

На правах рукописи

Зырянов Виктор Яковлевич

**СТРУКТУРНЫЕ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ОДНООСНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПЛЕНОК
КАПСУЛИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОМ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ**

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Красноярск – 2002

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор **Сонин А.С.**

доктор физико-математических наук, профессор **Слабко В.В.**

доктор физико-математических наук, профессор **Подопригора В.Г.**

Ведущая организация:

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН

Защита состоится “ ____ ” ноября 2002 г. в 14 час. 30 мин.

на заседании Диссертационного Совета Д 003.055.01

Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН

по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН

Автореферат разослан “ ____ ” октября 2002 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета Д 003.055.01

кандидат физико-математических наук

А.Н. Втюрин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Исследование композитных жидкокристаллических материалов (гелей, пористых структур, капсулированных полимером жидких кристаллов (КПЖК) и пр.) представляет новое направление в развитии современного материаловедения и нацелено на выяснение взаимосвязи молекулярных и структурных свойств исходных компонент, их взаимодействий на границе раздела, морфологических параметров, магнитных, электрических и оптических характеристик композитной среды. Специфика свойств данных материалов определяется, прежде всего, большим многообразием различных типов ориентационного упорядочения жидких кристаллов в объемных образованиях сложной формы, наличием в них топологических дефектов - дисклинаций и дислокаций, их лабильностью и высокой чувствительностью к различным воздействиям.

Не менее важен прикладной аспект исследований, поскольку открываются возможности создания новых функциональных материалов для оптоэлектроники и информационных технологий, сочетающих в себе достоинства исходных компонент. В этом плане наибольший интерес вызывают КПЖК материалы, представляющие собой полимерные пленки с диспергированными в них каплями жидких кристаллов и характеризующиеся простой и недорогой технологией изготовления, гибкостью, надежностью в эксплуатации, высокими быстродействием и чувствительностью к внешним воздействиям, в особенности, к электрическому полю.

Состояние вопроса к началу исследований по теме диссертации

Первые наблюдения капельных дисперсий ЖК в полимерной матрице были проведены еще Леманом в конце 19 века. С тех пор прошло более полувека прежде, чем бурно развивающаяся наука о жидких кристаллах обратила свое внимание на композитные ЖК структуры в связи с перспективностью их применения в термографии, оптоэлектронике, дисплейной техники. На рубеже 60-70-х годов появилась серия патентов (Churchill et al.) по термохромным КПЖК пленкам, заложивших основы формирования нового направления материаловедения – создания и исследования композитных многофункциональных материалов с использованием жидких кристаллов. Весомый вклад в развитие прикладных и фундаментальных аспектов исследований термохромных композитных ЖК пленок внесли работы отечественных групп под руководством Г.М. Жарковой, В.Г. Тищенко, А.С. Сониной.

Ключевой работой, инициировавшей взрыв интереса к электрооптике ЖК композитов, явилось исследование [1] эффекта управляемого электрическим полем светорассеяния в гетерофазной структуре, представляющей собой микропористый целлюлозный фильтр, заполненный нематиком. В последующие несколько лет был оформлен ряд базовых патентов (особенно

активно, американскими исследовательскими группами: Fergason et al., Drzaic et al., Doane et al., Vaz et al., Lackner et al.), охвативших основные аспекты технологии изготовления и способов использования электрооптических КПЖК материалов, а также опубликованы приоритетные результаты исследований топологии дефектов и особенностей ориентационно-структурных превращений в дисперсных ЖК средах под действием электрического поля (Г.Е. Воловик, А.В. Ковальчук, М.В. Курик, О.Д. Лаврентович и др.), исследования эффектов светорассеяния и их взаимосвязи со структурной организацией композитных пленок и материальными параметрами используемых компонентов (Zumer et al.).

К концу 1980-х годов были выяснены основные закономерности в структурообразовании композитных жидкокристаллических сред, их оптических и спектральных свойствах, электро- и магнитооптических эффектах, особенностях фазовых переходов в замкнутых полостях, проведен сравнительный анализ со свойствами чистых ЖК слоев, показаны возможности практического использования композитных материалов [2].

Однако анализ многочисленных публикаций по данной тематике показал, что работы были направлены, в основном, на изучение **хаотически ориентированных** капельных ансамблей ЖК, диспергированных в **макроскопически изотропной** полимерной матрице. Такие пленки в исходном состоянии обычно рассеивают свет любой поляризации, а под действием поля могут перейти в прозрачное состояние. В то же время, всего лишь несколько работ касались исследований ориентационно упорядоченных капельных ансамблей. Было показано, как можно изготовить **одноосно ориентированные** пленки капсулированных полимером холестериков [3] и нематиков [4] с использованием деформации растяжения или сдвига, а также прикладывая электрическое или магнитное поле в процессе формирования композитной структуры [5]. В таких пленках была обнаружена макроскопическая оптическая анизотропия, так что они могли служить анизотропно рассеивающими поляризаторами света. Но детальные исследования особенностей морфологии пленок, структурного упорядочения в одноосно ориентированных ансамблях капель ЖК и влияния на него внешних воздействий, изучение макроскопической оптической анизотропии в зависимости от приложенного поля ко времени начала данной работы проведены не были.

Кроме того, необходимо подчеркнуть, что объектами исследований были в основном электрооптические пленки капсулированных полимером нематических жидких кристаллов (КПНЖК), и, в меньшей мере, капсулированных полимером холестерических жидких кристаллов (КПХЖК). При этом отсутствовали сведения об исследованиях электрооптических материалов на основе капсулированных полимером сегнетоэлектрических жидких кристаллов (КПСЭЖК), не было известно, как их изготовить, какие у них будут свойства и как их использовать в практических приложениях.

Следует отметить, что в последнее время особенно обострился интерес к надмолекулярному структурированию материалов, поскольку в связи с формированием нового научно-технического направления – молекулярной электроники - все большую актуальность приобретают вопросы создания и исследования организованных молекулярных ансамблей, имеющих и ориентационное, и трансляционное упорядочение.

Цель работы и задачи исследований

Целью работы является исследование новых электрооптических материалов, созданных на основе одноосно ориентированных пленок капсулированных полимером жидких кристаллов.

В ходе выполнения работы решались следующие задачи:

- Разработка методов изготовления одноосно ориентированных КПЖК пленок, а также экспериментального исследования и компьютерного моделирования их структурных и электрооптических свойств.

- Теоретический анализ и экспериментальное исследование особенностей перехода Фредерикса в биполярных каплях нематика с жестко фиксированными полюсами. Изучение зависимости критического поля Фредерикса от анизотропии и размера капель нематика.

- Экспериментальные и теоретические исследования светопропускания одноосно ориентированных пленок капсулированных полимером нематических жидких кристаллов в зависимости от морфологических характеристик и приложенного напряжения.

- Исследование ориентационной структуры и анизотропии светопропускания одноосно ориентированных пленок капсулированных полимером холестерических жидких кристаллов в зависимости от анизотропии капель ЖК, приложенного электрического поля и концентрации хиральной добавки.

- Исследование гистерезиса вольт-контрастной характеристики и эффекта термо-электрооптической бистабильности в капсулированных полимером холестерических жидких кристаллах, а также возможности их использования в устройствах записи и отображения информации.

- Изучение структурных, оптических и электрооптических свойств одноосно ориентированных пленок капсулированных полимером сегнетоэлектрических жидких кристаллов и возможности их применения в светомодулирующих устройствах.

Научная ценность и новизна

1. Впервые теоретически и экспериментально исследованы особенности перехода Фредерикса в биполярных каплях нематика с жестко фиксированными полюсами под действием электрического поля, направленного ортогонально исходной оси симметрии капель. Предсказан и экспериментально подтвержден двойственный характер переориентации таких

капель: пороговый в области, где исходная ориентация директора была ортогональна полю, и беспороговый для остального объема капли.

2. С использованием компьютерных расчетов исследована зависимость порогового поля переориентации эллипсоидальных капель нематика с жестко фиксированными полюсами от их размеров и анизотропии. Корректность расчетов подтверждена согласием полученной зависимости с данными проведенного эксперимента.

3. Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования характеристик светопропускания одноосно ориентированных КПНЖК пленок в зависимости от величины деформации растяжения, температуры, приложенного электрического поля, размеров капель нематика, длины волны излучения, толщины образцов.

4. Исследованы осцилляции зависимости интенсивности прямо проходящего через КПНЖК пленку излучения от напряжения и выявлена их интерференционная природа. Показана возможность реализации эффекта интерференционного гашения света в монослойных одноосно ориентированных КПНЖК пленках при воздействии электрического поля. Изучены особенности проявления интерференционных осцилляций в динамике электрооптического отклика.

5. Экспериментальные исследования одноосно ориентированных КПХЖК пленок выявили три области концентрации хиральной добавки, соответствующие различным конфигурациям директора в эллипсоидальных каплях холестерика, которые в свою очередь определяют специфику ориентационно-структурных переходов при воздействии электрического поля и обусловленную ими анизотропию оптического отклика композитных пленок.

6. Исследована зависимость гистерезиса вольт-контрастной характеристики КПХЖК пленок от концентрации хиральной добавки, размера и формы капель холестерика, максимума приложенного напряжения и температуры. Проведен сравнительный анализ полученных характеристик гистерезиса с результатами аналогичных исследований монослоев холестерических ЖК.

7. Обнаружен и исследован эффект электро-термооптической бистабильности в пленках капсулированных полимером холестерических жидких кристаллов. Показана возможность управления оптическим пропусканием КПХЖК пленок посредством комбинированного воздействия электрического поля и лазерного излучения.

8. Впервые изготовлены и изучены образцы одноосно ориентированных пленок капсулированных полимером сегнетоэлектрических жидких кристаллов. Анализ текстурных картин позволил выявить основные типы ориентационных структур в каплях сегнетоэлектрических смектиков с планарной границей. В результате температурных исследований анизотропии светопропускания КПСЭЖК пленок и амплитуды модуляции излучения установлено, что температурная зависимость последней определяется в основном изменением молекулярного угла наклона θ . Установлено, что

зависимость амплитуды модуляции света от величины приложенного напряжения имеет беспороговый характер.

9. Исследование динамики оптического отклика КПСЭЖК пленок показало, что время реакции, нормированное на величину поля, сравнимо с данными по монослоям СЭЖК. Время релаксации в композитных пленках на основе СЭЖК с большим шагом спирали гораздо меньше, чем в монослоях, определяя специфику электрооптической бистабильности в КПСЭЖК пленках.

10. Предложены и реализованы различные способы модуляции света одноосно ориентированными КПСЭЖК пленками за счет эффекта управляемого светорассеяния. Получены соотношения для описания характеристик электрооптического отклика в различных экспериментальных схемах модуляции света.

Практическая значимость

Комплекс теоретических и экспериментальных результатов диссертации является методической основой для изготовления, исследования и практического использования одноосно ориентированных пленок капсулированных полимером жидких кристаллов различного типа: нематиков, холестериков, сегнетоэлектрических смектиков.

1. Разработан способ изготовления одноосно ориентированных КПЖК пленок при диспергировании жидких кристаллов в анизотропно отверждаемой под действием плоско поляризованного света полимерной матрице.

2. Разработаны монослойные КПЖК пленки с интерференционным усилением контраста, установлено оптимальное соотношение их структурных и материальных параметров.

3. Предложен и апробирован способ численного расчета порогового поля Фредерикса и вольт-контрастных характеристик КПНЖК пленок с жесткой фиксацией полюсов в биполярных каплях нематика.

4. Показана возможность повышения термостабильности структуры и электрооптических характеристик КПНЖК пленок за счет модификации их в одноосно ориентированное состояние.

5. Разработаны поляризационно-селективные модуляторы света на основе одноосно-ориентированных КПХЖК пленок. В зависимости от величины приложенного поля такой модулятор может находиться в различных оптических состояниях: рассеивать свет любой поляризации, пропускать только одну плоско поляризованную компоненту света и быть прозрачным для света любой поляризации.

6. Разработан материал и метод термооптической, реверсивной записи информации в бистабильных КПХЖК пленках в нормальной и инверсной рассеивающих модах.

7. Разработан новый электрооптический материал на основе одноосно ориентированных КПСЭЖК пленок, имеющий рекордное быстродействие среди композитных жидкокристаллических сред. Предложены и апробированы различные конструкции модуляторов света с использованием

данного материала. Проведен анализ возможностей оптимизации материальных параметров и конструкции КПСЭЖК модуляторов света.

Защищаемые положения

1. Методические разработки: методика получения одноосно ориентированных КРНЖК пленок на основе полимеров с фотоанизотропным отверждением; методика изготовления электрооптических КПСЭЖК материалов с использованием одноосной ориентации пленок; методика компьютерного моделирования структурных и электрооптических свойств биполярных капель нематика с жесткой фиксацией полюсов.

2. Механизм перехода Фредерикса в биполярных каплях нематика с жестко фиксированными полюсами. Двойственный характер переориентации таких капель: пороговый в области, где исходная ориентация директора была ортогональна электрическому полю, и беспороговый для остального объема капли.

3. Результаты анализа взаимосвязи критического поля Фредерикса, величины деформации растяжения, размера и анизотрии биполярных капель нематика в одноосно ориентированных композитных пленках.

4. Интерференционные осцилляции зависимости светопропускания от приложенного напряжения, проявление интерференционных осцилляций в динамике оптического отклика и эффект интерференционного гашения света в пленках капсулированных полимером нематических жидких кристаллов.

5. Зависимость анизотропии поляризованных компонент светопропускания в электрооптическом отклике одноосно ориентированных КРНЖК пленок, а также конфигурации директора в каплях холестериков с планарной границей от величины деформации пленок и концентрации хиральной добавки.

6. Эффект электро-термооптической бистабильности в пленках капсулированных полимером холестерических жидких кристаллов. Способ термоадресуемой, реверсивной записи информации в бистабильных КРНЖК пленках в нормальной и инверсной рассеивающей модах.

7. Электрооптический материал на основе одноосно ориентированных пленок капсулированных полимером сегнетоэлектрических жидких кристаллов и его структурные, оптические и электрооптические свойства. Различные способы модуляции света с использованием одноосно ориентированных КПСЭЖК пленок.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на II Всесоюзном семинаре «Оптика ЖК» (Красноярск, 1990); III International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals (Cetraro, Italy, 1990), II Всесоюзном совещании "Физические основы построения устройств обработки информации на молекулярном уровне" (Москва, 1990), IV International Conference on Optics of Liquid Crystals (Florida, USA, 1991), Summer European

Liquid Crystals Conference (Vilnius, Lithuania, 1991), International Symposium of Society for Information Display (Boston, USA, 1992); IV International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals (Tokyo, Japan, 1993); V International Conference on Optics of Liquid Crystals (Hungary, 1993); Международной конференции "Оптика лазеров" (Москва, 1993); International Symposium of Society for Information Display (San Jose, USA, 1994); XV International Liquid Crystal Conference (Budapest, Hungary, 1994); Russian-Japan International Meeting on Ferroelectrics (Japan, 1994); International Conference on Optical Memory & Neural Networks (Moscow, 1994); International Liquid Crystal Workshop «Surface phenomena» (St.-Peterburg, Russia, 1995); 15th International Display Research Conference "Asia Display '95" (Hamamatsu, Japan, 1995); V Международном симпозиуме "Современные средства отображения информации" (Раков, Беларусь, 1996); III Russian-Chinese symposium on laser physics and laser technology (Krasnoyarsk, 1996); XVI International Liquid Crystal Conference (Kent, USA, 1996); VII International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals (Heppenheim, Germany, 1997); International Symposium "Optical Information Science and Technology" (Moscow, 1997); VI International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals (Brest, France, 1997); IV Международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибирск, 1998); XVII International Liquid Crystal Conference (Strasbourg, France, 1998); 18th International Display Research Conference "Asia Display '98" (Seoul, Korea, 1998); 7th International Symposium "Advanced Display Technologies" (Minsk, Belarus, 1998); VII International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals (Darmstadt, Germany, 1999); II Межрегиональной научно-технической конференции "Ультрадисперсные порошки, материалы и наноструктуры" (Красноярск, 1999); European Conference on Liquid Crystals (Hersonissos, Crete, Greece, 1999); MRS Spring Meeting (San Francisco, USA, 1999); V Международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибирск, 2000); 9th International Symposium "Advanced Display Technologies" (Moscow, Russia, 2000); XVIII International Liquid Crystal Conference (Sendai, Japan, 2000);

Публикации

По теме диссертации опубликовано 49 статей в зарубежных и рецензируемых отечественных журналах, 2 патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 264 страницы, включая 129 рисунков, список цитируемой литературы содержит 255 наименований.

Содержание работы

Во введении представлена общая характеристика работы: обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований, показана научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертации.

Первая глава – обзорная, состоящая из нескольких разделов. В разделе 1.1 приведена классификация жидких кристаллов, показано структурное упорядочение нематиков, холестериков и смектиков, в том числе сегнетоэлектрических смектиков. В разделе 1.2 описаны упругие свойства ЖК, приведены соотношения для определения плотности свободной энергии ЖК при наличии изгибовых деформаций. Раздел 1.3 посвящен электро- и термооптическим эффектам в ЖК. Здесь приводится соотношение, определяющее вклад электрического поля в плотность свободной энергии ЖК. При наличии данных по упругим константам ЖК, анизотропии диэлектрической проницаемости, граничным условиям, величине и направлению электрического поля указанные соотношения позволяют определить равновесную конфигурацию директора. Показаны основные варианты перехода Фредерикса в нематиках и приведены соответствующие формулы для расчета порогового поля. Представлены результаты исследования [6] переориентации в электрическом поле НЖК, заключенного в прямоугольную полость размером $d_x \times d_y \times d_z$, при условии жесткой ориентации молекул на границе раздела. В этом случае при однородной ориентации директора вдоль оси Z величину порогового поля, направленного по оси X можно рассчитать по формуле:

$$E_c = \pi \left(\frac{1}{\epsilon_0 \Delta \epsilon} \right)^{1/2} \left(\frac{K_{11}}{d_x^2} + \frac{K_{22}}{d_y^2} + \frac{K_{33}}{d_z^2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где K_i ($i = 1, 2, 3$) – модули упругости, соответственно, для S-, T-, В-деформации, $\Delta \epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$, $\epsilon_{||}$, ϵ_{\perp} – компоненты относительной диэлектрической проницаемости нематика. Приведена формула для определения критического поля раскрутки спирали холестерика и результаты исследования [7] явления гистерезиса при переориентации монослоя ХЖК. Обсуждаются особенности переориентации в электрическом поле сегнетоэлектрических смектиков S^* и A^* , приведены соотношения для расчета критического поля раскрутки геликоида в S_m S^* фазе и динамических параметров данного эффекта. Описываются электро- и термооптические эффекты в нематиках, холестериках и сегнетоэлектрических смектиках.

Раздел 1.4 содержит общее описание композитных жидких кристаллов и методов их приготовления. В разделе 1.5 описаны КПНЖК пленки и основные конфигурации директора в каплях нематика. Анализируются особенности

переориентации биполярных капель нематика в электрическом поле в случае нежесткого закрепления полюсов [8]. Для эллипсоидальных капель эффект имеет пороговый характер и заключается в перемещении полюсов по поверхности капли с сохранением ее биполярной структуры. В отдельных каплях в [8] наблюдали затормаживание движения одного из полюсов, на основании чего было сделано заключение о возможности их жесткой фиксации. Однако случаи жесткой фиксации обоих полюсов во всем ансамбле капель нематика выявлены не были и остались за пределами рассмотрения. Описывается изменение светопропускания КПЖК пленок, обусловленное эффектом регулируемого полем светорассеяния. Если перпендикулярная компонента показателя преломления нематика n_{\perp} и показатель преломления полимерной матрицы n_p равны

$$n_{\perp} = n_p, \quad (2)$$

то композитная пленка на основе нематика с $\Delta\epsilon > 0$ под действием электрического поля становится прозрачной. Зависимость светопропускания от приложенного напряжения имеет классическую S-образную форму. Однако в работах [9, 10] на начальном участке вольт-контрастной характеристики (ВКХ) наблюдался локальный минимум, объясняемый формированием доменов или перераспределением директора, приводящим к увеличению светорассеяния. Наиболее адекватной моделью для описания эффектов светорассеяния в КПЖК пленках считается приближение аномальной дифракции [11], в рамках которой полное сечение рассеяния определяется, как:

$$\sigma = 2\sigma_0 \left[1 - \frac{2}{v} \sin v + \frac{2}{v^2} (1 - \cos v) \right], \quad (3)$$

где $\sigma_0 = \pi R^2$ – геометрическое сечение рассеяния для сферической капли ЖК с радиусом R , а параметр

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2R \cdot (n_{lc} - n_p) \quad (4)$$

Здесь n_{lc} – соответствующий показатель преломления ЖК. Тогда светопропускание образца толщиной d , содержащего N капель в единице объема

$$T = I/I_0 = \exp(-N \cdot \sigma \cdot d), \quad (5)$$

где I_0 – интенсивность падающего, а I – прямо проходящего излучения, при отсутствии поглощения и в случаях, допускающих пренебрежение многократным перерассеянием света.

В разделе 1.6 представлены капсулированные полимером холестерические жидкие кристаллы, возможные конфигурации директора в каплях холестериков и их трансформация в электрическом поле. Капельные дисперсии смектиков А и С описаны в разделе 1.7. Здесь отмечено отсутствие каких-либо сведений об исследовании электрооптических материалов на основе капсулированных полимером сегнетоэлектрических ЖК. В разделе 1.8

представлены имевшиеся к началу данной работы сведения об одноосно ориентированных КПЖК пленках. Было показано, что одноосное растяжение или сдвиг КПЖК пленок на основе нематиков и холестериков вызывают появление анизотропии их макроскопических оптических свойств: селективного отражения и поглощения [3], а также светорассеяния [4], благодаря чему их можно использовать в качестве светополяризующих материалов. Преимущественная ориентация директора нематика вдоль направления деформации обусловлена суммарным эффектом анизотропии формы капли (для биполярной конфигурации минимум упругой энергии соответствует ориентации биполярной оси вдоль длинной оси эллипсоида капли [8] и анизотропии поверхностного взаимодействия, возникающей за счет частичной ориентации макромолекул полимера вдоль направления деформации. Одноосно ориентированный ансамбль капель ЖК можно создать, прикладывая электрическое или магнитное поле в момент фазового разделение при изготовлении композитной пленки [5]. В этом случае преимущественная ориентация директора ЖК с $\Delta\epsilon > 0$ вдоль поля обусловлена лишь анизотропией поверхностного взаимодействия. Таким образом, в указанных работах обозначилась новая тенденция в развитии тематики композитных ЖК материалов, направленная на разработку одноосно ориентированных КПЖК пленок и определяющая необходимость проведения комплексных исследований взаимосвязи их структурных, оптических и электрооптических свойств. В конце главы сформулированы задачи исследований.

Во второй главе представлен перечень используемых материалов с обоснованием их выбора, описаны методики приготовления образцов и их экспериментальных исследований. В качестве нематика в основном использовался широко известный ЖК 5ЦБ (4-н-пентил-4'-цианобифенил), хорошо исследованный различными методами, что дает возможность сравнивать полученные результаты с данными независимых исследований. В случаях, требующих более широкого температурного диапазона мезофазы, использовались нематические смеси на основе производных цианобифенила и оксидианобифенила. Для получения холестерика нематик легировался хиральной добавкой, в качестве которой использовался холестерилвый эфир уксусной кислоты (ХЗ). Изменение концентрации ХЗ позволяло варьировать шаг холестерической спирали. При исследовании лазерно-адресуемой записи информации в бистабильных КПХЖК пленках для усиления светопоглощения в хирально-нематическую смесь добавлялся молекулярный краситель КД-184 (МНПО "НИОПИК") с длиной волны максимума поглощения $\lambda_{\max} \cong 0.530$ мкм. Часть исследований КПСЭЖК пленок была проведена с использованием классического объекта ДОБАМБЦ (4-децилоксибензилиден-4'-амино-2-метилбутилциннамат), который является наиболее детально изученным сегнетоэлектрическим смектиком. Кроме того, в рамках совместных работ по изучению композитных материалов Пожидаевым и др. (ФИ РАН им. П.Н. Лебедева) были специально разработаны сегнетоэлектрические смеси,

имеющие удобный температурный диапазон мезофазы и оптимизированные по структурным и электрооптическим параметрам. В качестве полимерной матрицы применялись поливинилбутираль (ПВБ) и поливинилацетат (ПВА) - полимеры из ряда термопластиков, обеспечивающие планарное сцепление с исследуемыми ЖК. Кроме этого был апробирован фотоотверждаемый полимер NOA-65 (Norland Optical Adhesive 65, Norland Products Inc., USA), который позволяет изготовить однородные КПЖК пленки с высокой моносферностью капельного ансамбля. Указанные полимеры обеспечивают хорошее согласование показателей преломления (2) с исследуемыми ЖК.

Температурные и спектральные зависимости показателей преломления компонент измерялись с помощью стандартных рефрактометрических методов: клинового метода и метода предельного угла. Соотношение показателей преломления ЖК и полимеров (ПВБ и ПВА) в зависимости от температуры показано на примере ЖК 5ЦБ и СЭЖК смеси ЖКС-178.

Образцы КПЖК пленок приготавливались с использованием методов фазового разделения из раствора (SIPS) и из расплава (TIPS), либо их сочетания. В первом случае, раствор ЖК и полимера в органическом растворителе выливался на фторопластовую подложку. После испарения растворителя смесь становилась гетерофазной. Морфологические параметры структуры (величина ЖК капель, их форма и относительное расположение в полимерной матрице) задавалась составом композиции, температурой и скоростью испарения растворителя. Капли ЖК имели форму сплюснутого в плоскости пленки эллипсоида с осями $a_0=b_0>c_0$ (ось c_0 перпендикулярна плоскости пленки). Отношение a_0/c_0 лежало в интервале 1.5÷2.0, что согласуется с данными измерений аналогичного материала [12]. Полученная КПЖК пленка отделялась от подложки без деформации структуры и закреплялась в зажимах специально сконструированного устройства, позволяющего проводить ее однонаправленное растяжение, величина которого измерялась с точностью 0.01 мм. В случае метода TIPS гомогенный расплав ЖК с полимером помещался между двух стеклянных подложек с прозрачными электродами (ITO - покрытие). Такой сэндвич в разогретом состоянии сжимался прессом до необходимой толщины композитной пленки и охлаждался до температуры фазового разделения компонент. Морфология пленки определяется ее составом и режимом охлаждения. Затем производилась однонаправленная сдвиговая деформация пленки и ее охлаждение до комнатной температуры. КПЖК пленки на основе NOA-65 изготавливались согласно методу разделения фаз за счет химической полимеризации (PIPS), которая в данном случае инициировалась ультрафиолетовым (УФ) излучением. Вариация состава композиции, температуры и плотности мощности УФ излучения позволяет получать композитные пленки с заданной морфологией.

Помимо известных способов, совместно с украинскими исследователями (Институт физики Украинской Академии наук) нами разработана оригинальная методика изготовления одноосно ориентированных

композитных пленок, основывающаяся на использовании эффекта фотоиндуцированной анизотропии, возникающей при отверждении некоторых полимеров под действием линейно поляризованного света. В качестве матрицы нами был использован фотополимеризуемый поливинилциннамат. В результате была получена КПЖК пленка, в плоскости которой биполярные капли нематика имели круглую форму, но их оси симметрии были ориентированы преимущественно в одном направлении. Здесь влияние анизотропии капель отсутствует, а одноосно ориентированное состояние композитной пленки обусловлено лишь анизотропией поверхностного взаимодействия, как и в процессе полимеризации под действием электрического или магнитного поля (см. выше). Позднее аналогичные результаты были получены в независимых исследованиях по созданию одноосно ориентированных дисперсий нематиков и сегнетоэлектрических смектиков в анизотропно фотоотверждаемых полимерах [13]. Данная методика особенно перспективна для изготовления КПЖК пленок с заданным распределением по площади ориентации ансамбля капель.

Исследования морфологических характеристик образцов и их изменений при одноосной деформации, а также ориентационной структуры в каплях ЖК и ее трансформации под действием электрического поля проводились при помощи поляризационного микроскопа POLAM P-113, сопряженным с видеокамерой и компьютером. Размер капель ЖК определялся с использованием оптического микрометра МОВ-1-15, смонтированного в окуляре, с ценой деления 0.33 мкм. При исследовании электрооптических характеристик КПЖК пленок в процессе их деформации образцы закреплялись в устройстве для растяжения, которое устанавливалось на предметный столик длиномера ИКУ-2, позволяющего проводить измерения толщины композитной пленки с точностью 0.5 мкм. В качестве источника излучения использовались лампы накаливания, а также гелий-неоновый, либо аргоновый лазеры. В заключение главы приводится подробное описание экспериментальных установок и используемых методик исследования оптических и электрооптических характеристик одноосно ориентированных КПЖК пленок.

Третья глава работы содержит результаты исследований ориентационно-структурных, оптических и электрооптических свойств одноосно ориентированных КПНЖК пленок. В разделе 3.1 экспериментально исследована зависимость светопропускания $T_{\parallel,\perp}$ КПНЖК пленок и показателей рассеяния $k_{\parallel,\perp} = N\sigma_{\parallel,\perp}$ (см. (5)) для компонент излучения, поляризованных параллельно и перпендикулярно направлению ориентации пленки, от величины деформации растяжения. Позднее результаты этих исследований получили теоретическую интерпретацию в рамках оригинальной оптико-механической модели [14], разработанной специально для данного случая. Измерения показали, что достаточно небольшого удлинения (для изученных образцов примерно в полтора раза), чтобы достигнуть высокой поляризующей способности КПНЖК

пленки, обусловленной анизотропией светорассеяния. Поляризующая способность композитных пленок сохраняется в температурном диапазоне существования мезофазы капсулированного ЖК. В отличие от призматических поляризаторов, одноосно ориентированные КПЖК пленки также компактны и просты в изготовлении, как и поляроидные пленки на основе анизотропии светопоглощения. Но по сравнению с последними они имеют следующие преимущества. Во-первых, КПЖК пленку можно использовать для поляризации мощного излучения, так как, если поляроидная пленка поглощает “ненужную” компоненту света и, нагреваясь, разрушается, то композитная пленка ее рассеивает и, следовательно, нагревается гораздо слабее. Во-вторых, КПЖК пленки эффективно поляризуют излучение во всей области прозрачности используемых компонент (видимая и ближняя ИК-область) при выполнении условия (2), в то время, как поляроиды – только в полосе поглощения собственного или растворенного в них дихроичного красителя. Однако наиболее важным отличием от поляроидов является возможность управления анизотропией светопропускания одноосно ориентированных КПЖК пленок воздействием электрического поля (рис. 1).

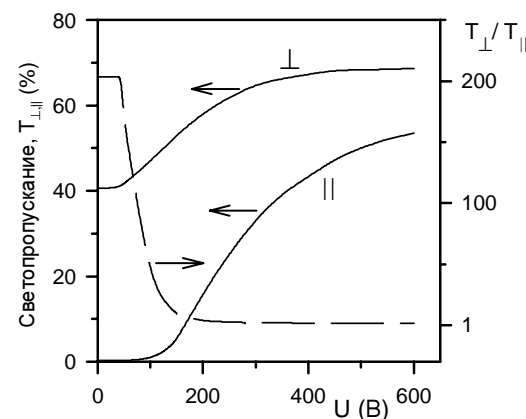


Рис. 1. Зависимости пропускания поляризованных компонент света и их отношения от величины управляющего напряжения. Параметр удлинения КПЖК пленки $\rho = L / L_0 \approx 1.4$. Толщина образца 60 мкм, капли нематика расположены многослойно и имеют средние размеры в плоскости пленки $a=8$ мкм, $b=4$ мкм.

Результаты исследования текстурных картин капель 5ЦБ, диспергированных в поливинилбутирале, с использованием поляризационного микроскопа представлены в разделе 3.2. Во всем ансамбле монослойно расположенных капель нематика наблюдалась текстура, типичная для биполярной конфигурации директора. В недеформированных образцах оси симметрии, соединяющие полюса, ориентированы хаотично, но лежат в плоскости пленки, что является следствием сплюснутой формы капель. В растянутых пленках при коэффициенте удлинения $\rho > 1.5$ ориентация биполярных осей во всем ансамбле капель практически совпадает с направлением деформации. Таким образом, для всего ансамбля капель выполнялось условие исходной ортогональности биполярных осей к направлению электрического поля, которое прикладывалось перпендикулярно плоскости композитной пленки.

Процесс трансформации текстурных картин капель НЖК при увеличении электрического поля можно условно разделить на три стадии. При малых значениях поля визуальнo никаких изменений внутри капель нематика не наблюдается. После достижения некоторого критического значения напряженности поля E_c начинается изменение яркости капель. В крупных каплях по мере увеличения поля яркость последовательно проходит через несколько минимумов и максимумов. При этом процесс не сопровождается образованием новых дефектов структуры, а полюса капель остаются неподвижными (жестко фиксированными). При величине поля E_D , превышающего примерно на порядок E_c , вблизи каждого из полюсов капли возникают новые дисклинации в виде кольцевых линий. Дальнейший рост поля приводит к увеличению площади колец, а затем к их резкому исчезновению и затемнению всей капли, что соответствует практически однородной ориентации директора перпендикулярно плоскости пленки. Изменяя фокусировку микроскопа можно увидеть, что в одной и той же капле линейные дефекты вблизи разных полюсов локализованы на различной глубине, причем разница соответствует поперечному размеру капли. Это дает основание предположить, что наблюдаемые линии – это линейные дисклинации, расположенные на верхней и нижней поверхностях капли, соответственно. Подтверждением локализации новых дефектов на поверхности является длительная, более суток релаксация структуры после выключения поля.

В разделе 3.3 представлены результаты расчета ориентационной структуры в биполярной капле нематика при условии жесткого сцепления молекул на границе раздела, и однородного поля, направленного перпендикулярно оси симметрии капли. Для этого использовалась стандартная процедура минимизации плотности свободной энергии, записанной в одноконстантном приближении:

$$F = \frac{1}{2} \int \{K[(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + (\operatorname{rot} \mathbf{n})^2] - \varepsilon_0 \Delta \varepsilon (\mathbf{nE})^2\} dV, \quad (6)$$

где \mathbf{n} – директор НЖК, \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля. На поверхности капли задавалась планарная ориентация директора биполярной конфигурации. Расчет показал, что при $E=0$ и во всем объеме капли реализуется биполярная конфигурация директора. При $E>0$ происходит изменение ориентации директора в тех областях капли, где вектора \mathbf{E} и \mathbf{n} не были ортогональны. При этом директор нематика в точках с исходной ориентацией $\mathbf{E} \perp \mathbf{n}$, сохраняет прежнее направление. Ситуация существенно изменяется для $E > E_c$ (рис. 2), где

$$E_c \cong 3.2 \frac{1}{R} \sqrt{\frac{K}{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon}}. \quad (7)$$

Директор в точках, расположенных на оси Z и в плоскости XOY , начинает поворачиваться. Линии директора в плоскости XOZ образуют характерный S-образный изгиб. Наиболее крутой изгиб директора имеет место в двух зонах

вблизи поверхности капли. В реальных условиях здесь возможно образование дополнительных дефектов, если это даст выгоду в энергетическом балансе, что, по-видимому, и наблюдается в эксперименте. Следует отметить, что значение поля E_c является критической величиной для всего объема капли. Для точек с исходной ортогональностью векторов \mathbf{E} и \mathbf{n} оно имеет смысл порогового поля, для остального объема капли проявляется резким изломом зависимости ориентации директора от величины поля.

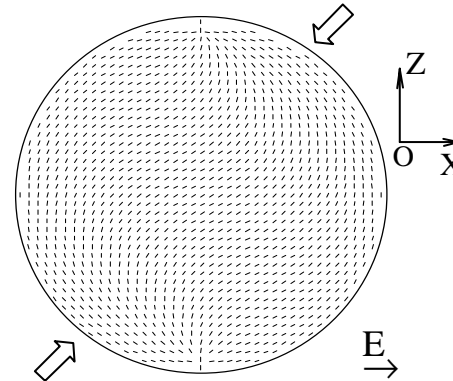


Рис. 2. Ориентационная структура биполярной капли нематика в плоскости XOZ при $E > E_c$. Ось Z совпадает с биполярной осью. Электрическое поле направлено вдоль оси X. При $E=0$ условие $\mathbf{n} \perp \mathbf{E}$ выполняется в точках, лежащих на оси Z и плоскости XOY. Стрелками показаны зоны с максимальным изгибом директора.

Таким образом, проведенный расчет показал двойственный характер переориентации биполярных капель нематика: пороговый в области, где исходная ориентация директора была ортогональна электрическому полю, и беспороговый для остального объема капли. Отсутствие видимых изменений текстурных картин капель в диапазоне поля $E < E_c$ при визуальном наблюдении объясняется недостаточной чувствительностью глаза к слабому изменению яркости капли.

В разделе 3.4 представлены результаты измерений вольт-контрастных характеристик исследуемых КПНЖК пленок в зависимости от размера капель, угла рассеяния света, длины волны излучения и толщины образцов. Для прямо проходящего через образец излучения зависимость светопропускания от приложенного напряжения имеют пороговый характер, а форма кривых сильно зависит от размера капель нематика. Для пленки с каплями размером 19 мкм в плоскости пленки (рис. 3) светопропускание после порога проходит последовательно минимум, максимум, минимум и лишь затем монотонно растет, выходя на насыщение. В случае капель размером 12 мкм наблюдается лишь два экстремума: слабовыраженный максимум и более глубокий минимум, а при размере капель менее 5 мкм зависимость приобретает классический S-образный вид. Сопоставление с данными визуальных наблюдений показало, что дополнительные дефекты в каплях НЖК возникают в диапазоне между последним минимумом и областью насыщения светопропускания, и, таким образом, не связаны с наблюдаемыми осцилляциями ВКХ.

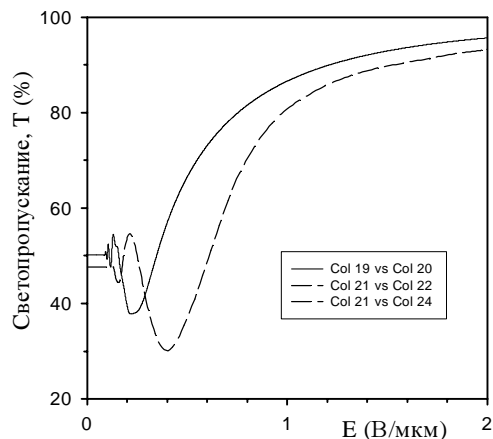


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная характеристики светопропускания композитной пленки с монослойным упорядочением капель нематика, имеющих максимальный размер 19 мкм в плоскости слоя.

Для получения информации о характере переориентации нематика в различных областях капли были проведены сравнительные измерения характеристик светопропускания КПНЖК пленки для прямо проходящего света и рассеянного под углом $\alpha \neq 0$ (рис. 4). Основной вклад в интенсивность прямо проходящего света I_t обусловлен лучами, траектория которых проходит по оси X через центр капле (рис. 2), а интенсивность рассеянного света I_s определяется лучами, проходящими через боковые области капле. Следовательно, согласно расчетам (раздел 3.3), предсказавшим двойственный характер переориентации НЖК в каплях, зависимости I_t и I_s от величины поля должны иметь пороговый и беспороговый вид, соответственно. Экспериментальные данные (рис. 4) подтверждают эти выводы. Как видно, кривая $I_s(E)$ беспороговая и тоже осциллирует в области малой величины приложенного поля. Важно отметить, что пороговый характер зависимости $I_t(E)$ исчезает при невыполнении условия ортогональности биполярной оси капле и действующего поля.

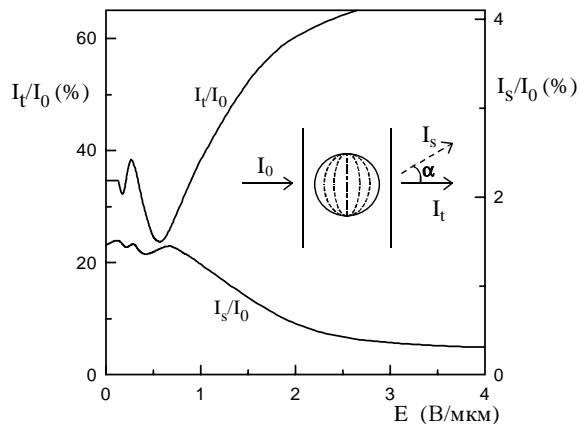


Рис. 4. Зависимость интенсивности прямо проходящего через образец излучения (I_t) и рассеянного под углом $\alpha \neq 0$ (I_s) от величины приложенного поля. На вставке показана геометрия эксперимента.

Здесь же было исследовано влияние длины волны света λ на осциллирующее поведение ВКХ. Были измерены характеристики светопропускания КПНЖК пленки для разных λ (458, 477, 488, 515 нм) излучения аргонового лазера. Значения порогового поля для всех зависимостей одинаковы. Положение экстремумов на кривых ВКХ при увеличении λ смещается в сторону меньшей величины поля. Кроме того, с ростом длины волны наблюдается уменьшение числа осцилляций.

Осцилляции ВКХ отчетливо проявляются лишь при монослойном упорядочении капель нематика, что убедительно показал следующий эксперимент. Было измерено пропускание света через систему трех последовательно расположенных монослойных КПНЖК пленок с крупными каплями в зависимости от общего для всех образцов напряжения. Данная характеристика имела лишь один слабовыраженный локальный минимум, в то время как кривые светопропускания каждого образца в отдельности были аналогичны ВКХ, представленной на рис. 3.

Таким образом, зависимости светопропускания от напряжения для КПНЖК пленок с крупными каплями имеют осциллирующий вид. Уменьшение размера капель нематика и их многослойное расположение приводит к классическому S-образному виду кривых ВКХ, который и наблюдался ранее во многих независимых работах. В результате исследований в разделе 3.6 показано, что осцилляции светопропускания КПНЖК пленок проявляются не только в статическом режиме, когда время развертки электрического поля значительно превосходит характерное время переориентации капель нематика, но и в динамическом режиме, например, в оптическом отклике на прямоугольный электрический сигнал, что необходимо учитывать при анализе динамических характеристик композитных сред.

Совокупность полученных экспериментальных данных позволила предположить интерференционный характер обнаруженных осцилляций, теоретическое обоснование которого проведено в разделе 3.5 в рамках приближения аномальной дифракции с использованием соотношений (3)-(5). Результаты расчета конфигурации директора (раздел 3.3) позволили определить зависимость оптического пути ($n_{1c} \cdot 2R$), пройденного светом в капле ЖК от величины поля. Далее была рассчитана характеристика пропускания для света, поляризованного параллельно ориентации КПНЖК пленки (рис. 3), на которой проявились такие же осцилляции, что и на экспериментальной кривой. Отсюда следует, что наблюдаемые осцилляции обусловлены интерференцией двух световых потоков, прошедших через капли НЖК и через полимерную матрицу между ними. При этом число интерференционных осцилляций определяется разностью фаз световых потоков (4), где величина $2R$ играет роль поперечного размера капель ЖК.

Из приведенного выше анализа также следует, что, варьируя параметры среды, можно не только минимизировать светопропускание при сдвиге фаз двух световых потоков на $\lambda/2$, но и уменьшить его до нуля, если эти световые потоки будут равны по величине. В разделе 3.8 представлены результаты

теоретического анализа и экспериментальных исследований эффекта интерференционного гашения света монослойной КПНЖК пленкой, проведенных совместно с Институтом физики НАН Беларуси. Теоретическая модель в рамках приближения аномальной дифракции, развитая белорусскими учеными [15] специально для случая однорядного расположения рассеивающих частиц, позволил определить параметры одноосно ориентированной КПНЖК пленки и величину приложенного поля, требуемые для реализации эффекта интерференционного гашения света. В эксперименте достигнут минимум светопропускания $T_{\min} = 0.78\%$, причем величина поля, ему соответствующая, совпадает с теоретически предсказанной. Неполное гашение света обусловлено рядом труднопреодолимых факторов, основные из которых – неидеальная одноосная ориентация капель ЖК и их монодисперсность. Эффект интерференционного гашения весьма чувствителен к величине угла сбора излучения, например, при увеличении апертуры от 0.1° до 2° T_{\min} вырастает с 0.78% до 7.4% .

В разделе 3.7 представлены результаты исследования влияния деформации одноосного растяжения КПНЖК пленок на их электрооптические свойства. Получены экспериментальные зависимости формы капель НЖК от параметра ее удлинения p . Измерены поляризованные компоненты ВКХ образцов для различной величины их деформации. В случае монослойных образцов с крупными каплями нематика при растяжении отмечается уменьшение числа осцилляций на кривых светопропускания, связанное с уменьшением поперечной оси капель, определяющей величину фазовой задержки света в НЖК. С растяжением КПНЖК пленки заметно увеличиваются пороговые параметры характеристик светопропускания – поле насыщения и пороговое поле. Измерена зависимость порогового поля E_c переориентации КПНЖК пленок с различным размером капель нематика от параметра их анизотрии $l=a/c$ (рис. 5).

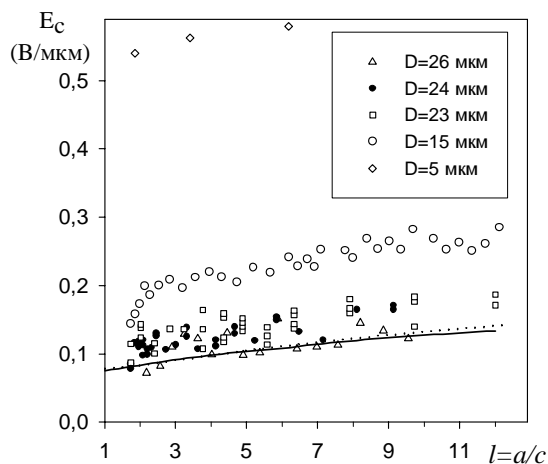


Рис. 5. Экспериментальные зависимости величины порогового поля для капель нематика различного размера $D = (6V/\pi)^{1/3}$ от параметра их анизотрии. Данные, полученные из расчетов конфигурации директора (раздел 3.3) для вытянутых капель размером $D = 24$ мкм, обозначены сплошной линией, а расчета по формуле (1) – пунктирной линией.

С использованием методики, описанной в разделе 3.3, проведен расчет зависимости порогового поля от анизотрии капель нематика (рис. 5), результаты которого хорошо согласуются с данными эксперимента. Показано, что для оперативной оценки величины E_c можно использовать формулу (1), если моделировать эллипсоидальную каплю нематика прямоугольной полостью равного объема с отношением между длинами ребер $d_x:d_y:d_z$ равным соотношению между главными осями эллипсоида $a:b:c$.

В заключение главы в разделе 3.9 приведены данные экспериментальных исследований стабильности характеристик светопропускания КПНЖК пленок при повышенной температуре. Показано, что для неориентированной пленки после выключения поля, действующего при высокой температуре, светопропускание не возвращается в исходное состояние. Наиболее вероятной причиной такого изменения оптических свойств является трансформация поверхности капли. Негативное влияние этого эффекта на характеристики светомодуляторов (резкое снижение контраста) практически исключается при использовании одноосно ориентированных КПНЖК пленок, структура которых, как показали исследования, более устойчива к воздействию поля при высоких температурах.

В четвертой главе диссертации проведены экспериментальные исследования особенностей электрооптических и структурных свойств одноосно ориентированных КПХЖК пленок. Были выявлены три области концентрации хиральной добавки ХЗ, соответствующие качественно различному проявлению электрооптических эффектов. При концентрации ХЗ меньшей 3% (раздел 4.1) зависимости поляризованных компонент светопропускания $T_{\perp}(E)$ и $T_{\parallel}(E)$ аналогичны случаю ахирального нематика (рис. 1). В вытянутых каплях ХЖК в отсутствие поля наблюдалась текстурная картина, характерная для закрученной биполярной конфигурации директора с полюсами, лежащими на концах длинной оси капли.

В разделе 4.2 показано, что при средней концентрации ХЗ (от 5 до 15%) происходит качественное изменение характеристик светопропускания (рис. 6). Без поля обе компоненты поляризованного света интенсивно рассеиваются. Напряжение до 20В не вызывает заметных изменений светопропускания. При увеличении поля до $U > 20В$ $T_{\perp}(E)$ начинает быстро расти и выходит на насыщение при $U \approx 70В$. А компонента $T_{\parallel}(E)$ при этом напряжении только начинает увеличиваться. Затем следует быстрый рост и выход на насыщение (при $U > 350В$) и параллельной компоненты. При большом напряжении, выходя на насыщение, обе кривые, как и в случае КПНЖК пленок, сближаются. Зависимость $Lg(T_{\perp}/T_{\parallel})$ данной пленки от напряжения (рис. 6) имеет максимум при $U \approx 50В$, где отношение компонент достигает значения $T_{\perp}/T_{\parallel} = 120$.

Текстурные исследования недеформированных образцов со средней концентрацией холестерика показали, что в каплях ЖК наблюдается классическая сферулитная текстура концентрических окружностей с

радиальной дисклинацией. Ось холестерической спирали в объеме капли перпендикулярна ее поверхности и направлена со всех сторон по радиусу к центру. После одноосной деформации образца и удлинения капель концентрические линии внутри них трансформируются в эллипсы. Ось спирали остается перпендикулярной поверхности капли.

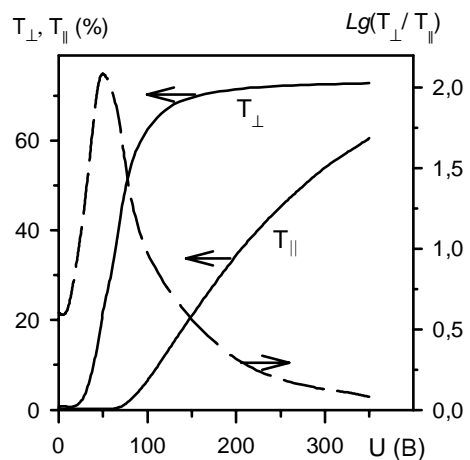


Рис. 6. Характеристики светопропускания одноосно ориентированной КПХЖК пленки. Концентрация хиральной добавки 5%. Толщина образца 45 мкм, анизотропия капель $a/b = 2$.

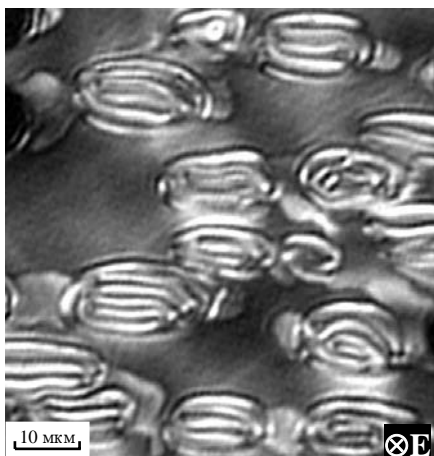


Рис. 7. Ансамбль капель холестерика в одноосно ориентированной композитной пленке под действием электрического поля. Концентрация хиральной добавки 5%. Поляризаторы скрещены.

В электрическом поле сферулитная структура трансформируется в текстуру “отпечатков пальцев” (рис. 7). Ось спирали в данном случае лежит в плоскости пленки перпендикулярно длинной оси капель. Увеличение поля приводит к раскручиванию холестерической спирали и переходу “холестерик - нематик” во всем ансамбле капель. Такая переориентация капель объясняет особенности электрооптического отклика композитной пленки. Наблюдение особенности электрооптического отклика композитной пленки. Наблюдение капель в геометрии с одним поляризатором показали, что в отсутствие поля оптические неоднородности на границе капли и ее внутренней структуре отчетливо видны для света любой поляризации, что и соответствует интенсивному рассеянию обеих компонент света при $U=0$ (рис. 6). В случае промежуточной ориентационной структуры (рис. 7) оптические неоднородности резко проявляются лишь для параллельно поляризованной компоненты. Такая ситуация соответствует большой анизотропии светорассеяния композитной пленки при $U \approx 70$ В (рис. 6). Полная раскрутка спирали приводит к оптической однородности в объеме капли и на ее границе, вследствие чего пленка переходит в прозрачное состояние для света любой

поляризации (рис. 6 при $U > 350\text{В}$). В практических приложениях такие пленки могут быть использованы для поляризационно-селективной модуляции света.

При концентрации хиральной добавки более 20% (раздел 4.3) в КПХЖК пленках наблюдается инверсия анизотропии светопропускания в отсутствие поля: перпендикулярно поляризованная компонента рассеивается интенсивнее параллельной (рис. 8), вследствие чего параметр $Lg(T_{\perp}/T_{\parallel})$ отрицателен при $U=0$. Увеличение напряжения переводит КПХЖК пленку сначала в состояние с обычной анизотропией ($U \approx 80\text{В}$), при которой $Lg(T_{\perp}/T_{\parallel}) > 0$, а затем в одинаково прозрачное для обеих компонент состояние ($U > 170\text{В}$).

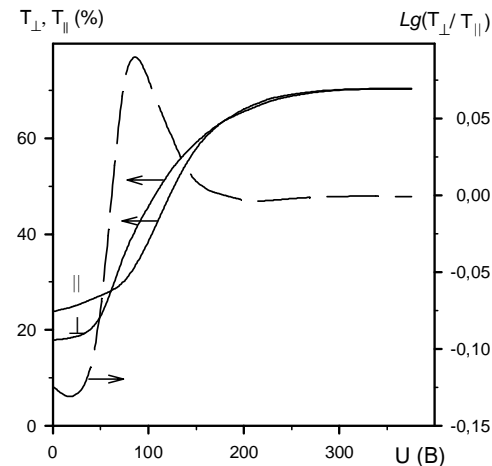


Рис. 8. Характеристики светопропускания одноосно ориентированной КПХЖК пленки. Концентрация хиральной добавки 22%. Толщина образца 10 мкм, анизометрия капель $a/b = 2$.

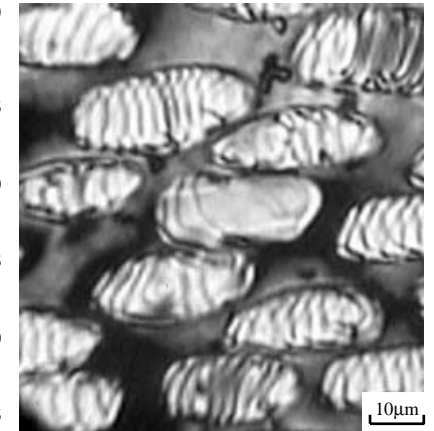


Рис. 9. Текстура капель ХЖК с высокой концентрацией (более 20%) хиральной добавки ХЗ в одноосно ориентированной композитной пленке без поля.

Такие капли в недеформированном образце без поля имеют текстуру “отпечатков пальцев”. После одноосной деформации образца оси спиральных структур во всем ансамбле капель ЖК выстраиваются вдоль направления ориентации пленки и совпадают с длинными осями капель (рис. 9). Наблюдения в геометрии с одним поляризатором показали, что в отсутствие электрического поля оптические неоднородности на границе капли проявляются контрастнее для перпендикулярной компоненты света. Этому соответствует инверсия анизотропии светопропускания композитной пленки при $U=0$ (рис. 8). Включение электрического поля сопровождается раскручиванием холестерической спирали и поворотом ее оси в плоскости пленки. Когда параметр $Lg(T_{\perp}/T_{\parallel})$ достигает максимума (рис. 8, $U \approx 80\text{В}$), для параллельной компоненты света видна лишь одна полоса холестерической структуры, вытянутая вдоль длинной оси капли. Для перпендикулярной

компоненты при этом оптические неоднородности внутри капли не проявляются. При $U > 170\text{В}$ спиральная структура в каплях раскручена полностью. В прикладном аспекте данные пленки интересны возможностью создания на их основе анизотропно рассеивающего поляризатора света с возможностью азимутального поворота плоскости поляризации на угол 90° при воздействии электрического поля (переключением U между 20В и 80В , рис. 8).

В пятой главе диссертации представлены результаты исследований электро- и термооптической бистабильности в КПХЖК пленках. Для композитных пленок также, как и для монослоев холестериков характерен гистерезис зависимости светопропускания от приложенного напряжения (рис. 10). В разделе 5.1 приведены зависимости параметров гистерезиса ВКХ в КПХЖК пленках от концентрации хиральной добавки, размера и формы капель холестерика, максимального напряжения и скорости записи ВКХ. Величину гистерезиса обычно оценивают отношением напряжения для прямой и обратной ветви $U\uparrow/U\downarrow$ на определенном уровне светопропускания. Показано, что величина гистерезиса достигает максимума при определенном соотношении шага спирали и размера ХЖК капель, которое можно оценить из теоретической модели [7], используя в качестве размерного параметра радиус капли. Деформация сферических капель в эллипсоидальные приводит к резкому уменьшению значения $U\uparrow/U\downarrow$.

В разделе 5.2 подробно рассматриваются температурные зависимости параметров гистерезиса (рис. 10). Акцентируется внимание на два важных обстоятельства: во-первых, значение поля $U_{0,1}\uparrow$ для ВКХ прямого хода при комнатной температуре превышает поле насыщения, соответствующее температуре вблизи фазового перехода холестерика в изотропную жидкость:

$$U_{0,1}\uparrow (\Delta T = 10^\circ\text{C}) > U_{0,9}\uparrow (\Delta T = 0.4^\circ\text{C}) ; \quad (8)$$

во-вторых, увеличение значения $U_{0,1}\downarrow$ электрического поля при нагреве приводит к неравенству

$$U_{0,4}\downarrow (\Delta T = 10^\circ\text{C}) \leq U_{0,1}\downarrow (\Delta T = 1.8^\circ\text{C}) ; \quad (9)$$

Соотношение (8) дает возможность использовать нагрев образца для переключения КПХЖК пленки из светорассеивающего состояния в прозрачное (нормальная рассеивающая мода). Данный эффект по сути является электро-термооптическим, так как для его реализации требуется воздействие электрического поля (рис. 11). Подробно исследованы особенности эффекта, подобраны оптимальные условия для достижения максимального контраста переключаемых уровней оптического пропускания. Кроме этого, особенность трансформации гистерезиса, описываемая соотношением (9), позволила аналогичным образом реализовать переключение КПХЖК пленки из прозрачного состояния в рассеивающее (инверсная рассеивающая мода).

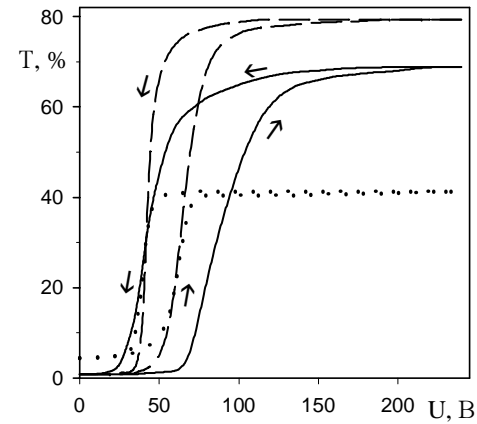


Рис. 10. ВКХ КПХЖК пленки для относительных температур $\Delta T = T_c - T = 10.9^\circ\text{C}$ (сплошные линии), $\Delta T = 1.8^\circ\text{C}$ (штриховые линии), $\Delta T = 0.4^\circ\text{C}$ (пунктирные линии).

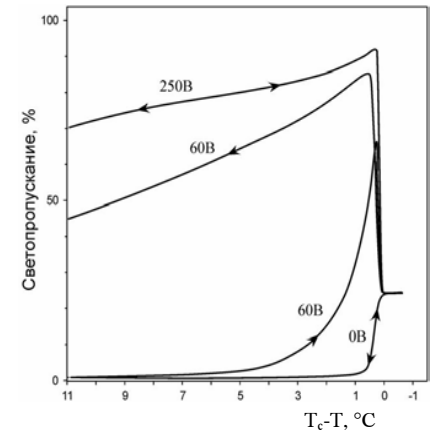


Рис. 11. Температурный гистерезис светопропускания КПХЖК пленки при напряжении 60 В в условиях нормальной рассеивающей моды.

В разделе 5.3 описаны способы использования КПХЖК пленок для лазерно адресуемой реверсивной записи информации в нормальной и инверсной рассеивающих модах. Реверсивность записи информации обеспечивается возможностью ее стирания переключением напряжения (выключением поля для нормальной рассеивающей моды, и увеличением поля до области насыщения для инверсной моды). В экспериментах использована КПХЖК пленка, легированная молекулярным красителем, с максимумом поглощения на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 0.53 \text{ мкм}$, соответствующей излучению аргонового лазера. На рис. 12 показаны осциллограммы процесса записи и стирания информации для последовательности лазерных импульсов различной длительности. Контраст переключаемых оптических состояний может варьироваться не только длительностью, но и мощностью лазерных импульсов. Быстродействие процесса записи увеличивается при фокусировки лазерного луча.

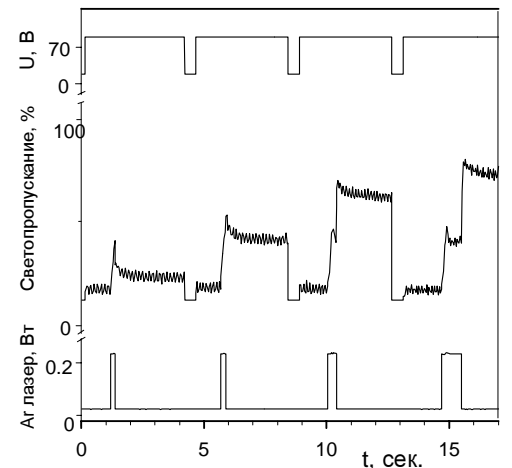
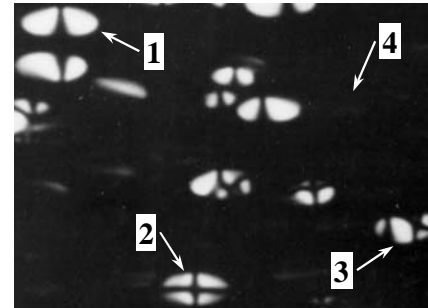


Рис. 12. Осциллограммы записи /стирания информации в КПХЖК пленке в нормальной рассеивающей моде.

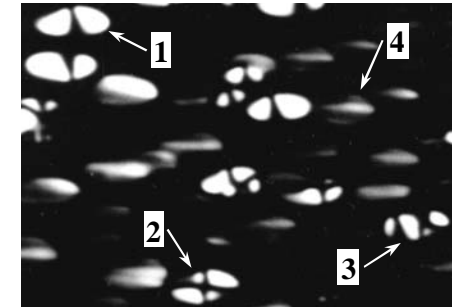
В шестой главе представлены результаты исследований нового электрооптического материала, созданного на основе одноосно ориентированных КПСЭЖК пленок. В разделе 6.1 описываются требования к структурной организации ансамбля сегнетоэлектрических капель в композитных пленках, которая необходима для использования их в качестве электрооптических материалов. Представлена принципиальная схема модуляции света одноосно ориентированными КПСЭЖК пленками на основе эффекта регулируемого светорассеяния. Отмечается также, что возможен другой способ модуляции излучения [16], основанный на геометрии скрещенных поляризаторов, где композитная пленка выполняет роль фазовой пластины, аналогично монослою СЭЖК в ячейке Кларка-Лагервола.

Раздел 6.2 посвящен изучению текстурных картин, наблюдаемых с использованием поляризационного микроскопа в СЭЖК каплях, и соответствующих им ориентационных структур. Показано, что существует два основных типа структурного упорядочения смектических слоев в СЭЖК каплях, диспергированных в полимерных матрицах с планарным сцеплением: концентрическое расположение слоев вокруг точечных дефектов, аналогичное структуре фокально конических доменов, и структура с волнообразной деформацией смектических слоев. На рис. 13 показаны типичные текстурные картины КПСЭЖК пленки, приготовленной на основе СЭЖК смеси с шагом геликоида равным 0.4 мкм. Для света с длиной волны большей шага спирали СЭЖК выглядит как макроскопически одноосная анизотропная среда с оптической осью, направленной вдоль оси геликоида (нормали к смектическим слоям). Исследование в геометрии скрещенных поляризаторов конфигурации полос погасания, которые отображают области локальной ориентации оптической оси вдоль или ортогонально поляризатору, позволяют идентифицировать ориентационную структуру смектических капель. Первый тип текстуры в самом простом варианте можно увидеть в капле 1 на рис. 13. Виден точечный дефект, локализованный на верхней границе капли. Особенно четко дефект проявляется в виде темного пятна при наблюдении в геометрии с одним поляризатором. В геометрии скрещенных поляризаторов из дефекта исходит, расширяясь, линия погасания. Направление линии погасания внутри капли совпадает с осью поляризатора и меняется при повороте образца, оставаясь ориентированной радиально по отношению к точечному дефекту. При ориентации длинных осей капли под углом 45° к скрещенным поляризаторам (рис. 13в) отчетливо видны одновременно две взаимно перпендикулярные линии погасания. В геометрии с одним поляризатором, если плоскость поляризации света перпендикулярна длинной оси капли, граница раздела вблизи точечного дефекта практически не видна, зато отчетливо видна противоположная граница. Если плоскость поляризации света параллельна длинной оси капли, наблюдается обратная ситуация. При выполнении соотношения (2) это означает, что оптическая ось СЭЖК вблизи точечного дефекта ориентирована на границе раздела тангенциально и лежит в плоскости пленки. На противоположной стороне капли оптическая ось

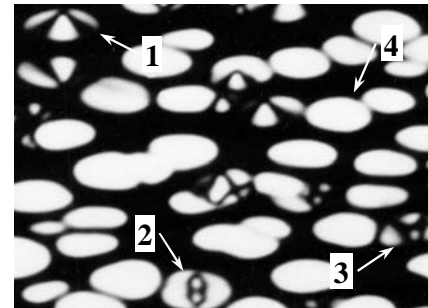
ориентирована перпендикулярно границе раздела. Более сложные текстурные картины наблюдаются, когда в капле одновременно сосуществуют два (капля 2 на рис. 13) и более (капля 3 на рис. 13) фокально конических доменов.



а) длинные оси капель параллельны поляризатору



б) образец повернут на 10° относительно а)



в) образец повернут на 45° относительно а)

Рис. 13. Микрофотографии КПСЭЖК пленки с ЖКС-309С в скрещенных поляризаторах. 1 – капля ЖК с одним фокально коническим доменом; 2 – капля с двумя фокально коническими доменами, вершины которых расположены на концах короткой оси; 3 – капля с четырьмя доменами; 4 – капля с текстурой параллельных линий.

Для второго типа капель СЭЖК при ориентации их длинных осей вдоль или поперек направления поляризатора наблюдается практически полное затемнение всей капли (капля 4, рис. 13). При этом, внутри капли едва различимы две (рис. 13) и более в зависимости от размера капли, параллельные темные линии, направленные вдоль, а чаще под небольшим углом к длинной оси. Поворачивая образец, можно увидеть, что параллельные линии расходятся или попарно сближаются друг с другом в зависимости от направления поворота. Поворот на 45° приводит к максимальному просветлению всех капель данного типа (капля 4, рис. 13в). Точечные дефекты в таких каплях отсутствуют. Анализ наблюдений в геометрии с одним поляризатором показывает, что оптическая ось вблизи границы ориентирована преимущественно вдоль длинной оси капли, что проявляется в сильном светорассеянии на границе, если длинная ось капли совпадает с плоскостью поляризации света, либо в оптической однородности на границе, если длинная ось капли ортогональна поляризации света.

Для изучения конфигурации смектических слоев особенно информативными оказались текстурные картины сегнетоэлектрической смеси ЖКС-285 с шагом геликоида $p_0 = 0.6$ мкм, разработанной Пожидаевым и др. в ФИ РАН им. П.Н. Лебедева, в каплях которой образуются линейные дисклинации параллельные смектическим слоям (рис. 14а,б). Здесь видно, что в структурах первого типа смектические слои расположены в виде концентрических поверхностей вокруг точечного дефекта, как это схематически представлено на рис. 14в. В капельных структурах второго типа смектические слои преимущественно перпендикулярны плоскости КПСЭЖК пленки и длинной оси капли, при этом реализуется волнообразная деформация слоев, как показано на рис. 14г. Использование СЭЖК с большим шагом геликоида для изучения структурного упорядочения смектических слоев менее удобно, поскольку в этом случае наблюдается текстура, определяемая локальным упорядочением директора, которая гораздо более сложна для интерпретации.

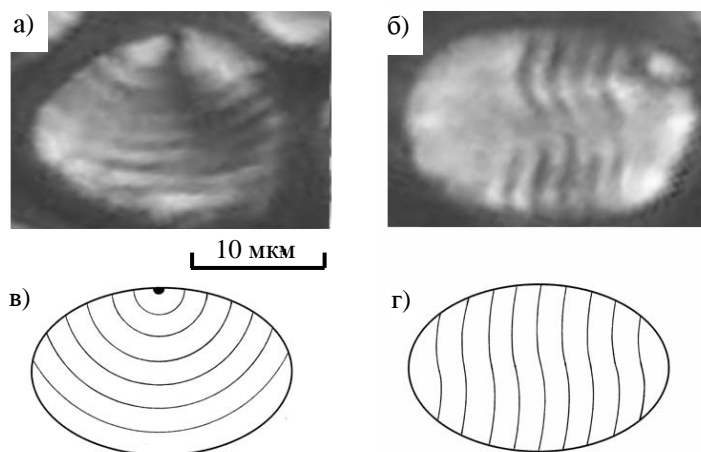


Рис. 14. Микрофотографии капель сегнетоэлектрического смектика ЖКС-285 с дисклинациями: а) в виде концентрических дугообразных линий, центром которых является точечный дефект; и б) имеющими вид волнообразно изогнутых линий, проходящих поперек длинной оси капель. Ниже, в) и г), показано соответствующее упорядочение смектических слоев внутри капель.

Из всего разнообразия реализуемых внутри капель СЭЖК ориентационных структур только капельные ансамбли со структурой волнообразно изогнутых смектических слоев позволяют получить хорошие светотехнические характеристики (контраст, яркость, большую анизотропию и амплитуду модуляции светопропускания) электрооптических устройств, основанных как на эффекте управляемого светорассеяния, так и на эффекте управляемой фазовой задержки.

В разделе 6.3 представлены результаты исследования электрооптических свойств одноосно ориентированных КПСЭЖК пленок. Показано, что КПСЭЖК пленки являются эффективными светополяризующими материалами, причем анизотропия светопропускания практически неизменна в температурном диапазоне Смс* и СМА* фаз. Экспериментальные измерения и теоретический анализ показали, что зависимость амплитуды модуляции излучения от температуры определяются в основном температурной зависимостью молекулярного угла наклона θ . Измерены вольт-амплитудные характеристики КПСЭЖК пленок для разных температур в Смс* и СМА* фазе. Приведена температурная зависимость поля насыщения. Исследованы динамические характеристики КПСЭЖК пленок. На примере СЭЖК ДОБАМБЦ показано, что время реакции, нормированное на величину приложенного поля, в композитных пленках незначительно отличается от той же характеристики для монослоев. Время релаксации τ_{off} в КПСЭЖК пленках на основе ДОБАМБЦ сравнимо по величине с временем реакции τ_{on} и значительно меньше времени релаксации для монослоев ДОБАМБЦ. Измерения выявили немонотонную зависимость τ_{off} от температуры, которая объясняется в рамках теории, развитой для монослоев СЭЖК. Исследован эффект электрооптической бистабильности. Обнаружено, что после электрического импульса запоминается не то оптическое состояние, которое ему соответствует, а противоположное. Такая инверсная бистабильность может быть обусловлена присутствием ионов в СЭЖК. Пространственно разделенный заряд ионов после выключения электрического импульса переориентирует каплю СЭЖК в противоположное состояние. Отмечается, что бистабильность реализуется лишь для СЭЖК, шаг спирали которых превышает размер капли. При этом, после выключения электрического импульса наблюдается частичная релаксация оптического отклика.

В разделе 6.4 описываются различные способы модуляции света с использованием одноосно ориентированных КПСЭЖК пленок. Предложена и реализована конструкция однополяридного модулятора оптического излучения на основе эффекта светорассеяния (рис. 15). Устройство состоит из двух подложек с прозрачными электродами на внутренних сторонах, размещенной между ними КПСЭЖК пленки, и одного поляризатора с внешней стороны сэндвича. В таком варианте КПСЭЖК пленка работает как поляризатор на основе анизотропии светорассеяния с возможностью поворота направления поляризации на угол 2θ в плоскости сэндвича посредством переключения полярности электрического поля. Если угол α между плоскостью поляризации света и осью X равен углу θ (рис. 15a), то свет интенсивно рассеивается композитной пленкой вследствие большого градиента показателя преломления на границе капле СЭЖК. Если угол наклона молекул $\theta = 45^\circ$, то для поля другой полярности (рис. 15b) директор будет перпендикулярен плоскости поляризации света и при выполнении условия (2) излучение проходит через пленку практически не рассеиваясь.

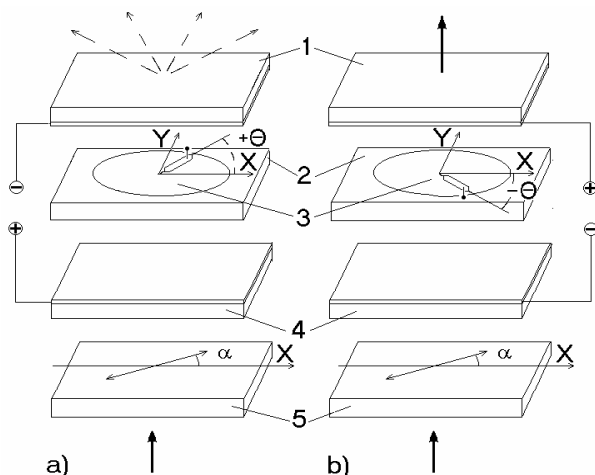


Рис. 15. Конструкция и принцип работы однополяроидного КПСЭЖК модулятора света. 1, 4 – подложки с прозрачными электродами, 2 – полимерная матрица, 3 – капля СЭЖК, 5 – поляризатор.

Однако СЭЖК с таким значением угла θ являются экзотикой. На рынке широко распространены СЭЖК смеси, оптимизированные по совокупности физико-химических характеристик, но имеющие угол θ вблизи 22.5° , поскольку именно такой угол наклона является оптимальным для ячеек Кларка-Лагервола. Это потребовало проведения теоретического анализа и экспериментальных исследований влияния геометрии ячейки, угла наклона молекул и макроскопической оптической анизотропии композитной пленки на светомодуляционные характеристики: контрастность, максимальное светопропускание и глубину модуляции в однополяроидных КПСЭЖК ячейках. Получены выражения для расчета вышеперечисленных характеристик. Максимальное светопропускание:

$$T_1 = T_{\perp} \left[1 + \left(\frac{T_{\parallel}}{T_{\perp}} - 1 \right) \cos^2(\alpha + \theta) \right], \quad (10)$$

где $T_{\parallel, \perp}$ - поляризованные компоненты светопропускания КПСЭЖК пленки, ориентированной полем. Отсюда следует, что T_1 достигает максимального значения, равного T_{\perp} , если $\alpha + \theta = 90^\circ$, то есть, при $\alpha = 90^\circ - \theta$.

Амплитуда модуляции светопропускания:

$$\Delta T = (T_{\perp} - T_{\parallel}) \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin 2\theta. \quad (11)$$

Положение максимума на кривой $\Delta T(\alpha)$ не зависит от величины угла θ и наблюдается при $\alpha = 45^\circ$. Отсюда также видно, что ΔT будет максимально при $\theta = 45^\circ$. Кроме того, из (11) следует, что при отсутствии оптической анизотропии КПСЭЖК пленки ($T_{\parallel} / T_{\perp} = 1$) $\Delta T = 0$, т.е., модуляция излучения, обусловленная исследуемым эффектом будет невозможна.

Более сложная функциональная зависимость от угловых и материальных параметров наблюдается для контрастности:

$$C = \frac{T_{\perp} \sin^2(\alpha + \theta) + T_{\parallel} \cos^2(\alpha + \theta)}{T_{\perp} \sin^2(\alpha - \theta) + T_{\parallel} \cos^2(\alpha - \theta)}, \quad (12)$$

которая достигает максимума при:

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \arccos\left(\frac{T_{\perp} - T_{\parallel}}{T_{\perp} + T_{\parallel}} \cos 2\theta\right). \quad (13)$$

Необходимо обратить внимание, что угол α_m в (13) зависит не только от угла наклона молекул θ , но и от анизотропии светопропускания образца. Сопоставление результатов расчета светомодулирующих характеристик с экспериментальными данными (рис. 16) показало их хорошее согласие.

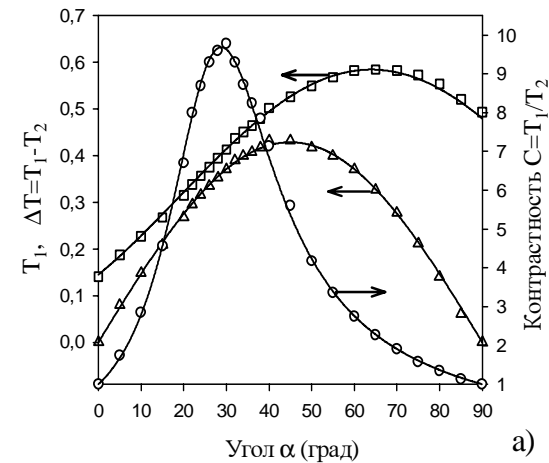


Рис. 16. Экспериментальные зависимости контрастности C (\circ), максимального светопропускания T_{\perp} (\square) и амплитуды модуляции света ΔT (\triangle) от угла α , полученные для КПСЭЖК пленки с оптической анизотропией: $T_{\parallel}/T_{\perp} = 0.069$, при $T_{\perp} = 0.58$. Расчетные кривые по формулам (10)-(12) для этих параметров показаны сплошными линиями.

Как видно, вышеперечисленные характеристики однополяридного КПСЭЖК устройства в общем случае достигают максимума при различных значениях угла α , причем положения максимумов для контраста и максимального светопропускания зависят от величины угла θ . Положения максимумов сближаются при увеличении угла θ и совпадают, если $\theta = 45^\circ$. Анализ соотношений (6.3)-(6.10) позволяет оценить диапазон вариации значений соответствующих параметров и возможности их оптимизации посредством изменения относительной ориентации поляризатора и КПСЭЖК пленки.

В работе также предложена и реализована бесполяридная схема модуляции света на основе двойной КПСЭЖК ячейки. Для нее проведен аналогичный анализ и получены выражения для расчета светомодулирующих характеристик. Достоинством данного способа является использование СЭЖК с $\theta = 22.5^\circ$. Кроме того, разработан бесполяридный модулятор на основе бислойной КПСЭЖК пленки, а также бесполяридный модулятор с использованием жидкокристаллического полимера в качестве матрицы.

Основные результаты и выводы

1. Разработан способ изготовления одноосно ориентированных композитных пленок посредством диспергирования ЖК в фотоотверждаемой полимерной матрице, в которой под действием плоско поляризованного излучения, инициирующего процесс полимеризации, происходит частичное одноосное упорядочение макромолекул.
2. Разработано специальное оборудование и методики экспериментальных исследований структурных и электрооптических свойств одноосно ориентированных КПЖК пленок, а также метод компьютерного моделирования конфигурации директора в биполярных каплях нематика с жестко фиксированными полюсами.
3. Теоретически и экспериментально исследованы особенности перехода Фредерикса в биполярных каплях нематика с жестко фиксированными полюсами в электрическом поле, направленном ортогонально исходной оси симметрии капель. Предсказан и экспериментально подтвержден двойственный характер переориентации таких капель: пороговый в области, где исходная ориентация директора ортогональна полю, и беспороговый для остального объема капли.
4. Проведен компьютерный расчет величины порогового поля Фредерикса в биполярных каплях нематика с жестко фиксированными полюсами в зависимости от их анизотропии. Экспериментально измеренная зависимость указанных характеристик для композитных пленок с каплями нематика разных размеров согласуется в пределах погрешности измерений с результатом расчетов.
5. Проведены комплексные исследования характеристик светопропускания одноосно ориентированных КПНЖК пленок в зависимости от приложенного электрического поля, размеров капель нематика, длины волны излучения, толщины образцов. Обнаружены и исследованы интерференционные осцилляции зависимости интенсивности прямо проходящего излучения от напряжения. Изучены особенности эффекта интерференционного гашения света в монослойных КПНЖК пленках под действием электрического поля. Разработаны монослойные КПЖК пленки с интерференционным усилением контраста, оптимизированы их структурные и оптические параметры. Исследовано проявление интерференционных осцилляций в динамике электрооптического отклика.
6. Экспериментально исследованы ориентационная структура капель и электрооптический отклик в одноосно ориентированных КПХЖК пленках. При концентрации хиральной добавки менее 3% образуется закрученная биполярная конфигурация директора. При концентрации от 5% до 15% в каплях образуется сферулитная структура, которая сохраняется и после одноосной деформации пленки. Переориентация таких капель в электрическом поле проходит через промежуточную структуру с осью спирали, лежащей в плоскости пленки перпендикулярно длинной оси капель. Это приводит к расщеплению пороговых параметров

поляризованных компонент светопропускания пленок, вследствие чего в зависимости от величины приложенного поля пленки могут находиться в трех оптических состояниях: рассеивать свет любой поляризации, рассеивать только одну плоскополяризованную компоненту света, быть прозрачными для света любой поляризации. При концентрации хиральной добавки более 20% спираль своей осью направлена вдоль длинной оси эллипсоида капли в исходном состоянии, а под действием поля, раскручиваясь, поворачивается перпендикулярно длиной оси капли. Вследствие этого в отсутствие поля компонента света, поляризованная параллельно ориентации пленки превышает перпендикулярную, при промежуточном значении поля ситуация меняется на обратную, а в области насыщения величина обеих компонент выравнивается. Таким образом, одноосно ориентированные КПХЖК пленки перспективны для использования в поляризационно-селективных модуляторах света.

7. Исследована зависимость параметров гистерезиса вольт-контрастной характеристики в КПХЖК пленках от концентрации хиральной добавки, размера и формы капель холестерика, максимального напряжения, скорости записи и температуры. Обнаружен и исследован эффект электро-термооптической бистабильности в КПХЖК пленках. Показана возможность использования данного эффекта для термооптической, реверсивной записи информации. Разработан метод лазерно-адресуемой записи информации в бистабильных КПХЖК пленках, легированных красителем, в нормальной и инверсной рассеивающих модах.
8. Впервые изготовлен электрооптический материал на основе одноосно ориентированных КПСЭЖК пленок, имеющий рекордное быстродействие среди композитных ЖК материалов. Изучены особенности текстурных картин и идентифицированы основные типы ориентационных структур в СЭЖК каплях. Показано, что в каплях могут реализоваться разнообразные структуры с одним, двумя и более фокально коническими доменами. Такие структуры не позволяют получить КПСЭЖК материал с большой макроскопической оптической анизотропией и хорошими светомодулирующими свойствами. Наиболее подходящим для электрооптических устройств является структурное упорядочение СЭЖК капель с волнообразной деформацией смектических слоев.
9. Исследована температурная зависимость анизотропии светопропускания одноосно ориентированных КПСЭЖК пленок, показано, что поляризующая способность сохраняется в температурном диапазоне смектических С* и А* фаз. Пленки эффективно модулируют световое излучение в СмС* и А* фазах, однако в СмА* фазе амплитуда модуляции резко уменьшается с ростом температуры, что согласуется с теоретическими оценками и экспериментальными данными для монослоев чистых СЭЖК. Зависимость амплитуды модуляции света от величины приложенного напряжения имеет беспороговый характер. Поле насыщения может быть снижено до 25÷30 В. Время релаксации зависит от шага спирали, достигая больших значений

для СЭЖК смесей с раскрученным геликоидом, что дает возможность реализовать электрооптическую бистабильность в КПСЭЖК пленках.

10. Предложены и апробированы различные конструкции модуляторов оптического излучения на основе эффекта светорассеяния в одноосно ориентированных КПСЭЖК пленках: однополяроидный модулятор, бесполяроидный модулятор на основе двойной КПСЭЖК ячейки, бесполяроидный модулятор на основе бислоистой КПСЭЖК пленки, бесполяроидный модулятор с использованием жидкокристаллического полимера в качестве матрицы. Получены соотношения, связывающие светомодулирующие характеристики (контраст, амплитуду модуляции и максимальное светопропускание) с углом относительной ориентации КПСЭЖК пленок, молекулярным углом наклона θ и макроскопической оптической анизотропией пленки. Проведен анализ возможностей оптимизации материальных параметров и конструкции КПСЭЖК модуляторов света, корректность выводов которого подтверждена согласием с экспериментальными данными.

Цитируемая литература

1. Graighead H.G., Cheng J., Hackwood S. New display based on electrically induced index matching in an inhomogeneous medium // *Appl. Phys. Lett.* – 1982. – V. 40, No1. – P. 22–24.
2. Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты. – Новосибирск: Наука, 1994. – 214 с.
3. Сонин А.С., Шибасв И.Н. Структурная упорядоченность и свойства холестерических псевдокапсулированных пленок // *Журн. физ. химии.* – 1981. – Т. 55, №5. – С. 1263–1268.
4. Pat. 4.685.771 US, МКИ G02F 1/13. Liquid crystal display material comprising a liquid crystal dispersion in a thermoplastic resin / J.L. West, J.W. Doane, S. Zumer. – Publ. 11.08.87.
5. Margerum J.D., Lackner A.M., Ramos E, Lim K.-C., Smith W.H. Effects off-state alignment in PDLCs // *Liq. Cryst.* – 1989. – V. 5, No5. –P. 1477–1487.
6. Kilian A. New Friedericksz thresholds in three dimensions // *Phys. Rev. E.* – 1994. –V. 50, No 5. – P. 3774–3783.
7. Greubel W. Bistability behavior of texture in cholesteric liquid crystal in an electric field // *Appl. Phys. Lett.* – 1974. – V. 25. – P. 5–7.
8. Ковальчук А.В., Курик М.В., Лаврентович О.Д., Серган В.В. Структурные превращения в каплях нематика во внешнем электрическом поле // *ЖЭТФ.* –1988. –Т. 94, №5. – С. 350–364.
9. Shimada E., Uchida T. Control of polymer dispersed liquid crystal (PDLC) // *Jpn. J. Appl. Phys.* –1992. –V. 31, Part. 2, No3B. – P. L352–L354.
10. Казначеев А.В., Носов Г.Б., Сонин А.С. Электрооптика ЖК-композитов на основе полиметакрилатов // *Оптич. журнал* – 1993. – №7. – С. 29–32.
11. Zumer S. Light scattering from nematic droplets: Anomalous-diffraction

- approach // Phys. Rev A. – 1988. – V. 37, No10. – P. 4006–4015.
12. Drzaic P.S., Muller A. Droplet shape and reorientation fields in nematic droplet/polymer films // Liq. Cryst. – 1989. – V. 5, No5. – P. 1467–1475.
 13. Jain S.C. and Kitzerow H.-S. Bulk-induced alignment of nematic liquid crystals by photopolymerization // Appl. Phys. Lett., 1994, V. 64(22), P. 2946–2948.
 14. Афонин О.А., Яковлев Д.А. Поляризация света ориентированными пленками ДПНЖК // ЖТФ. – 1993. – Т. 63, №8. – С. 46–55.
 15. Иванов А.П., Лойко В.А., Дик В.П. Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах.- Минск: Наука и техн. 1988.- 191с.
 16. Kitzerow H.-S., Molsen H., Herrpke G. Linear electro-optic effects in polymer-dispersed ferroelectric liquid crystals // Appl. Phys. Lett. – 1992. – V. 60 (25). – P. 3093–3095.

Основные публикации по теме диссертации

1. Аверьянов Е.М., Зырянов В.Я., Жуйков В.А., Руолене Ю.И. Конформация и эффективная поляризуемость мезогенных молекул 4-н-алкил-4'-цианобифенилов // ЖСХ. – 1983. - Т. 24, № 5. - С. 101-107.
2. Аверьянов Е.М., Жуйков В.А., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Анизотропия локального поля в одноосных жидких кристаллах // ЖЭТФ. – 1984. - Т. 86, Вып. 6. - С. 2111-2122.
3. Зырянов В.Я., Эпштейн В.Ш. Измерение показателей преломления жидкого кристалла с использованием перестраиваемого источника когерентного инфракрасного излучения // ПТЭ. – 1987. - № 2. - С. 164-166.
4. Аверьянов Е.М., Зырянов В.Я., Адоменас П.В., Быкова В.В. Исследование особенностей локального поля в одноосных жидких кристаллах методом рефрактометрии // Опт. и спектр. – 1988. - Т. 64, Вып. 3. - С. 544-552.
5. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Шабанов В.Ф. Поляризация света ориентированными пленками капсулированных полимером жидких кристаллов. – Красноярск: ИФ, 1990. –17 с. – (Препринт ИФ СО АН СССР №639Ф).
6. Зырянов В.Я., Жуйков В.А., Сморгон С.Л. Оптический затвор // ПТЭ. – 1991. - № 1. - С. 240.
7. Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф., Сморгон С. Л. Модуляция света ориентированной дисперсией сегнетоэлектрических жидких кристаллов. – Красноярск, 1991. – 26 с. (Препринт ИФ СО РАН № 708Ф).
8. Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф., Сморгон С.Л. Поляризатор света // ПТЭ. – 1992. - № 1. - С. 235.
9. Zyryanov V.Ya., Smorgon S.L., Shabanov V.F. Elongated films of polymer-dispersed liquid crystals as scattering polarizers // Molecular Engineering. – 1992. - V. 1, №. 4. - P.305-310.
10. Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Сморгон С.Л. Модулятор света // ПТЭ. – 1992. - № 6. - С. 209.
11. Zyryanov V.Ya., Smorgon S.L., Shabanov V.F. Polymer dispersed ferroelectric

- liquid crystals as display materials // Digest SID. – 1992. - V. 23. - P. 776-777.
12. Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F., Smorgon S.L. Electrooptics of polymer dispersed ferroelectric liquid crystals // Ferroelectrics. – 1993. - V. 143. - P. 271-276.
 13. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Шабанов В.Ф. Модуляция света планарно-ориентированной пленкой капсулированных полимером сегнетоэлектрических жидких кристаллов // Письма в ЖЭТФ. – 1993. - Т. 57, Вып. 1. - С. 17-20.
 14. Nazarenko V.G., Reznikov Yu.A., Reshetnyak V.Yu., Sergan V.V. and Zyryanov V. Ya. Oriented dispersion of LC droplets in a polymer matrix with light induced anisotropy // Molecular Materials. – 1993. - V. 2. - P. 295-299.
 15. Жуйков В.А., Сморгон С.Л., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Эффекты памяти в капсулированных холестериках. – Красноярск, 1993. – 22 с. (Препринт ИФ СО РАН № 740Ф).
 16. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Жуйков В.А., Шабанов В.Ф. Эффекты памяти в капсулированных полимером холестерических жидких кристаллах // Письма в ЖЭТФ. – 1994. - Т. 59, Вып. 8. - С. 520-522.
 17. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Жуйков В.А., Шабанов В.Ф. Оптическая память в пленках капсулированных полимером холестериков // Автометрия. – 1994. - № 4. - С. 27-33.
 18. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Шабанов В.Ф. Модуляторы света на основе капсулированных полимером сегнетоэлектрических жидких кристаллов // Автометрия. – 1994. - № 4. - С. 39-43.
 19. Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F., Smorgon S.L., Pozhidaev E.P. Polymer dispersed ferroelectric liquid-crystal light valves // Digest SID. – 1994. - V. 25. - P. 605-607.
 20. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Жуйков В.А., Шабанов В.Ф. Композитный жидкокристаллический материал с оптической памятью // ПТЭ. – 1994. - № 5. - С. 214-215.
 21. Пресняков В.В., Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Шабанов В.Ф. Вольт-контрастные характеристики вытянутых КРНЖК-пленок. – Красноярск: ИФ, 1994. – 32 с. (Препринт ИФ СО РАН №755Ф).
 22. Smorgon S.L., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F., Pozhidaev E.P. Light modulators based on polymer dispersed ferroelectric liquid crystals // Proceedings SPIE. – 1995. - V. 2731. - P. 188-194.
 23. Zhuikov V.A., Smorgon S.L., Zyryanov V.Ya. and Shabanov V.F. Electrooptical bistability and thermoaddressed information recording in polymer dispersed cholesterics // Proceedings SPIE. – 1995. - V. 2731. - P. 159-167.
 24. Пресняков В.В., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Порог Фредерикса в планарно-ориентированной дисперсии капель нематика. – Красноярск, 1995. – 20 с. (Препринт ИФ СО РАН №762Ф).
 25. Баранник А.В., Жуйков В.А., Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Шабанов В.Ф. Шкала серости при термоконтантной записи информации в

- капсулированных полимером холестерических жидких кристаллах // ЖТФ. – 1996. - Т. 66, Вып. 5. - С. 177-179.
26. Зырянов В.Я., Пресняков В.В., Шабанов В.Ф. Эффект Фредерикса в капсулированных полимером каплях нематика // Письма в ЖТФ. – 1996. - Т. 22, Вып. 14. - С. 22-26.
27. Зырянов В.Я., Жуйков В.А., Сморгон С.Л., Шабанов В.Ф. Термооптическая запись информации в капсулированных полимером холестерических жидких кристаллах // ЖТФ. – 1996. - Т. 66, Вып. 8. - С. 99-106.
28. Шабанов А.В., Пресняков В.В., Зырянов В.Я., Ветров С.Я. Влияние электрического поля на ориентационную структуру капель нематика. – Красноярск, 1996. – 34 с. (Препринт ИФ СО РАН №772Ф).
29. Патент № 2081443 РФ, МКИ 6 G 02 F 1/13. Жидкокристаллическое устройство / В.Я. Зырянов, С.Л. Сморгон, В.Ф. Шабанов. – Оpubл. 10.06.97, Бюл. № 16.
30. Сморгон С.Л., Пресняков В.В., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Устройство для поляризации и модуляции света // ПТЭ. – 1997. - № 1. - С. 164.
31. Сморгон С.Л., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Термооптический эффект в КПНЖК пленках, ориентированных растяжением // Оптический журнал. – 1997. - Т. 64, № 5. - С. 51-54.
32. Баранник А.В., Сморгон С.Л., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Стабильность светопропускания оптических затворов на основе капсулированных полимером нематических жидких кристаллов // Оптический журнал. – 1997. - Т. 64, № 5. - С. 99-101.
33. Зырянов В.Я., Пресняков В.В., Сморгон С.Л., Шабанов В.Ф. Электрооптические свойства и ориентационно-структурные превращения в ансамбле эллипсоидальных капель холестериков // Доклады РАН. – 1997. - Т. 354, № 2. - С. 178-181.
34. Pozhidaev E.P., Smorgon S.L., Andreev A.L., Kompanets I.N., Zuyganov V.Ya., Shin S.T. Low voltage polymer dispersed ferroelectric liquid crystals // OSA Trends in Optics and Photonics Series. Spatial light modulators. – 1997. - V. 14. - P. 94-101.
35. Шабанов А.В., Пресняков В.В., Зырянов В.Я., Ветров С.Я. Особенности процесса переориентации биполярных капель нематика с жестко фиксированными полюсами // Письма в ЖЭТФ. – 1998. - Т. 67, Вып. 9. - С. 696-700.
36. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Шабанов А.В., Пожидаев Е.П. Оптимизация контраста, яркости и амплитуды модуляции света в электрооптических устройствах на основе капсулированных полимером сегнетоэлектрических жидких кристаллов // Письма в ЖТФ. – 1998. - Т. 24, Вып. 12. - С. 57-61.
37. Баранник А.В., Зырянов В.Я., Шабанов В.Ф. Особенности термооптической записи информации в бистабильных пленках капсулированных полимером холестерических жидких кристаллов // Оптический журнал. – 1998. - Т. 65, № 7. - С. 81-85.

38. Zyryanov V.Ya., Smorgon S.L., Shabanov V.F., Pozhidaev E.P. Orientational structures of elongated droplets of ferroelectric liquid crystals in polymer matrix // *Molecular Materials*. – 1998. - V. 9, № 2. - P. 139-145.
39. Pozhidaev E.P., Smorgon S.L., Andreev A.L., Kompanets I.N., Zyryanov V.Ya. Kompanets S.I. Low voltage and high optical quality polymer dispersed ferroelectric liquid crystal films // *Ferroelectrics*. – 1998. - V. 212. - P. 153-160.
40. Shabanov A.V., Presnyakov V.V., Zyryanov V.Ya., Vetrov S.Ya. Bipolar nematic droplets with rigidly fixed poles in the electric field // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 1998. - V. 321. - P. 245-258.
41. Presnyakov V.V., Smorgon S.L., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Volt-contrast curve anisotropy in planar-oriented PDChLC films // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 1998. - V. 321. - P. 259-270.
42. Barannik A.V., Zyryanov V.Ya., Shkuryaev P.G., and Shabanov V.F. Thermo-optical information recording in the bistable films of polymer dispersed cholesteric liquid crystals // *Proceedings SPIE*. – 1998. - V. 3347. - P. 107-112.
43. Presnyakov V.V., Smorgon S.L., Zyryanov V.Ya., Shabanov V.F. Polyfunctional optoelectronic elements based on oriented PDChLC films // *Proceedings SPIE*. – 1998. - V. 3348. - P. 98-102.
44. Баранник А.В., Зырянов В.Я., Шкуръяев П.Г., Шабанов В.Ф. Термооптическая запись информации в бистабильных пленках капсулированных полимером холестерических жидких кристаллов // *Журнал научной и прикладной фотографии*. – 1998. - Т. 43, № 6. - С. 9-13.
45. Presnyakov V.V., Zyryanov V.Ya., Shabanov A.V., Vetrov S.Ya. Friedericksz threshold in bipolar nematic droplets with rigidly fixed poles // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 1999. - V. 329. - P. 27-34.
46. Зырянов В.Я., Сморгон С.Л., Шабанов А.В., Пожидасев Е.П., Андреев А.Л., Компанец И.Н. Оптимизация светомодуляционных характеристик ячейки капсулированного полимером сегнетоэлектрического жидкого кристалла // *Оптический журнал*. – 1999. - Т. 66, № 6. - С. 121-126.
47. Патент № 2141683 РФ, МКИ 6 G 02 F 1/13. Жидкокристаллическое устройство / С.Л. Сморгон, В.В. Пресняков, В.Я. Зырянов, В.Ф. Шабанов. – Оpubл. 20.11.99, Бюл. № 32.
48. Конколович А.В., Пресняков В.В., Зырянов В.Я., Лойко В.А., Шабанов В.Ф. Интерференционное гашение света, проходящего через монослойную пленку капсулированных полимером нематических жидких кристаллов // *Письма в ЖЭТФ*. – 2000. - Т. 71, № 12. - С. 710-713.
49. Andreev A.L., Pozhidaev E.P., Kompanets I.N., Fedosenkova T.B., Zyryanov V.Ya., Smorgon S.L., Weyrauch T., Haase W. Saturation voltage and elastic energy of polymer dispersed ferroelectric liquid crystal films // *Ferroelectrics*. – 2000. - V. 243. - P. 189-196.
50. Zyryanov V.Ya., Pozhidaev E.P., Smorgon S.L., Barannik A.V., Presnyakov V.V., Andreev A.L., Kompanets I.N., Shevtchenko S.A., Ganzke D., Haase W. Light modulation characteristics of single-polarizer PDChLC cells // *Ferroelectrics*. – 2000. - V. 243. - P. 179-188.

51. Presnyakov V.V., Shabanov A.V., Zyryanov V.Ya., Loiko V.A., Konkolovich A.V. Interference effect in electrooptical cells based on PDNLC monolayer // Proceedings SPIE. – 2001. - V. 4511. - P. 117-118.
52. Smorgon S.L., Barannik A.V., Zyryanov V.Ya., Pozhidaev E.P., Andreev A.L., Kompanets I.N., Ganzke D., Haase W. Low voltage light modulator based on FLC layer divided by polymer walls // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2001. - V. 368. - P. 3975-3982.
53. Zyryanov V.Ya., Smorgon S.L., Shabanov V.F., Pozhidaev E.P., Andreev A.L., Kompanets I.N., Maltese P., Haase W. Optimization of light modulation characteristics of polarizer-free PDFLC cells // Proceedings SPIE. – 2001. - V. 4511. - P. 104-105.
54. Zyryanov V.Ya., Pozhidaev E.P., Smorgon S.L., Andreev A.L., Ganzke D., Shabanov V.F., Kompanets I.N., Haase W. Light modulation characteristics of a single-polarizer electrooptical cell based on polymer dispersed ferroelectric liquid crystals // Liq. Cryst. – 2001. - V. 28, No 5. - P. 741-748.
55. Zyryanov V.Ya., Presnyakov V.V., Serebrennikov A.N., Shabanov A.V., Loiko V.A., Konkolovich A.V. High contrast light modulator based on PDNLC monolayer // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2001. - V. 368. - P. 3983-3990.
56. Presnyakov V.V., Shabanov V.F., Zyryanov V.Ya., Komitov L. Chiral additive effects on electrooptical response and droplet structure in uniaxially oriented films of polymer dispersed nematic // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2001. - V. 367. - P. 3157-3165.
57. Баранник А.В., Шабанов А.В., Зырянов В.Я. Интерференционные осцилляции в динамике оптического отклика капсулированных полимером нематических жидких кристаллов // Письма в ЖТФ. – 2002. - Т. 28, Вып. 16. - С. 25-31.

Подписано в печать 07.10.02 г.

Формат 60×85/16. Гарнитура Таймс. Уч. изд. л. 1.5.

Усл. печ. л. 2. Тираж 100. Заказ № 72

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН
