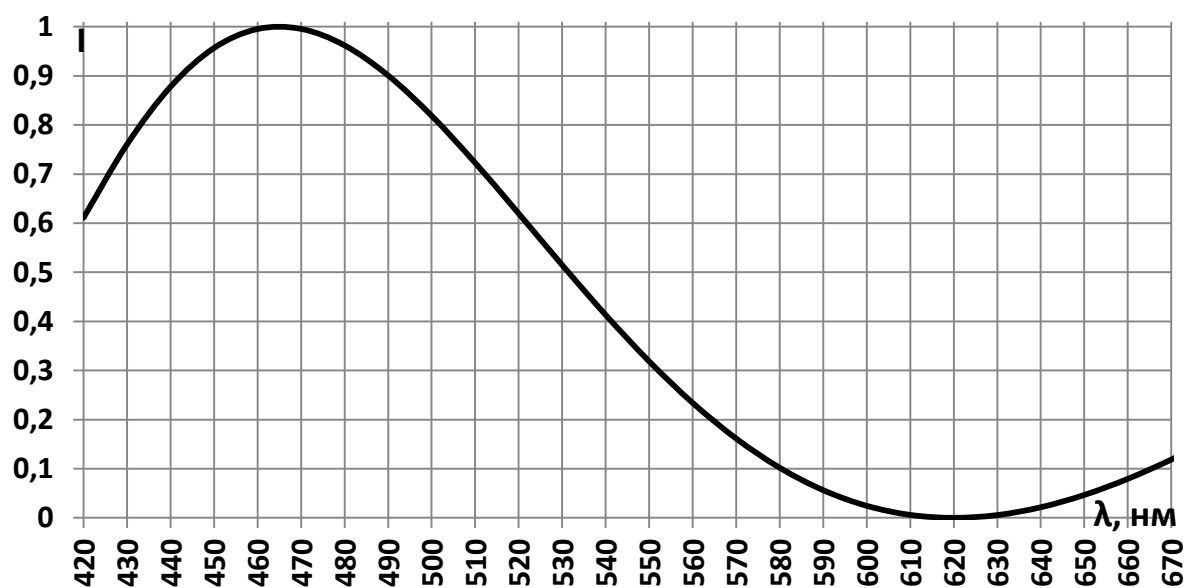


Рис.4.7.2. Для ЖК ячейки сверху вниз толщина планарной ячейки ЖК: 4,6 мкм; 5,3 мкм; 6,45 мкм; 19,7мкм. В скрещенных поляроидах зависимости интенсивности пропускания от длины волны

На рис.4.7.3 показаны для ЖК ячейки в параллельных поляроидах зависимости интенсивности пропускания от длины волны, показатели преломления нематического ЖК $n_o=1.5$, $n_e=1.65$, плоскость директора ЖК на 45° к поляризатору. Фазовая задержка выражена через эквивалент: фазовая задержка планарной ячейки ЖК с заданной толщиной и теми же параметрами.

Таким образом, может использоваться сразу как три элемента светоориентированная ЖК ячейка: светофильтр, регулятор интенсивности и компенсатор, и может работать сразу за три цветовых элемента за счет быстроты переключения.

Также могут использоваться светоориентированные ячейки как фокусирующие ЖК элементы с заданными характеристиками, в том числе фокусным расстоянием и его знаком (собирающая/рассеивающая линза).



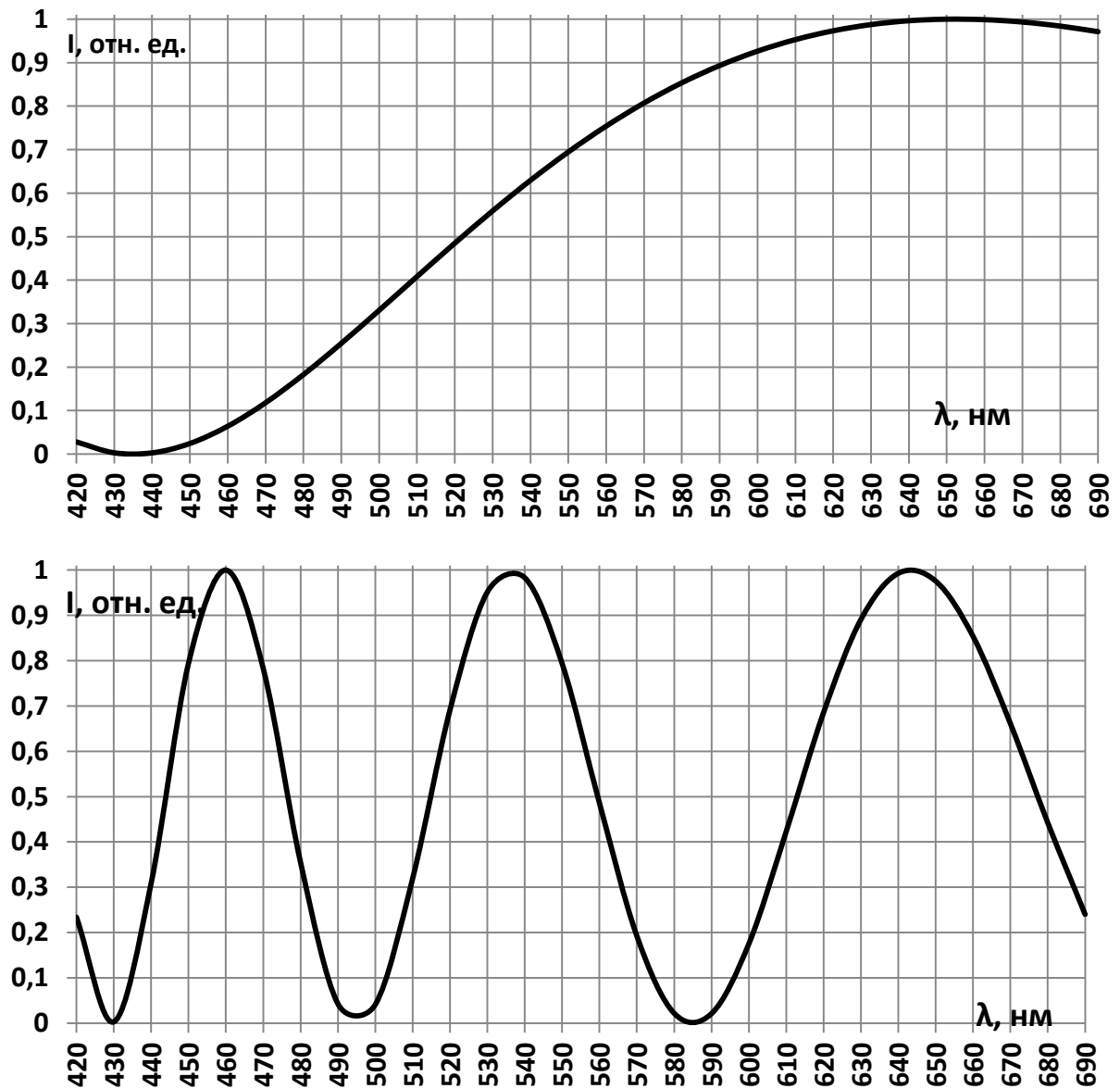


Рис.4.7.3. Для ЖК ячейки сверху вниз эквивалентная толщина планарной ячейки ЖК: 6,2 мкм; 7,1 мкм; 4,35 мкм; 21,45 мкм. Зависимости интенсивности пропускания от длины волны в скрещенных поляроидах

ЖК линзы с нелинейным распределением директора описаны в [146], с линейным описаны выше. На рис.4.7.4. показана система их ориентирующей подсветки. Изображенная внизу рисунка, матрица ЖК-композитных регуляторов отстоит от линзы на фокусное расстояние линзы. Фотоэлемент (заштрихован на рисунке) располагается в центре матрицы. Матрица пропускает для соответствующей ориентации нематического ЖК в линзе с примесью светоориентируемых частиц, на рисунке снизу вверх, лучи ориентирующего света (возможно, инфракрасного) с плоскостью поляризации

по радиусу. Сверху на линзу ЖК в верхней части рисунка падает фокусируемый свет и собирается на фотоприемнике внизу (заштрихован). ЖК линза, как на рис.4.7.1, имеет одну из сторон, покрытую ориентантом, но свет ориентирующий падает вертикально на рисунке. Нижняя поверхность линзы ЖК, показанной на рис.4.7.5, имеет постоянный угол наклона директора ЖК (на рисунке гомеотропная ориентация).

Градиентную по радиусу линзы ЖК ориентирующую подсветку позволяет задавать матрица ЖК-композитных регуляторов. К радиальному градиенту фазовой задержки, обусловленному пространственно неравномерной ориентацией директора в радиальном сечении линзы [146] приводит градиентная радиально интенсивность ориентирующей подсветки.

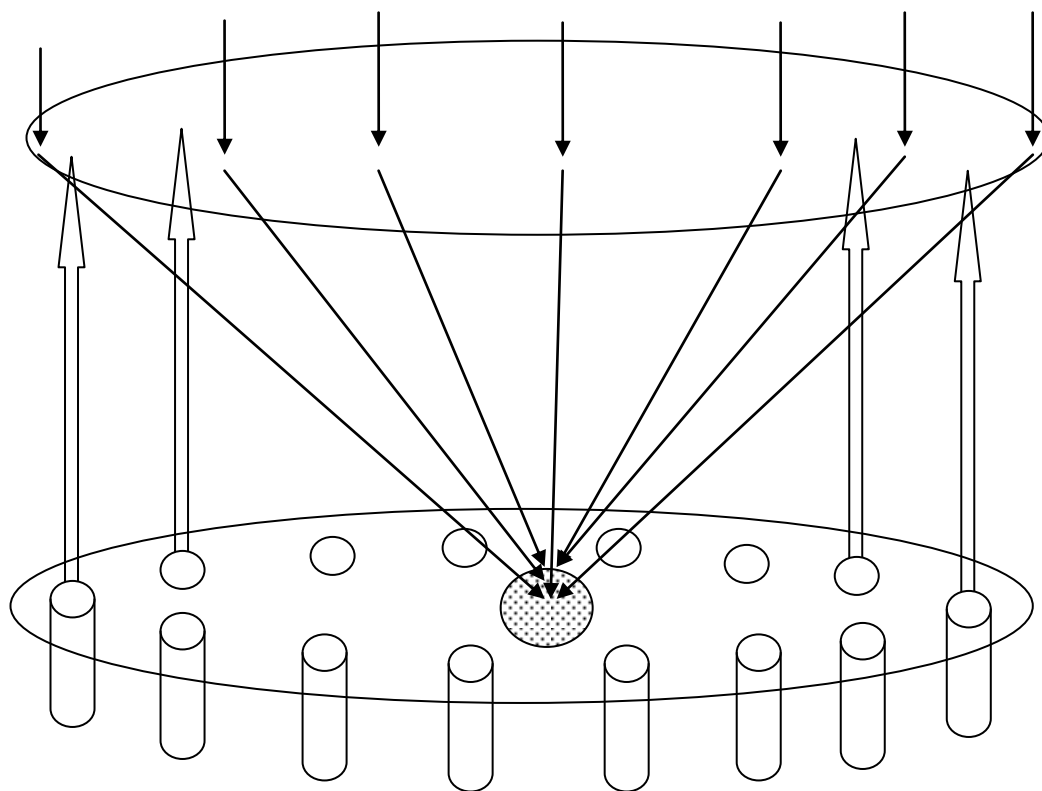


Рис.4.7.4. Светоориентируемая линза ЖК.

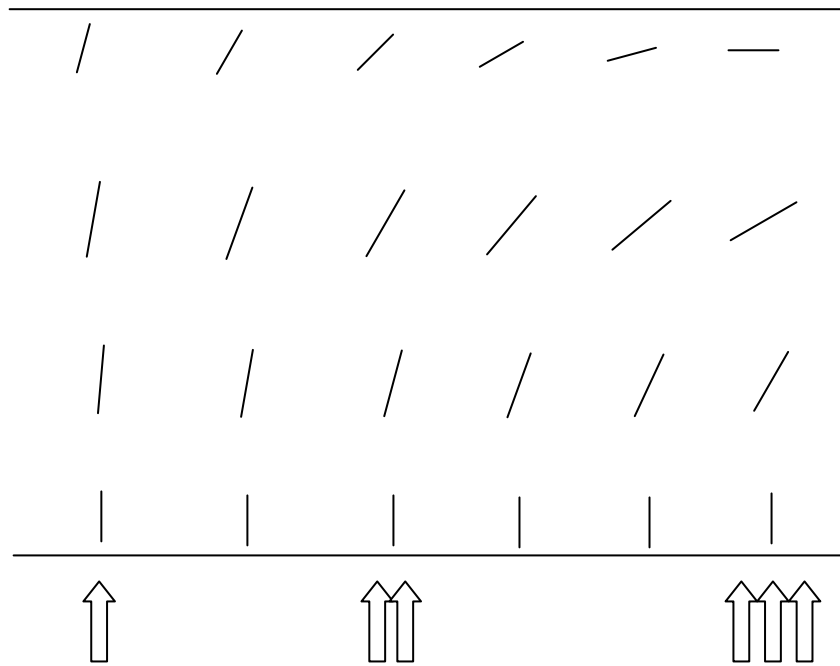


Рис.4.7.5. Радиальная плоскость светоориентируемой линзы ЖК.

Светоориентируемые нематические ЖК ячейки, одна сторона которых покрыта ориентантом, предложены впервые. В дисплеях показана их применимость как двойных (регулятор-компенсатор) и тройных (светофильтр-регулятор-компенсатор) элементов. В видеосистемах и дисплеях показана их применимость как трехцветных (RGB) оптических элементов. Показана их применимость в системах ЖК: фокусирующих, дифракционных и емкостных. Светоориентируемые линзы ЖК с регулируемым в широких пределах фокусным расстоянием предложены впервые.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Разработаны новые оптически анизотропные материалы с неоднородной структурой (ЖК-композиты), новые материалы (ориентанты) и новые конструктивные решения для приборов отображения и обработки информации, позволяющих улучшить характеристики и функциональные возможности оптических и электрооптических приборов.

В работе решена важная проблема: управляемое распределение световых потоков для приборов отображения и обработки информации, позволяющих улучшить характеристики и функциональные возможности оптических и электрооптических приборов.

Выводы

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.

Литература

1. Способ получения капсулированных в полимерной пленке жидкокристаллических композиций. Пат. №:2215770 Рос. Федерация: Шабатина Т.И., Морозов Ю.Н., Сергеев Г.Б.; патентообладатель: ХимФак МГУ; публикация: 10 Ноября 2003; действие патента с 16 Июля 2002.
2. Васильев, А.А. Пространственные модуляторы света / А.А.Васильев, Д.Касасент, И.П.Компанец, А.В.Парфенов. - М.: Радио и связь, 1987. - 320 с.
3. Каманина, Н.В. Влияние фуллеренов на динамические характеристики жидкокристаллических систем / Н.В.Каманина, Л.Н.Капорский // Письма в ЖТФ. – 2000. - Т.26. - №19. - С.30-38.
4. Жаркова, Г.М. Жидкокристаллические композиты / Г.М.Жаркова, А.С.Сонин. - Новосибирск: ВО "Наука", 1994. - 214 с.
5. Каманина, Н.В. Перспективы использования фуллеренов для ориентации жидкокристаллических композиций / Н.В.Каманина, Л.П.Ракчеева // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т.28. - №11. - С. 28-36.
6. Шурпо, Н.А. Влияние полупроводниковых квантовых точек CdSe/ZnS на динамические свойства нематической жидкокристаллической среды / Н.А.Шурпо, М.С.Вакштейн, Н.В.Каманина // Письма в ЖТФ. – 2010. - Т.36. - вып.7. - С.54-59.
7. Каманина, Н.В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации / Н.В.Каманина // Успехи физических наук. - 2005. - Т.175. - №4. - С.445-454.
8. Машин, А.И. Электрооптический эффект в пленках полимера, диспергированного нематическим жидким кристаллом: учебно-методическое пособие / А.И.Машин, А.В.Коробков. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. – 11 с.

9. Vasilchikova E.N. Mesogens orientation at cylindrical and spherical surfaces during transition from isotropic phase to nematic liquid crystal phase / E.N. Vasilchikova, N.N. Barabanova, D.L. Bogdanov, V.V. Belyaev, A.L. Bugrimov, A.K. Dadivanyan // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2017. – V.646. – I.1. – Pp.242-249. doi.org/10.1080/15421406.2017.1288027
10. Zhibing Ge. Switchable Transmissive and Reflective LCD for Mobile Displays / Ge Zhibing, Zhu Xinyu, X. Wu Thomas, Wu Shin-Tson, Li Wang-Yang, Wei Chung-Kuang. // *Journal of the SID*. - 2009. – V.17. – I.7. – P.561. DOI # 10.1889/JSID17.7.561
11. Frank, F.C. The influence of dislocations on crystal growth / F.C.Frank // *Disc. Far. Soc.* - 1958. – V.25. – P.19.
12. Минько, А.А. Физика жидких кристаллов /А. А. Минько. – Минск: БГУ, 2017. – 111с. ISBN 978-985-566-406-3
13. де Жен, П. Физика жидких кристаллов / П. де Жен. – М.: Мир, 1976. – 400с.
14. Chandrasekhar, S. *Liquid Crystals* - 2nd ed. / S. Chandrasekhar. – Cambridge: Cambridge University Press, 1992. - 417p.
15. Meyerhofer, D. Electrohydrodynamic instabilities in nematic liquid crystals in low-frequency fields / D. Meyerhofer, A. Sussman.// *Appl. Phys. Lett.* – 1972. - V.20. - P.357.
16. Чигринов, В.Г. Дипломная работа / В.Г.Чигринов. - МИЭМ, 1973.
17. Басов, Н.Г. Фазовая модуляция когерентного света с помощью жидких кристаллов / Н.Г.Басов, П.Д.Березин, Л.М.Блинов, И.Н. Компанец, В.Н. Морозов, В.В. Никитин // *Письма в ЖЭТФ*. – 1972. – Т.15. – С.200.
18. Беляев, В.В. Временные характеристики ориентационных электрооптических эффектов в НЖК / В.В.Беляев, В.Г.Чигринов // *Кристаллография*. – 1978. – Т.23. – С.805-810.
19. Schiekkel, M.F. Deformation of nematic liquid crystals with vertical orientation in electrical fields / M.F.Schiekel, K.Fahrenschon // *Appl. Phys. Lett.* – 1971. – V.19. – P.391.

20. Soref, R.A. Electrically controlled birefringence of thin nematic films/ R.A. Soref, M.J. Refuse // J. Appl. Phys. – 1972. – V.43. –P.2029.
21. Barnik, M. I. New type of boundary conditions for orientation deformations in homeotropic layers of nematic liquid crystals / M. I. Barnik, L. M. Blinov, T. V. Korkishko, V. A. Umanskii, V. G. Chigrinov// Письма в ЖЭТФ. – 1983. – Т.85. – С.175-185
22. Пикин, С.А. Макроскопическая теория устойчивости структуры жидких кристаллов: дисс. докт. физ.-мат. наук. 01.04.07. / С.А. Пикин. – Москва: Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова АН СССР, 1977. - 308с
23. Чигринов, В.Г. Исследование неустойчивостей в нематических жидких кристаллах: дисс. канд. физ.-мат. наук. 01.04.07. / В.Г. Чигринов. - Москва: Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова АН СССР, 1977. - 197с.
24. Jakeman, E. Electro - optic response times in liquid crystals / E.Jakeman, E.P.Raynes // Phys. Lett. – 1972. – V.39A. - P.69.
25. Чигринов, В.Г. Определение констант упругости K_{jj} и K_{d3} и коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов из ориентационных электрооптических эффектов. / В.Г. Чигринов, М.Ф. Гребенкин // Кристаллография. -1975. – Т.20. – С.1240.
26. Чигринов, В.Г. Временные характеристики ориентационных электрооптических эффектов в нематических жидких кристаллах / В.Г.Чигринов, В.В.Беляев // Кристаллография. – 1977. – Т.22. – С.603.
27. Leslie, F.M. Some constitutive equations for anisotropic fluids/ F.M. Leslie // Quart. J. Mech. Appl. Math. - 1966. – V.19. – P.357.
28. Brochard, F. Dynamics of the Orientation of a Nematic-Liquid-Crystal Film in a Variable Magnetic Field/ F. Brochard, P. Pieranski, E. Guyon // Phys. Rev. Lett. – 1972. – V.29. - P.320. DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.29.320.5>

29. Skhiekel, M.F. Transient times and multiplex behavior of nematic liquid crystals in the electric field / M.F. Skhiekel, F. Fahrenschoen, H. Gruler // *Appl. Phys.* – 1975. – V.7. – P.99. DOI: 10.1007/BF00884218
30. Блинов, Л.М. Электро- и магнитооптические свойства жидких кристаллов / Л.М. Блинов. – М.: Наука, 1977. – 384с.
31. Репьева, А. V-й съезд русских физиков / А. Репьева, В. Фредерикс. – М.:ГИЗ, 1926. – с.16.
32. Чандрасекар, С. Жидкие кристаллы / С. Чандрасекар. – М.: Мир, 1980. – 344с.
33. Чигринов В.Г. Ориентационные эффекты в нематических жидких кристаллах в электрических и магнитных полях / В.Г. Чигринов // *Кристаллография.* — 1982. — Т. 27. - вып.2. — С. 404-430.
34. Stephen, M. J. Physics of liquid crystals / M.J. Stephen, J.P. Straley // *Rev. Mod. Phys.* – 1974. – V.46. – P.617.
35. Van Dijk, J. W. Mean-field model for antiferroelectric smectic-A liquid / J.W. Van Dijk, W.W. Beens, W.H. de Jeu // *J. Chem. Phys.* – 1983. – V.79. – P.3888.
36. Schadt, M. Voltage-dependent optical activity of twisted NLC / M. Schadt, W. Helfrich // *Appl. Phys. Lett.* - 1971. - V.18. - P.27.
37. Коншина, Е.А. Влияние добавления полупроводниковых квантовых точек CdSe/ZnS в нематический жидкий кристалл на оптические и электрические характеристики ячеек / Е.А. Коншина, Е.О. Гавриш, А.О. Орлова, М.В. Артемьев // *Письма в ЖТФ.* – 2011. – Т.37. - Вып.21. - С.47-54.
38. Hanaoka, K. A New MVA-LCD by Polymer Sustained Alignment Technology / K. Hanaoka, Y. Nakanishi, Y. Inoue, S. Tanuma, Y. Koike, Fujitsu Ltd. // *SID'04 Digest.* – 2004. – V.40. - Pp.1200-1203.
39. Bos, P. J. Passive Optical Phase Retarders for Liquid Crystal Displays / P.J. Bos // *14th IDRC Proc.* – 1994. - P.118.
40. Mi, X.-D. Effects of pretilt angle on electro-optical properties of Pi-cell LCDs / X.-D. Mi, M. Xu, D.-K. Yang, P.J. Bos // *SID'99 Digest.* -1999. - Pp.24-27.

41. Yang, D. K. Fundamentals of Liquid Crystal Devices - 2nd ed. / D. K. Yang, S. T. Wu. – NY.:Wiley, 2014. - 591 p.
42. Pochi, Yeh Optics of Liquid Crystal Displays / Yeh Pochi, Gu Claire. – NY.:Wiley - Series in Pure and Applied Optics. - 2009. - 792 p. ISBN 978-0-470-18176-8
43. De Bougrenet, J. L. Engineering liquid crystals for optimal uses in optical communication systems / J.L. De Bougrenet, De La Tonnaye // Liq. Cryst. – 2004. – V.31. – Pp.241-269.
44. Crossland W.A. Liquid Crystals in Telecommunication systems / W.A. Crossland, T.V. Clapp, T.D. Wilkinson, I.G. Manolis, A.G. Georgiou, B. Robertson // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2004. – V.413. – Pp.363-383.
45. Jones, J.C. The Zenithal Bistable Display: From concept to consumer / J.C. Jones // J. of SID. – 2008. – V.16. – I.1. – P.143.
46. Angele, J./ A4 BiNem Display with 3.8 Mega-pixels / J. Angele, M. Elyaakoibi, F. Guignard, S. Jacquier, S. Joly, P. Martinot-Lagarde, S. Osterman, J. Laffitte, F. Leblanc // IDW'07 Digest. – 2007. - P.265.
47. Takeda, A. A super-high-image- quality multi-domain vertical alignment LCD by new rubbing- less technology / A. Takeda et al. // Journal of the SID. – 1998. - Pp. 1077-1080.
48. Hung-Yu Wu Real Multi-Domain Reduced Color and Gamma Shift in Fringe-Field-Switching (FFS) Mode LCD with Photoalignment Method / Wu Hung-Yu, Fu Hsin-Min, Lian Jan-Tian // SID 2012 DIGEST. – 2012. – Pp.293-296.
49. Seog Gwag, Jin. Advanced Patterned Vertical Aligned Nematic Mode with Improved High Transmittance / Jin Seog Gwag, Seung Hun Yu, Jin Hyuk Kwon // SID 2012 DIGEST. – 2012. – Pp.1444-1447.
50. Lee, Chung Yung. Variable Liquid Crystal Pretilt Angle using Nano-Alignment Surfaces / Chung Yung Lee, Man Chun Tseng, Jacob Yeuk Lung Ho, Hoi Sing Kwok // SID 2012 DIGEST. – 2012. - P.289-292.

51. Wan, J. T. K. Liquid Crystal Pretilt Control by Inhomogeneous Surfaces / T. K. Wan, O. K. C. Tsui, H. S. Kwok, P. Sheng // *Phys. Rev. E.* – 2005. – V.72. – P.021711.
52. Opara, T. Interferential method for determining the inclination angle of molecules in plane parallel liquid crystalline layers / T.Opara, J.W.Baran, J.Zmija // *Cryst. Res. Technol.* – 1988. – V.22. – P.1073.
53. Han, K.Y. Accurate Measurement of the Pretilt Angle in a Liquid Crystal Cell by an Improved Crystal Rotation Method / K.Y.Han, T. Miyashita, T. Uchida // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 1994. – V.241. – Pp.147-157.
54. Muravsky, A. A Study Of Aligning Properties Of Organosilicon Compounds / A. Muravsky, V. Mazaeva, V. Belyaev, A. Minko // 12th International Symposium Advanced Display Technologies. - Korolev, Russia, Late-News Papers. - 25-28 August 2003. - P.11-13.
55. Muravsky A.A., Parameters of LC Alignment on Films of Organosilicon Compounds / A.A. Muravsky, A.A. Murausky, V.G. Mazaeva, V.V. Belyaev // *Journal of The SID.* – 2005. - V.13. – P.349.
56. Beresnev, G.A. New method to determine K_{33}/K_{11} ratio in nematic liquid crystals / G.A. Beresnev, V.G. Chigrinov, M.F. Grebenkin // *Crystallography Reports.* – 1982. – V.27. – Pp.1019-1021.
57. Беляев, В.В. Температурная зависимость вращательной вязкости нематических ЖК / В.В. Беляев, С.А.Иванов, М.Ф.Гребенкин // *Кристаллография.* – 1985. - Т.30. - С.1160-1171.
58. Беляев, В.В. Вязкость нематических жидких кристаллов / В.В. Беляев. – М.: Физматлит, 2001. - 221 с.
59. Агапов, О.А. Полиимидные ориентанты для ЖКИ / О.А. Агапов // *Электронная промышленность.* - 1995. – Т.8. – С.25-26.
60. Севостьянов, В.П. Применение полиимидных пленок в качестве ориентантов жидких кристаллов / В.П. Севостьянов, С.И. Копоть, Л.А. Солодовникова // *Электронная техника.* – 1981. - Сер.6. - Вып. 6. – С.23-27.

61. Коряев, Е.Н. Полиимидные ориентанты для жидкокристаллических индикаторов / Е.Н. Коряев, С.П. Курчаткин, В.П. Севостьянов // Деп. в ВИНТИ. – 1997. – Т.3346. – В.9720. – С.334.
62. Belyaev, V.V. Green technologies of LC alignment on the base of organosilicon compounds / V.V. Belyaev, V.G. Mazaeva // SID'11 Digest. – 2011. – Pp.1412-1415.
63. Коньяр, Жак Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей / Жак Коньяр. - Минск: Университетское, 1986. – 101 с.
64. Блинов Л.М. Определение анизотропной части поверхностного термодинамического потенциала нематического жидкого кристалла / Л.М. Блинов, Д.З. Раджабов, Д.Б. Субачюс, С.В. Яблонский // Письма в ЖЭТФ. - 1991. - Т. 53. - С.223-227.
65. Беляев, В.В. Влияние величины и конфигурации алкильных заместителей на вязко-упругие свойства 4-алкил-4'-алкокситоланов / В.В. Беляев, С.А. Иванов // Кристаллография. – 1992. - Т.37. - В.1. - С.227-245.
66. Беляев, В.В. Зависимость показателей преломления 4-алкил-4'-алкокситоланов от их молекулярного строения / В.В. Беляев, А.Б. Кузнецов // Оптический журнал. – 1993. - В.7. - С.25-29.
67. Ган, М.А. Восстановление топографии волнового фронта по интерферограмме с помощью метода цифровой голографии. / М.А. Ган, Я.М. Ган, А.С. Чертков // Оптический журнал. – 2006. - Т.73. - №7.
68. Каманина, Н.В. Изучение влияния наноструктур на фоторефрактивные, фотопроводниковые и динамические свойства органических материалов, включая жидкие кристаллы / Н.В. Каманина // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2011. - Вып.1. - №35. - С.5-16.
69. Zheng G. Flexoelectric Effect in a HAN-IPS Cell / G. Zheng, Z. Zhang // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2010. - V.528. – P.103.

70. Baek J.-I. Viewing Angle Control of a Hybrid-Aligned Liquid Crystal Display / J.-I. Baek, K.-H. Kim, J.C. Kim, T.-H. Yoon // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2009. - V.498. – P.103.

71. Jeong, E. Viewing-angle controllable liquid crystal display using a fringe- and vertical-field driven hybrid aligned nematic liquid crystal / E. Jeong, Y.J. Lim, M.H. Chin, J.H. Kim, S.H. Lee, S.H. Ji, G.-D. Lee, K.H. Park, H.C. Choi, B.C. Ahn. // *Applied Physics Letters*. – 2008. – V.92. – P.261102.

72. Ryu J.W. A Fringe-Field Driven Hybrid Aligned Nematic Liquid Crystal Display for Narrow Viewing Angle Display / J.W. Ryu, Y.J. Lim, Y.H. Jeong, K. Kim, G.-D Lee, S.H. Lee // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2007. - V.46. - P.5951.

73. Kim W.C. Electrooptic Characteristics of a Fringe-Field Driven Hybrid Aligned Nematic Liquid Crystal Cell using a Liquid Crystal with Positive Dielectric Anisotropy / W.C. Kim, Y.H. Jeong, S.H. Lee // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2004. - V.43. - P.637.

74. Бакеев, Н.Ф. Изготовление полимерных подложек с периодическим микрорельефом и исследование их оптических свойств / Н.Ф. Бакеев, В.В. Беляев, А.Л. Волынский, С.А. Иванов, В.А. Коновалов, А.А. Муравский, А.А. Минько, Л.В. Чистовская, С.Е. Яковенко // *Оптический журнал*. – 2001. - Т.68. - №9. – С.8995-9001.

75. Симоненко Г.В. Выбор оптимальной конструкции оптического затвора на π -ячейке / Г.В. Симоненко, С.А. Студенцов, В.А. Ежов. // *Оптический журнал*. - 2013. - Т.80. - №9. - С.17-22.

76. Каманина Н.В. Влияние пути переноса заряда при межмолекулярном комплексообразовании на нелинейно-оптические и фотопроводниковые характеристики нанокомпозитов / Н.В. Каманина // *Письма в ЖТФ*. – 2012. - Т.38. - Вып.3. - С.25-32.

77. Kamanina, N.V. Influence of Nanostructuration Process on the Properties of Materials / N.V. Kamanina, N.N. Rozhkova, L.A. Chernozatonskii,

N.M. Shmidt, R. Ferritto, F. Kajzar // Nonlinear Optics and Quantum Optics. - 2012. - V.45. - P.153–160.

78. Wang S.-Y. Simple and direct measurements of pretilt angles in hybrid-aligned nematic liquid-crystal cells / S.-Y. Wang, H.-M. Wu, K.H. Yang // Applied Optics. – 2013. – V.52. - Pp.5106-5111.

79. Hitzenberger, Ch. Measurement and imaging of birefringence and optic axis orientation by phase resolved polarization sensitive optical coherence tomography / Ch. Hitzenberger, E. Goetzinger, M. Sticker, M. Pircher, A. Fercher // Optics Express. – 2001. - V.9. - Pp.780-790.

80. Гребенкин, М.Ф. Жидкокристаллические материалы / М.Ф. Гребенкин А.В. Иващенко. - М.: Химия, 1989. - 288 с.

81. Urban, S. Static dielectric properties of nematics, In: Physical Properties of Liquid Crystals: Nematics. / S. Urban, G. R. Luckhurst, David A. Dunmur, Atsuo Fukuda. - Institution of Electrical Engineers. – 2001. – Pp.267-277.

82. Dunmur, D. Dielectric Properties, In: Handbook of Liquid Crystals, Low Molecular Weight Liquid Crystals II, Eds. / D. Dunmur, K. Toriyama, George W. Gray, Volkmar Vill, Hans W. Spiess. - Wiley-VCH, 1998. – Pp. 91-112.

83. Maier, W. Eine einfache Theorie der dielektrischen Eigenschaften homogen orientierter kristallinglüssiger Phasen des nematischen Typs / W. Maier, G. Meier // Z. Naturforsch. – 1961. – V.16a. – P.262.

84. Maier, W. Hauptdielektrizitätskonstanten der kristallinglüssiger Phasen des nematischen Typs / W. Maier, G. Meier // Z. Naturforsch. - 1961. – V.16a. - P.470.

85. Безбородов, В.С. Синтез новых карбо- и гетероциклических соединений и создание эффективных жидкокристаллических материалов на их основе: дисс. докт. хим. наук, 02.00.03 / В.С. Безбородов. – Минск: Белорусский гос. университет, 1999. - 84с.

86. Адоменас, П. Жидкокристаллический материал с положительной диэлектрической анизотропией для оптоэлектронных устройств / П.Адоменас, В.В. Беляев, С.А.Иванов, А.Б.Кузнецов, Н.Ф.Ковтонюк, В.Шешкаускас,

В.С.Безбородов, Р.Пашконене // Положит реш. по заявке на Авторское свидетельство СССР № 4821614/04 от 30.07.91, приор.03.05.90.

87. Bezborodov, V. New Concept for the Design, Synthesis, and Application of Nanostructured Anisotropic Materials and Conductive and Alignment Coatings for High-Efficient Displays and Photonic Devices / V. Bezborodov, S. Mikhalyonok, I. Zharski, O. Dormeshkin, A. Smirnov and A. Stsiapanau // 33rd International Display Research Conference EuroDisplay 2013, London, UK. 16-19 September 2013. Conference Proceedings. – P.81-84.

88. Безбородов, В.С. 2-(4-карбокси-3-галогенфенил)-5-алкил-1,3,2-диоксаборинаны в качестве полупродуктов синтеза жидкокристаллических производных галогенфенил-5-алкил-1,3,2-диоксаборинанов / В.С.Безбородов, О.А.Гринкевич, М.Ф.Гребенкин // Авторское свидетельство СССР №4162761/04 (Патент SU 1766922). Приоритет 17.12.86. Опубл. 07.10.92. Бюл. изобр. № 37 (1992).

89. Dąbrowski, R. Developing syntheses of new liquid crystals / R.Dąbrowski, V.Bezborodov // Liq. Cryst. – 2006. – V.33. – P.1487-1489.

90. Lim, M.J. Physical Properties of Liquid Crystal Single Compounds with 1,3,2-Dioxaborinane Group for LCD Applications, Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. / M.J. Lim, S.H. Kim, Y.J. Lee, D.J. Jeong, K.H. Uh, E.S. Lee, Y.S. Choi // Molecular Crystals and Liquid Crystals. - 2000. - V.352. – P.319-326.

91. Щуньянь, Чжуан Рассеяние волн поверхностями с периодической структурой / Чжуан Щуньянь, Гун Жэньбао // ТИИЭР. – 1981. - Т.69. - С.43-56.

92. Belyaev, V. Modeling Optical Properties of Birefringent Substrates with Periodical Surface Microrelief for Application in Display Devices/ V. Belyaev, V. Tsoy, A. Tarasishin // Conf. Proc. of The 22nd Int. Display Research Conf. – Nice, France. – 2002. – P.413-416.

93. Цой В.И. Граничные матрицы передачи для световых волн в слоистой системе анизотропных диэлектрических решеток / В.И. Цой // Оптический журнал. - 1999. - Т.66. - №6. - С.100-102.

94. Аззам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет. / Р. Аззам, Н. Башара – М.: Наука, 1981. – 583 с.
95. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх - М.: Мир, 1987. – 616 с.
96. Tsoy, V.I. Simulation of light propagation through birefringent substrates with periodical / V.I. Tsoy, V.V. Belyaev, A.V. Tarasishin, D.T. Litovchenko, V.P. Misnik // Optics Communications. – 2005. – V.246. – Pp.57–66.
97. Tsoy, V.I. Modelling the diffraction of light by structures with spatial periodicity of the optical parameters of the substance and of the surface relief / V.I. Tsoy, V.V. Belyaev, A.V. Tarasishin, S.M. Trofimov // J. Optical Technology. – 2003. – V.70. – Pp.465-470.
98. Belyaev, V.V. Polarized light diffraction on anisotropic substrates with rectangular and sine microrelief / V.V. Belyaev, V.I. Tsoy, E.M. Kushnir, A.V. Klyckov, A.Y. Kalashnikov // Journal of the SID. - 2005. – V.13. – Pp.305-308.
99. Belyaev, V.V. Diffraction on birefringent elements with sine surface microrelief / V.V. Belyaev, V.M. Novikovich, P.L. Denisenko// Journal of the SID. – 2008. – V.16. - Pp.961-967.
100. Belyaev, V.V. Physical properties of stretched polymeric substrates with periodic microrelief for optical diffraction elements and liquid crystals alignment / V.V. Belyaev, L. Chistovskaya, V. Konovalov, A. Muravsky, A. Tarasishin, S. Trofimov, V. Tsoy, A. Volynsky, S. Yakovenko// Journal of the SID. – 2003. – V.11. – Pp.3-13.
101. Gray G.W. Physical Properties of Liquid Crystals / G.W. Gray, V. Vill, H.W. Spiess, D. Demus, J.W. Goodby. - New-York: Wiley-VCH, 2009. - 522 p.
102. Dunmur D. A. Physical Properties of Liquid Crystals: vol.1 Nematics / D. A. Dunmur, A. Fukuda, G. R. Luckhurst. - EMIS Data Review Series, 2001. – 693p.
103. Беляев, В.В. Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов / В.В. Беляев // УФН. – 2001. – Т.171. - С.267–298.

104. Муравский, Ан.А. Установка для одновременного измерения азимутальной и полярной энергии сцепления жидкого кристалла в одной ячейке в автоматическом режиме / Ан.А. Муравский, Ал.А. Муравский, В.Е. Агабеков // Вестник МГОУ. Сер. Физика и математика. – 2013. - №1. - С.51-56.
105. Yablonski, S. Dynamics of flexoelectric surface oscillations in a nematic liquid crystal / S. Yablonski, M. Rajteri, C. Oldano, G. Durand // Proc. SPIE. – 1995. – V.2731. – P.87.
106. Vorflusev, V.P. Azimuthal surface gliding of a nematic liquid crystal / V. P. Vorflusev, H.-S. Kitzerow, V.G. Chigrinov // Appl. Phys. Lett. – 1997. – V.70. – P.3359.
107. Chen, S.-H. Implementation and assessment of a tilt-angle-measurement system for liquid-crystal cells / S.-H. Chen, C.-L. Kuo, J.G. Wie, C.-W. Hao// Proc. SPIE. – 1992. – V.1815, Display Technologies. – P.194.
108. Yokoyama, H. A novel method for determining the anchoring energy function at a nematic liquid-crystal wall interface from director distortion at high fields / H. Yokoyama, H.A. van Sprang // J. Appl. Phys. – 1985. – V.57. – Pp.4520-4526.
109. Muravski, A. Determination of the polar anchoring energy by electrical measurement / A. Muravski, V. Chigrinov, A. Muravsky, Fion S.-Y. Yeung, J. Ho, H-S. Kwok // Phys. Rev. – 2005. – V.E71. – P.061707.
110. Nastishin, Yu.A. Nematic polar anchoring strength measured by electric field techniques / Yu.A. Nastishin, R.D. Polak, S.V. Shiyankovskii, V.H. Bodnar, O.D. Lavrentovich, // J. Appl. Phys. – 1999. – V.86. – No.8. – Pp.4199-4213.
111. Murauski, A. New method for measuring polar anchoring energy of nematic liquid crystals / A. Murauski, V. Chigrinov, H-S. Kwok // Liq. Cryst. – 2009. – V.36. - No.8. - Pp.779-786.
112. Toko, Y. Evaluation of Pretilt Angle and Polar Anchoring Strength of Amorphous Alignment Liquid Crystal Display from Capacitance Versus Applied Voltage Measurement / Y. Toko, T. Akahane // Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol. – 2001. – V.368. - Pp.469-481.

113. Zhou, Y. Generalized Relation Theory of Torque Balance Method for Azimuthal Anchoring Measurements / Y.Zhou, Z.He, S. Sato // Jpn. J. Appl. Phys. – 1999. – V.38. – Pp.4857.
114. Konovalov, V.A. An Accurate Spectral Method for Measuring Twist Angle of Twisted Cells with Rubbed and Grooved Surfaces / V.A. Konovalov, A.A. Muravski, S.Ye.Yakovenko, J. Pelzl, // SID Symp. Dig. Tech. Pap. – 2000. – V.31. – No.1. – Pp.620-623.
115. Беляев, В.В. Кремнийорганические пленки с молекулярным микрорельефом для ориентации жидких кристаллов / В.В. Беляев, В.Г. Мазаева, А.А. Минько, С.Н. Тимофеев // Вестник МГОУ. Сер. Физика и математика. – 2010. – В.1. – С.52-57.
116. Belyaev, V.V. Using substrates with various surface microreliefs in optoelectronics and information-display devices / V.V. Belyaev // J. Optical Technology. – 2005. – V.72. – Pp.719-724.
117. Belyaev, V.V. / V.V. Belyaev, A.Y. Merkulov, A.A. Belyaev // In: Proc. International Conference 2011. China display/Asia display, Kunshan, China, 6–9 November 2011.
118. Rokushima, K. Analysis of anisotropic dielectric gratings / K. Rokushima, J. Yamakita // J. Opt. Soc. Am. - 1983. – V.73. – P.901-908.
119. Rokushima, K. Analysis of diffraction in periodic liquid crystals: the optics of the chiral smectic C phase / K. Rokushima, J. Yamakita // J. Opt. Soc. Am. A. - 1987. - V.4. - P.27-33.
120. Бакеев, Н.Ф. Изготовление полимерных подложек с периодическим микрорельефом и исследование их оптических свойств / Н.Ф. Бакеев, В.В. Беляев, А.Л. Волинский, С.А. Иванов, В.А. Коновалов, А.А. Муравский, А.А. Минько, Л.В. Чистовская, С.Е. Яковенко // Оптический журнал. – 2001. - Т.68. - №9. - С.89-95.
121. Bryan-Brown, G.P. Optimisation of the Zenithal Bistable Nematic Liquid Crystal Device (ZBD™) / G.P. Bryan-Brown, E.L. Wood, J.C. Jones // Proc.Asia Display'98. - Seoul, Korea. - 1998. - P.1051-1054.

122. Jones, J. C. Zenithal Bistable Displays / J.C. Jones, P. Brent, G.P. Bryan-Brown, A. Graham, E.L. Wood. // Conf. Proc. Electronic Information Displays'00. - London, UK. - 2000, November 23. – 5 pp.
123. Tanase, H. A New Design of Coupled Prismatic Polarizer Light Pipe by Altering the Prism Apex Angle - A Theoretical Treatment / H. Tanase, J. Mamiya, M. Suzuki, H. Nakatani, T. Hatazawa, T. Watanabe // Conf. Records of The 1997 IDRC. - Toronto, Canada. – 1997. - P.61-64.
124. Сойфер В.А. Методы компьютерной оптики. / В.А.Сойфер. - М.: Физматлит, 2000. – 688 стр.
125. Yee, K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media / K.S. Yee // IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 1966. - V.14. - P.302-307.
126. Taflove, A. Numerical Solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations/ A. Taflove, M.E. Brodwin // IEEE Trans. – 1975. - Vol. mtt-23. - № 8. – P.623.
127. Желтиков, А.М. Локализация и каналирование света / А.М. Желтиков, С.А. Магницкий, А.В. Тарасишин// Письма ЖЭТФ. – 1999. - Т.70. - №5. – С.323.
128. Тарасишин, А.В. Синхронная генерация второй гармоники сверхкоротких лазерных импульсов в фотонных кристаллах / А.В. Тарасишин, А.М. Желтиков, С.А. Магницкий // Письма ЖЭТФ. – 1999. - Т.70. - №12. – С.819.
129. Koroteev, N.I. Compression of ultrashort light pulses in photonic crystals: when envelopes cease to be slow / N.I. Koroteev, S.A.Magnitskii, A.V. Tarasishin, A.M. Zheltikov // Opt. Commun. – 1999. - Vol.159. - P.191.
130. Prather, D.W. Formulation and application of the finite-difference time-domain method for the analysis of axially symmetric diffractive optical elements / W.D. Prather, S. Shi // J. Opt. Soc. Am. A. – 1999. - Vol.16. - No.5. – P.1131-1142.
131. Mirotznik, M. S. Three-Dimensional Analysis of Subwavelength Diffractive Optical Elements with the Finite-Difference Time-Domain Method / M.S.

Mirotznik, D.W. Prather, J.N. Mait, W.A. Beck, S. Shi, X. Gao // *Applied Optics-IP*. – 2000. – Vol.39. – No.17. – P.2871-2880.

132. Беляев, В.В. Динамика электрооптического отклика в твист-ячейке с двухчастотной адресацией / В.В. Беляев, М.Ф. Гребенкин, А.Я. Калашников // 12-й Международный Симпозиум Дисплейных Технологий. Королев. – 2003. – 120 с.

133. van Doorn, C.Z. Dynamic behavior of twisted nematic liquid crystal layers in switched fields / C.Z. van Doorn // *J. Appl. Phys.* – 1975. – V.46. – Pp.3738-3745.

134. Яблонский, С.В. Точный метод определения угла преднаклона в тонких плёнках нематических жидких кристаллов / С.В. Яблонский, А.С. Михайлов, С.П. Палто, С.Г. Юдин, С.В. Яковлев, Г. Дюран // *Письма в ЖЭТФ*. – 1998. – Т.67. – С.387.

135. Yablonskii, S. V. Control of the bias tilt angles in nematic liquid crystals / S. V. Yablonskii, K. Nakayama, S. Okazaki, M. Ozaki, K. Yoshino, S. P. Palto, M. Yu. Baranovich, A. S. Michailov // *J. Appl. Phys.* – 1999. – V.85. – P.2556.

136. Wei H.-C. Two-dimensional cell parameters of twisted nematic liquid crystal with an amplitude-sensitive heterodyne ellipsometer / H.-C. Wei, C.-C. Tsai, L.-P. Yu, T.-E. Lin, C.-J. Yu, M.-H. Liu, C. Chou // *Applied Optics*. – 2009. – V.48. – I.9. – Pp.1628-1634.

137. Chausov, D.N. Orientation of liquid crystals on interface / D.N. Chausov, A.K. Dadivanyan, O.V. Noah, V.V. Belyaev // 25th International Liquid Crystal Conference, Trinity College Dublin, Ireland, 29 June – 4 July 2014. Abstracts. P.3024.

138. Gharbi, A. Dynamics of surface anchoring breaking in a nematic liquid crystal / A. Gharbi, F.R. Fekih, G. Durand // *Liquid Crystals*. – 1992. – V.12. – I.3. – P.515-520.

139. Berreman D.W. Optics in stratified and anisotropic media:4x4-matrix formulation / D.W. Berreman // *J. Opt. Soc. Am.* – 1972. – V.62. – P.502-510.

140. Berreman D.W. Solid Surface Shape and the Alignment of an Adjacent Nematic Liquid Crystal / D.W. Berreman // *Physical Review Letters*. – 1972. – V.28. – I.26. – P.1683-1686.
141. Казначеев А.В. Влияние электрического и магнитного полей на термотропные и лиотропные нематические жидкие кристаллы: дисс. Д.-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. / А.В. Казначеев - М. - 2005г - 295с.
142. Poulin P. Inverted and multiple nematic emulsions. / P. Poulin, D.A.Weitz // *Physical Review Letters*. – 1998. – V.57. – No.1. – P.626-637.
143. Левин А.Д. Исследование геометрических параметров несферических наночастиц методом частично деполяризованного динамического рассеяния света. / А.Д. Левин, А.С. Лобач, Е.А. Шмыткова // *Российские нанотехнологии*. - 2015. - Т.10. - №5-6. - С.62-67.
144. Левин А.Д. Развитие оптико-спектральных методов характеристики наночастиц / А.Д. Левин, Ю.М. Садагов, Л.Л. Короли, Е.А. Шмыткова // *Российские нанотехнологии*. - 2013. - Т.8. - № 5-6. - С.86-91.
145. Левин А.Д. Развитие оптико-спектральных методов характеристики наночастиц в жидких средах / А.Д. Левин, А.И. Нагаев, А. Прибытков, Ю. Садакова, Е.А. Шмыкова // *Измерительная техника*. - 2015. - № 11. - С.64-67.
146. Невская Г.Е. Адаптивные линзы на основе жидких кристаллов. / Г.Е. Невская, М.Г. Томилин // *Оптический журнал*. – 2008. - Т.75. - №9. - С.35-48.
147. Грейсух Г.И. Расчёт высокоапертурных конфокальных дифракционно-линзовых объективов / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, З.А. Сидякина, С.А. Степанов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т.37. - №1. – С.45-50.
148. Грейсух Г.И. Пластмассово-линзовые вариообъективы с дифракционно-рефракционными корректорами / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.А. Степанов, А.В. Калашников // *Физические основы приборостроения*. - 2012. - Т.1. - №2. - С.83-90.

149. Сойфер В.А. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. - 2009. - Т.33. - №4. - С.352-368.
150. Головашкин Д.Л. Дифракционная компьютерная оптика: / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В. В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина; Под ред. В.А. Сойфера. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 736 с. - ISBN 978-5-9221-0845-4.
151. Способ получения масс для лепки с биоцидными свойствами: патент №2473216 Рос. Федерация: В.И. Мащенко, А.Н. Алексеев, Т.В. Картавенко, А.В. Оленин.
152. Bedjaouia L. Preferential solvation of the eutectic mixture of liquid crystals E7 in a polysiloxane / L. Bedjaouia, N. Gogibusb, B. Ewenb, T. Pakulab, X. Coqueretc, M. Benmounaa, U. Maschkec // Polymer. – 2004. – V.45. – P.6555–6560.
153. Humar M. Electrically tunable liquid crystal optical microresonators / M. Humar, M. Ravnik, S. Pajk, I. Muševič // Nat. Photonics. – 2009. – V.3. – P.595–600.
154. Виноградов А.В. Волны шепчущей галереи / А.В. Виноградов, А.Н. Ораевский // Соросовский образовательный журнал. - 2001. - Т.7. - №2. - С.96–102.
155. Коншина Е.А. Оптика жидкокристаллических сред / Е.А. Коншина - СПб: СПб НИУ ИТМО, 2012. - 99с.
156. Ландсберг Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг - М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957. - 759с.
157. Ashkin A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers / A. Ashkin // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. - 1997. - V.94. - P.4853–4860.
158. Zemanek P. Optical trapping of Rayleigh particles using a Gaussian standing wave / P. Zemanek // Opt. Commun. - 1998. - V.151. - P.273-285.
159. Arlt J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt, M.J. Padgett // Opt. Lett. - 2000. - V.25. - P.191 - 193.

160. Крайнов В.П. Ориентация и фокусировка молекул полем лазерного излучения / В.П. Крайнов // Соросовский образовательный журн. - 2000. - V.6. - P.90-95.
161. Letokhov V.S. Cooling and capture of atoms and molecules by a resonant light field / V.S. Letokhov, V.G. Minogin, B.D. Pavlik // Sov. Phys. JETP. - 1977. - V.5. - P.698 - 705.
162. Bjorkholm J.E. Observation of focusing of neutral atoms by the dipole forces of resonance radiation pressure / J.E. Bjorkholm // Phys. Rev. Lett. - 1978. - V.41. - P.1361 - 1364.
163. Gahagan K.T. Optical vortex trapping of particles / K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander // Opt. Lett. - 1996. - V.21. - P.827 - 829.
164. Torii Y. Pulsed polarization gradient cooling in an optical dipole trap with a Laguerre-Gaussian laser beam / Y. Torii // Eur. Phys. J. - 1998. - V.1. - P.239-242.
165. Svoboda K. Optical trapping of metallic Rayleigh particles / K. Svoboda, S.M. Block // Opt. Lett. - 1994. - V.19. - P.930 - 932.
166. O'Neil A.T. Three-dimensional optical confinement of micron-sized metal particles and the decoupling of the spin and orbital angular momentum within an optical spanner / A.T. O'Neil, M.J. Padgett // Opt. Commun. - 2000. - V.185. - P.139 - 143.
167. MacDonald M.P. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures / M.P. MacDonald // Science. - 2002. - V.296. - P.1101-1103.
168. Сойфер В.А. Нанопотоника и дифракционная оптика / В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. - 2008. - Т.32. - №2. - С.110 - 118.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

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

1. Belyaev V.V. Orientation of mesogen and hydrocarbon molecules on graphite and polyethylene crystal surfaces / V.V. Belyaev, A.K. Dadivanyan, Y.M. Pashinina, D.N. Chausov, 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. - 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. - 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. - 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, D.N. Chausov, A.S. Solomatin // *Optics Express*. – 2013. – V.21. – 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, D.N. Chausov, A.S. Solomatin // *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 // *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. Hovhannisyan, N.H. Hakobyan, 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. Belyaev V.V. Liquid crystal microlenses in porous media / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, A.G. Smirnov, D.R. Suarez, F.Y. Molina // Optics Communications. - 2018.

2 часть. Патенты РФ.

17. Способ изготовления жидкокристаллической ячейки: патент 2491316 Рос. Федерация: В.Г. Мазаева, В.В. Беляев, С.Н. Нацюк, Л.В. Скворцова, 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. Способ получения смеси жидкого кристалла с полимером для дисплейной техники и оптоэлектроники: патент № 2607454 Рос. Федерация: Беляев В.В., Машенко В.И., Соломатин А.С., Чаусов Д.Н.; заявка на патент РФ № 2015107901 Приоритет от 10.03.2015. Получено положительное решение о выдаче патента (15.07.2016).

19. Способ получения гомеотропно ориентированного слоя жидкого кристалла жидкокристаллического устройства: патент 2625121 Рос. Федерация: Беляев В.В., Соломатин А.С., Бобылев Ю.П., Шошин В.М., Чаусов Д.Н., Машенко В.И.; 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 - 41

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 Гос. 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, Л.М. Ярышева, 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.

4 часть. Периодические сборники, индексируемые в Google Scholar.

36. 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. Chaurov, A.A. Gorbunov // SID'12 Digest. – 2012. - P.1422 - 1425.
37. Belyaev V.V. Optical properties of liquid crystal cells with hybrid orientation and negative birefringence / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chaurov // SID'13 Digest. - 2013. – V.44. – I.1. - P.1328 - 1331.
38. Belyaev V.V. Measurement of the LC pretilt angle in hybrid LC cells / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chaurov // SID'13 Digest. – 2013. - P.1432-1435.
39. 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. Chaurov, V.G. Mazaeva, V.M. Shoshin, Y.P. Bobylev // SID'14 Digest. - 2014. - P.1445 - 1448.

40. 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.

Доклады

1. Бе́ляев В.В. Ориентация НЖК различной полярности на пленках кремнийорганических соединений различного молекулярного строения / В.В. Бе́ляев, Ал.Ан. Муравский, А.С. Соломатин, В.Г. Мазаева, С.Н. Нацюк, Д.Н. Чаусов, А.А. Горбунов, Ан.Ал. Муравский, В.М. Шошин, Ю.П. Бобылев // Доклады БГУИР (Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники). - 2011. - С.4 - 8.
2. Belyaev V.V. Optical properties of hybrid aligned nematic (HAN) LC cells / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov, V.M. Shoshin, Y.P. Bobylev, V.G. Mazaeva // 25th International Liquid Crystal Conference 2014. Dublin, Ireland, 29 June – 4 July 2014. Abstracts P1.040
3. Belyaev V.V. Different Polarity NLC Alignment on Organosilicon Films of Varying Molecular Structure / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov, V.M. Shoshin, Y.P. Bobylev, A.A. Muravskii, A.A. Muravskii, V.G. Mazaeva, S.N. Natsyuk, A.A. Gorbunov // Proc. XXXI IDRC Eurodisplay 2011 (Arcachon, France, 19-22 September 2011). Pp.17-19.
4. Belyaev V.V. New organosilicon oligomer films for NLC alignment / V.V. Belyaev, V.G. Mazaeva, A.S. Solomatin, A.A. Muravskii, A.A. Gorbunov, A.A. Muravskii // Proc. International Conference 2011 China display/Asia display, Kunshan, China, 6-9 November 2011. - Pp.4-8.
5. Belyaev V.V. Optical properties of liquid crystal cells with arbitrary pretilt angle / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov // Proc. EuroDisplay'13, London, UK, 16-19 September 2013. – Pp.4-8.
6. Dadivanyan A.K. Orientation of Mesogen and Hydrocarbon Molecules on Crystal Surfaces of Graphite and Polyethylene / A.K. Dadivanyan, Y.M. Ryabova,

D.N. Chausov, V.V. Belyaev, A.S. Solomatin // 23rd International Liquid Crystal Conference, Cracow, Poland, July 11-16, 2010, Abstracts P-2.29

7. Mazaeva V. Formation of organosilicon monomolecular films for LC alignment 23rd International Liquid Crystal Conference / V. Mazaeva, M. Sobolevskii, V. Belyaev, I. Kokaulina // Cracow, Poland, July 11-16, 2010, Abstracts P-1.139

8. Belyaev V.V. A Complex for LC Substances and Materials Characterization / V.V. Belyaev, V.Y. Baranov, D.N. Chausov, A.A. Gorbunov, A.S. Solomatin // 15th International Workshop on Inorganic and Organic Electrolunescence & 2010 International Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting & XVIII Advanced Display Technologies. International Symposium. St-Petersburg State Institute of Technology. St-Petersburg, Russia. September 27 – October 1, 2010. - P.162.

9. Dadivanyan A.K. Orientation of Mesogen Molecules on Different Surfaces / A.K. Dadivanyan, Yu.M. Ryabova, V.V. Belyaev, D.N. Chausov, A.S. Solomatin // 15th International Workshop on Inorganic and Organic Electrolunescence & 2010 International Conference on the Science and Technology of Emissive Displays and Lighting & XVIII Advanced Display Technologies. International Symposium. St-Petersburg State Institute of Technology. St-Petersburg, Russia. September 27 – October 1, 2010. - P.162.

10. Belyaev V.V. LC director surface pretilt angle measurement in LC cells with homogeneous and inhomogeneous LC director distribution / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov, A.A. Gorbunov // 24th International Liquid Crystal Conference. ILCC 2012. August 19th - 24th 2012. Mainz, Germany. Abstract 5551_0546

11. Belyaev V.V. LC pretilt angle and polar anchoring in cells with weak anchoring on organosilicon aligning films / V.V. Belyaev, A.S. Solomatin, D.N. Chausov, V.G. Mazaeva, S.N. Natsyuk, A.A. Gorbunov // 24th International Liquid Crystal Conference. ILCC 2012. August 19th - 24th 2012. Mainz, Germany. Abstract 5551_0547

12. Беляев В.В. Угол наклона и энергия сцепления в ЖК ячейках с кремнийорганической ориентирующей пленкой / В.В. Беляев, А.С. Соломатин, Д.Н. Чаусов, В.Г. Мазаева, С.Н. Нацюк, А.А. Горбунов, В.М. Шошин, Ю.П. Бобылев // Первая Всероссийская Конференция по Жидким Кристаллам (РКЖК-2012) 2012. Иваново. 17 –21 сентября 2012. - С.106.

13. Беляев В.В. Измерение поверхностного угла наклона в ЖК ячейках с однородным и неоднородным распределением директора / В.В. Беляев, А.С. Соломатин, А.А. Горбунов, Д.Н. Чаусов, В.М. Шошин // Первая Всероссийская Конференция по Жидким Кристаллам (РКЖК-2012) 2012. Иваново. 17 –21 сентября 2012. - С.69.

14. Беляев В.В. Метод измерения угла преднаклона ЖК в ячейках с однородным и неоднородным распределением директора / В. Беляев, Д. Чаусов, А. Соломатин, А. Горбунов // XX Международный симпозиум “Передовые дисплейные и световые технологии” Крым, 8-12 октября 2012 г.

15. Беляев В.В. Оптические характеристики жидкокристаллических ячеек с произвольным углом наклона ЖК на подложках / В.В. Беляев, А.С. Соломатин, Д.Н. Чаусов // 21-й Международный Симпозиум «Передовые Дисплейные и Световые Технологии» (ADLT-13), г. Мытищи, Московская обл., 9-12 апреля 2013 г. Тезисы докл.

16. Беляев В.В. Установки для измерения параметров ориентации жидких кристаллов (угол наклона, энергия сцепления) оптическими и электрооптическими методами / В.В. Беляев, А.А. Горбунов, С.В. Мойсеенко, И.В. Попов, К.В. Савцов, А.С. Соломатин, Д.Н. Чаусов // 21-й Международный Симпозиум «Передовые Дисплейные и Световые Технологии» (ADLT-13), г. Мытищи, Московская обл., 9-12 апреля 2013 г. Тезисы докл.

17. Belyaev V.V. Diffraction on Anisotropic Substrates with Surface Microrelief / V.V. Belyaev, A.Y. Merkulov, A.A. Belyaev, A.S. Solomatin, A.A. Gorbunov // Proc. EuroDisplay'11, Arcachon, France. – 2011. - Pp.121-124.

18. Belyaev V.V. New promising materials for rugged and flexible flat panel displays / V.V. Belyaev, V. Mashchenko, D. Chaurov, A. Solomatin, V. Mazaeva, A.

Smirnov, Y. Satskevich, A. Gorbunov // Electronic displays Conference, Nuremberg, Germany, 25-26 February 2015, Proceedings (e-copy)

19. Соломатин А.С., Физические свойства конденсированных систем с неоднородной структурой в микро- и нанометровом диапазоне // Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, нанoeлектронных приборов и экологичных технологий», МГОУ, Москва, 21-24 апреля 2015. - С.17.

20. Соломатин А.С. Влияние граничных углов наклона молекул жидкого кристалла на точность измерений в матричной схеме из четырех конденсаторов / А.С.Соломатин, Д.О.Рыбаков, В.В.Беляев. // Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, нанoeлектронных приборов и экологичных технологий», МГОУ, Москва, 21-24 апреля 2015. - С.80.

21. Беляев В.В. Дифракция света на решетках с периодическим микрорельефом при отрицательном знаке оптической анизотропии материала / В.В.Беляев, А.С.Соломатин, А.Л.Маргарян, В.К.Абрамян, Д.Л.Оганесян, Н.Г.Акопян, В.М.Арутюнян // Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, нанoeлектронных приборов и экологичных технологий», МГОУ, Москва, 21-24 апреля 2015. - С.100.

22. Belyaev V.. Light Diffraction on Gratings with Periodic Microrelief with Negative Optical Anisotropy / V. Belyaev, A. Solomatin, A. Gorbunov, H. Margaryan, V. Abramyan, D. Oganessian, N. Hakobyan, V. Aroutiounian // Topical Meeting Optics of Liquid Crystals (OLC-15), Sopot, Poland, 13-18 September 2015. Abstracts. Paper O-08.

23. Belyaev V.V. Dielectric Properties of Liquid Crystals for Display and Sensor Applications / . V. Belyaev, D. N. Chausov, A. D. Kurilov, D. O. Rybakov, A. S. Solomatin, A. A. Murauski, A. A. Muravsky, V. G. Chigrinov, F. Fan // International Display Research Conference SID EuroDisplay 2015, Gent, Belgium, 21-23 September 2015. Paper No S3.3. Abstracts. 2015. - S3.3. - P. 15.

24. Соломатин А.С. Сферические оптически анизотропные нематические ЖК структуры в оптически изотропном объеме // Международная конференция «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, нанoeлектронных приборов и экологичных технологий», МГОУ, Москва, 14-21 апреля 2016г.

25. Belyaev V.V. Composite systems with inhomogeneous liquid crystal orientation / V. V. Belyaev, A. S. Solomatin, D. N. Chaurov, A. K. Dadivanyan, V. I. Maschenko, V. G. Mazaeva // 26th International Liquid Crystal Conference, 31 July – 5 August 2016, Liquid Crystal Institute, Kent State University, USA, Abstracts. ILCC2016-220.