

На правах рукописи

Шерман Мария Михайловна

**ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ
СО СЛУЧАЙНЫМИ ПЛАНАРНЫМИ УСЛОВИЯМИ НА ГРАНИЦАХ**

01.04.05 – оптика

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Саратов – 2012

Работа выполнена на кафедре оптики и биофотоники физического факультета
Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Яковлев Дмитрий Анатольевич

Официальные оппоненты: Названов Василий Федорович доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета

Перепелицын Юрий Николаевич кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ведущая организация: Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Защита состоится «15» марта 2012 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская 83, 3-й корпус СГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета.

Автореферат разослан «___» февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аникин Валерий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время, благодаря своим уникальным электрооптическим свойствам, жидкие кристаллы (ЖК) используются во многих оптических устройствах (дисплеи, амплитудные и фазовые модуляторы, управляемые светофильтры, устройства управления поляризацией, дефлекторы и т.д.), и постоянно обнаруживаются новые интересные эффекты, еще более расширяющие область практического использования ЖК. Одним из потенциально полезных эффектов является рассматриваемый в данной работе эффект спектральной фильтрации, наблюдающийся на тонких мелкодоменных нематических ЖК слоях со случайными планарными граничными условиями, которые реализуются в ЖК ячейках с ненатертыми полимерными ориентирующими слоями. Нематические и холестерические слои, реализующиеся при таких граничных условиях, мы будем условно называть RPA (randomly planarly aligned) слоями. Эффект спектральной фильтрации на нематических RPA-слоях был впервые описан в работе [1] автором данной диссертации в соавторстве с Д. А. Яковлевым. В этой статье было экспериментально показано, что тонкие нематические RPA-слои могут обладать смешанным, диффузно-направленным, характером пропускания с сильной квазипериодической зависимостью коэффициента пропускания для нерассеянной компоненты (коллимированного пропускания) от частоты падающего света. Ввиду выраженного квазипериодического характера спектров коллимированного пропускания мы условно назвали данный эффект CSS (channeled spectrum scattering). Характерной особенностью CSS является большая амплитуда спектральной модуляции интенсивности нерассеянной компоненты: в спектральных областях, соответствующих максимумам коллимированного пропускания, почти весь свет проходит через ЖК слой без рассеяния, в то время как в областях, соответствующих минимумам коллимированного пропускания, практически весь прошедший свет является рассеянным. Существенно, что CSS проявляется как в поляризованном, так и в неполяризованном свете, причем в равной мере. Д. А. Яковлевым [2] была предложена простая теоретическая модель, объясняющая на качественном уровне основные особенности CSS. В рамках данной модели RPA-слой представляется как монослой идентичных по структуре доменов, имеющих случайную азимутальную ориентацию; далее эта модель будет называться эквидоменной моделью или эквидоменной теорией. Одной из **целей** настоящей работы было выяснение, в какой степени структура и реальные оптические свойства RPA-слоев соответствуют эквидоменной модели, и выявление основных факторов, требующих учета при разработке более точной теории. Помимо качественного объяснения CSS эффекта эквидоменная модель предсказывает интересные и потенциально полезные электрооптические свойства нематических и холестерических RPA-слоев, в частности, смещение экстремумов коллимированного пропускания под действием электрического поля в случае нематических ЖК и поворот плоскости поляризации нерассеянной компоненты прошедшего света с сохранением его линейной поляризации под действием электрического поля в случае холестерических ЖК с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали. **Основной целью** данной работы явилось выяснение, проявляются ли эти электрооптические свойства реальными нематическими и холестерическими RPA-слоями и, если да, то в какой степени и в каких условиях, и насколько они подходят для практических применений.

Достижение целей работы потребовало решения следующих **основных задач**:

1. Детальное экспериментальное исследование макроскопических оптических и, в частности, поляризационно-оптических свойств нематических и холестерических RPA-слоев и оценка параметров экспериментальных ЖК слоев, требующихся для числен-

ного моделирования оптических характеристик этих слоев в соответствии с эквидоменной теорией.

2. Проверка степени адекватности эквидоменной модели оптики RPA-слоев, включающая в себя проведение численного моделирования макроскопических оптических характеристик экспериментальных образцов в соответствии с эквидоменной теорией и сравнение результатов расчета с соответствующими экспериментальными результатами.
3. Исследование электрооптического отклика нематических и холестерических RPA-слоев.
4. Сравнение статических электрооптических характеристик нематических и холестерических RPA-слоев с рассчитанными согласно эквидоменной модели.
5. Экспериментальная оценка времен отклика нематических RPA-слоев при переключении напряжения на ЖК слое.
6. Изучение микроструктуры нематических и холестерических RPA-слоев.
7. Исследование трансформации микроструктуры нематических RPA-слоев под действием электрического поля.

Научная новизна работы

1. Впервые проведено детальное исследование специфических макроскопических оптических свойств RPA-слоев нематических и холестерических (с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали) жидких кристаллов, связанных с селективным рассеянием, обусловленным их квазиэквидоменной структурой.
2. Впервые выявлен квазипериодический характер спектров коллимированного пропускания нематических RPA-слоев и показана независимость этих спектров от состояния поляризации падающего света.
3. Впервые экспериментально установлено, что в случае нормального падения линейно поляризованного света на RPA-слой холестерического ЖК с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали нерассеянная компонента прошедшего света имеет линейную поляризацию вне зависимости от выполнения условия $\lambda \gg |\Delta n p|/2$, где λ – длина волны, Δn – разность главных показателей преломления ЖК, p – шаг холестерической спирали.
4. Впервые проведена количественная оценка степени адекватности эквидоменной модели оптики нематических и холестерических RPA-слоев.
5. Впервые детально исследована трансформация спектров коллимированного пропускания нематических и холестерических RPA-слоев под действием электрического напряжения, приложенного к ЖК слою.
6. Впервые экспериментально показано, что ячейки с нематическими RPA-слоями могут быть использованы как поляризационно-независимые перестраиваемые спектральные фильтры.
7. Впервые экспериментально показано, что ячейки с нематическими RPA-слоями могут быть использованы как поляризационно-независимые управляемые малоугловые диффузоры для коллимированных квазимонохроматических световых пучков, способные задавать любое нужное отношение мощностей рассеянной и нерассеянной компонент.
8. Впервые экспериментально показано, что в тонких RPA-слоях холестерических ЖК с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали возможна реализация режима, когда плавное изменение величины электрического напряжения,

- приложенного к ЖК слою, приводит к плавному повороту плоскости поляризации нерассеянной компоненты прошедшего света с сохранением его линейной поляризации.
9. Впервые выявлены особенности микроструктуры нематических RPA-слоев, определяющие особенности спектров коллимированного пропускания этих слоев и трансформации этих спектров под действием внешнего электрического поля.

Научно-практическая значимость работы

Результаты, полученные в ходе исследований, существенно расширяют представления об оптических и электрооптических свойствах сложно неоднородных нематических и холестерических слоев и сложно неоднородных анизотропных структур вообще. Экспериментальные и теоретические результаты могут быть использованы при разработке новых моделей оптики анизотропных сред. Многие природные и технические среды являются оптически анизотропными, и во многих практически интересных случаях анизотропная среда представляет собой неоднородную структуру с зависящей от пространственных координат ориентацией локальной оптической оси. Такого рода структура характерна многим техническим материалам, в частности, полимерным пленкам, а также многим биологическим тканям. Знание закономерностей взаимодействия света с такими средами важно как с точки зрения применения их специфических оптических свойств в различных практических устройствах, так и с точки зрения разработки эффективных оптических методов их исследования и характеристики. Знание специфических оптических свойств неоднородных анизотропных сред, обнаруженных и изученных в ходе выполнения настоящей работы, таких как CSS, может быть полезно в этом плане, особенно в исследованиях, связанных со структурообразованием в ЖК и ориентацией ЖК на поверхности.

Обнаруженные и исследованные в работе эффекты могут найти практическое применение в технике и служить основой для создания новых электрооптических устройств на ЖК, в том числе неполяризационных.

Достоверность научных результатов и выводов, полученных в работе, обуславливается использованием апробированных методик измерений, адекватностью используемых теоретических моделей, соответствием теоретических выводов экспериментальным данным, воспроизводимостью результатов экспериментов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Эквидоменная теория достаточно точно предсказывает положение экстремумов коллимированного пропускания мелкодоменных нематических слоев, проявляющих CSS, в области прозрачности ЖК материала. Отличие высоты максимумов коллимированного пропускания от предсказываемой эквидоменной теорией для таких слоев определяется, главным образом, присутствием дисклинаций и пространственно-зависимой локальной закрученностью поля ЖК директора по координате, перпендикулярной границам слоя.
2. Приложение к нематическим RPA-слоям, проявляющим CSS, электрического напряжения, превышающего по величине пороговое напряжение перехода Фредерикса для планарных структур, приводит к смещению экстремумов и понижению высоты максимумов коллимированного пропускания. Положение экстремумов зависит от величины приложенного напряжения. Понижение максимумов коллимированного пропускания связано, главным образом, с возникновением стационарных стенок Броухарда-Легера под действием электрического поля.

3. Для RPA-слоев холестерических ЖК с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали возможна реализация режима, при котором в случае падения на ЖК слой линейно поляризованного света вариация величины приложенного к ЖК слою электрического напряжения в широком диапазоне сохраняет линейной поляризацию нерассеянной компоненты прошедшего света, но приводит к изменению ее направления, т.е. повороту плоскости поляризации.

Личный вклад соискателя состоит в участии в постановке задач исследования, разработке алгоритмов их решения и их реализации, подготовке и проведении экспериментов, в обработке и анализе полученных результатов.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях:

1. Международной школе для молодых ученых и студентов по Оптике, Лазерной физике и Биофизике (Saratov Fall Meeting' 2007) (Саратов, РФ, 2007);
2. Международной конференции (International Liquid Crystal Conference 2008) (Jeju Island, Korea, 2008);
3. Международной школе для молодых ученых и студентов по Оптике, Лазерной физике и Биофизике (Saratov Fall Meeting' 2008) (Саратов, РФ, 2008);
4. Всероссийской конференции «Лазеры. Измерения. Информация» – 2009, (Санкт-Петербург, РФ, 2009);
5. Международной конференции (OPTO Meeting for Young Researchers' 2010) (Torun, Poland, 2010);
6. Международной конференции (International OSA Network of Students 8), (Москва, РФ, 2010);
7. Международной школе для молодых ученых и студентов по Оптике, Лазерной физике и Биофизике (Saratov Fall Meeting' 2010) (Саратов, РФ, 2010).

На Всероссийской молодежной выставке-конкурсе прикладных исследований, изобретений и инноваций «УМНИК» (Саратов, РФ, 2009) грант программы «УМНИК» был присужден проекту «Электроуправляемый диффузор на основе нематических мультислойных слоев» (автор – Шерман М. М.).

Публикации. По материалам исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, опубликовано 8 статей, из них 2 статьи в журналах из списка рекомендованных ВАК. Основные результаты изложены в работах [1-8].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 114 наименований. Работа изложена на 186 страницах текста, содержит 88 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность решаемых задач, сформулирована цель работы, ее научная новизна, научно-практическая значимость, основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** представлен краткий обзор понятий и положений физики жидких кристаллов, необходимых при рассмотрении структуры, оптики и электрооптики RPA-слоев. Упомянуты известные работы, в которых рассматриваются макроскопические оптические

ские и электрооптические свойства нематических и холестерических RPA-слоев (У. Токо и др., 1993; А. Chanishvili и др., 1991; G. Chilaya и др., 1995; Г. Чилая, 2000 и др.). При рассмотрении холестерических ЖК основное внимание уделено холестерикам с естественным шагом спирали большим по сравнению с длинами волн видимого диапазона, поскольку именно такие холестерические материалы рассматриваются в оригинальной части данной работы. Определено понятие эквидоменного ЖК слоя как слоя, характеризуемого полем ЖК директора следующего вида

$$\mathbf{n}(\mathbf{r}) = \{ \cos\theta(z)\cos[\nu(x,y)+\varphi(z)], \cos\theta(z)\sin[\nu(x,y)+\varphi(z)], \sin\theta(z) \} \quad (1)$$

в декартовой системе координат (x, y, z) с осью z , перпендикулярной границам ЖК слоя ($z = 0$ и $z = d$); кроме того, предполагается пространственная инвариантность главных показателей преломления среды. Слой с конфигурацией (1) может рассматриваться как монослой доменов, имеющих одинаковую продольную (по оси z) структуру, характеризуемую функциями $\theta(z)$ (θ – угол наклона ЖК директора) и $\varphi(z)$, но различную азимутальную ориентацию, характеризуемую углом ν . Под доменом здесь и ниже при рассмотрении структуры RPA-слоев подразумевается цилиндрическая область, ограниченная некоторой поверхностью, образованной прямыми линиями, параллельными оси z , и плоскостями границ слоя и имеющая столь малые поперечные размеры, что вариацию директора по координатам x и y в пределах этой области можно было бы считать пренебрежимо малой. В качестве теоретических моделей нематических и холестерических ЖК слоев, реализующихся при планарных граничных условиях, в том числе RPA-слоев и шпирен-текстур часто используются эквидоменные слои с $\theta(z) = 0$ и $\varphi(z) = 0$ в случае нематика и с $\theta(z) = 0$ и $\varphi(z) = 2\pi z/p_0$, где p_0 – естественный шаг холестерической спирали, в случае холестерика.

Также в главе 1 описаны поляризационно-оптические методы, использованные нами при исследовании макроскопических свойств RPA-слоев и их микроструктуры.

Оптика RPA-слоев в отсутствие внешнего электрического поля

Как уже было сказано, основным предметом рассмотрения в данной работе является эффект селективного рассеяния света на RPA-слоях. Суть указанного эффекта состоит в том, что при падении в нормальном направлении на рассматриваемый RPA-слой коллимированного пучка света часть света рассеивается структурой, а часть проходит через слой не рассеиваясь, причем соотношение рассеянной и коллимированной составляющих зависит от длины волны. Нами исследовались, главным образом, характеристики направленного (коллимированного) пропускания образцов. В работе (глава 2 и раздел 3.2 главы 3) широко представлены результаты экспериментальных исследований макроскопических оптических свойств нематических и холестерических RPA-слоев в отсутствие внешнего электрического поля. Экспериментальные ЖК ячейки были собраны из стеклянных пластин, покрытых полиимидными слоями, способствующими планарной ориентации молекул ЖК. Полиимидные слои не подвергались какой-либо обработке, способной привести к появлению выделенного направления азимутальной ориентации ЖК (такой как натирание). Ячейки были заполнены ЖК материалом в изотропном состоянии во избежание ориентации потоком. В одной серии ячеек (ячейки без ИТО слоев) использовался нематический материал СЖК-1 (НИОПИК, Москва) и смесь СЖК-1 с небольшим количеством хиральной добавки ХДН-1 (НИОПИК), придающей смеси свойства холестерика с естественным шагом спирали $p_0 \approx 4$ мкм (спираль левая). Ячейки другой серии (электроуправляемые ячейки с ИТО слоями) были заполнены нематиком Е7 (Merck) и холестерическим материалом, представляющим собой смесь нематика Е7 и хиральной добавки ZLI-811 (Merck), $p_0 \approx 11$ мкм (спираль левая). Для всех эксперимен-

тальных RPA ячеек в видимом диапазоне рассеяние вперед имело малоугловой характер и не менее 90% полной мощности прошедшего излучения распространялось в пределах конуса с полууглом раствора меньше 5° .

Измерялись коэффициенты направленного пропускания ячеек для неполяризованного (t_C) и линейно поляризованного (t_{CP}) падающего света, а также коэффициенты передачи поляризованных компонент (t_{CPA}) при различных ориентациях анализатора. Коэффициенты передачи рассчитывались как отношение интенсивности света, прошедшего через систему поляризатор – образец – анализатор (при заданной ориентации поляризатора и анализатора), к интенсивности света, проходящего через систему поляризатор – анализатор при параллельном расположении их осей пропускания. Во всех экспериментах свет падал на ячейку в нормальном направлении. Погрешность измерения параметров t_C , t_{CP} и t_{CPA} в области максимумов коллимированного пропускания составляла около 0.02. В области минимумов коллимированного пропускания погрешность выше из-за попадания в фотоприемник небольшой части рассеянной компоненты прошедшего света: 0.035 для t_{CPA} и 0.07 для t_C и t_{CP} . Экспериментальная установка, использованная при измерении характеристик коллимированного пропускания, подробно описана в работе [2]. Также для ячеек с помощью спектрометра, оснащенного интегральной сферой, измерялось полное (интегральное) пропускание образцов.

Рис. 1 иллюстрирует CSS эффект, проявляемый нематическими ячейками. На этом рисунке представлены экспериментальные спектры коллимированного и полного пропускания для трех нематических ячеек с различной толщиной ЖК слоя в отсутствие напряжения. Из рисунка видно, что спектры полного пропускания являются практически ахроматическими и выглядят очень похожими друг на друга, т.е. слабо зависят от толщины ЖК слоя. В отличие от интегрального пропускания, коллимированное пропускание нематических RPA ячеек сильно зависит от длины волны, имея квазипериодический характер, и сильно зависит от толщины ЖК слоя. Максимумы коллимированного пропускания близки по величине к интегральному пропусканию, в то время как в минимумах коллимированное пропускание близко к нулю, то есть на длинах волн, соответствующих максимумам, основная часть светового потока проходит через ячейку без рассеяния, а на длинах волн, соответствующих минимумам, практически весь прошедший свет диффузно рассеивается. Подобная картина наблюдалась для всех исследованных нематических RPA ячеек. Спектры коллимированного пропускания ячеек с холестерическими RPA-слоями также имели осциллирующий характер, однако значения t_C в минимумах существенно отличались от нуля.

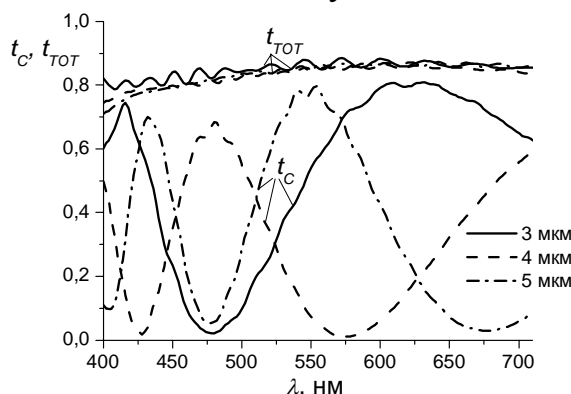


Рис. 1. Экспериментальные спектры коэффициентов направленного (t_C) и интегрального (t_{TOT}) пропускания для нематических RPA ячеек с номинальной толщиной ЖК слоя 3, 4 и 5 мкм (ячейки с ITO слоями).

Для всех исследованных ячеек, как нематических, так и холестерических, величина коэффициента пропускания t_{CP} практически не зависела от направления поляризации падающего света (см. рис. 2) и с высокой точностью выполнялось соотношение $t_{CP} = t_C$. Также было замечено, что при освещении любой из исследованных RPA ячеек линейно поляризованным светом, нерассеянная составляющая прошедшего света тоже имеет линейную поляризацию – эта составляющая всегда могла быть полностью «погашена» поворотом анализатора. В случае нематических ячеек направление поляризации коллимированной компоненты прошедшего света всегда совпадало с направлением поляризации падающего света. В случае холестерических ячеек направление поляризации нерассеянной компоненты, в общем случае, отличалось от направления поляризации падающего света и сильно зависело от длины волны. Все эти особенности хорошо видны из рис. 3(а) и 4(а), на которых изображены экспериментальные спектры коэффициентов передачи ячеек, измеренные при различных ориентациях анализатора.

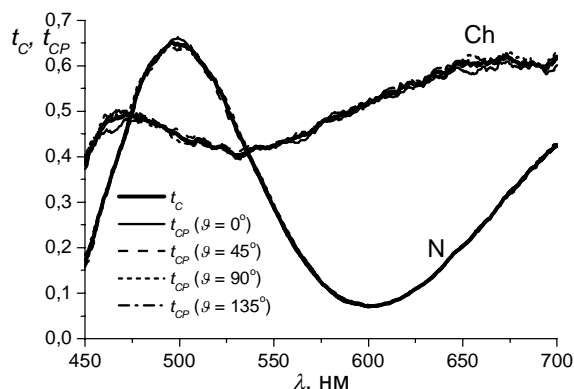


Рис. 2. Экспериментальные спектры коэффициента направленного пропускания нематической (N) и холестерической (Ch) RPA ячеек (без ITO слоев) для неполяризованного t_C и линейно поляризованного t_{CP} падающего света при различных значениях угла ориентации поляризатора (ϑ).

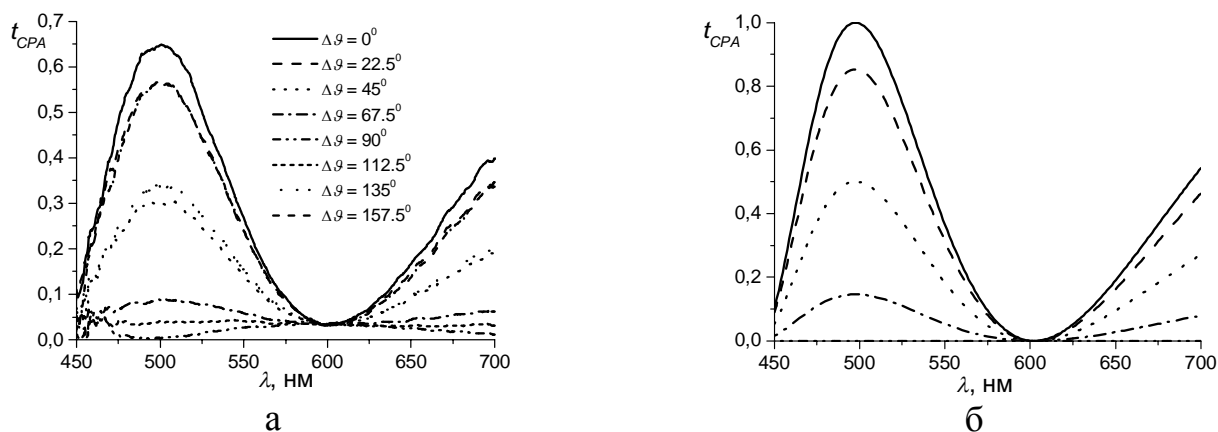


Рис. 3. Экспериментальные (а) и теоретические (б) спектры коэффициентов передачи t_{CPA} нематической RPA ячейки (без ITO слоев) при различной взаимной ориентации поляризатора и анализатора; $\Delta\vartheta$ – угол между осями пропускания поляризатора и анализатора.

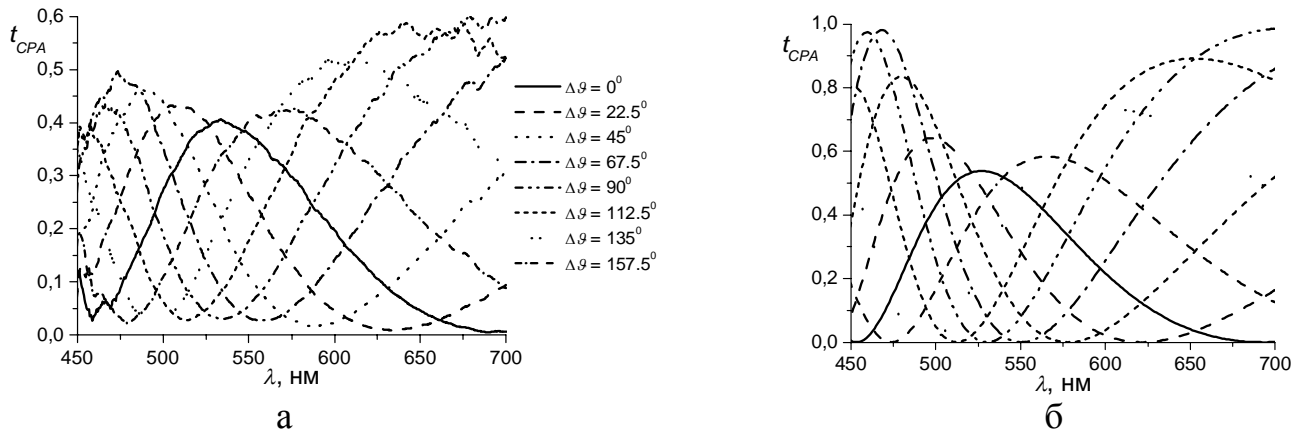


Рис. 4. Экспериментальные (а) и теоретические (б) спектры коэффициентов передачи t_{CPA} холестерической RPA ячейки (без ИТО слоев) при различной взаимной ориентации поляризатора и анализатора.

Эквидоменная теория

В рамках эквидоменной теории [2], которая была разработана на основе анализа экспериментальных данных, представленных в **главе 2**, присутствие нерассеянной компоненты света, прошедшего через RPA-слой, объясняется существованием пространственно инвариантной составляющей \mathbf{T}_C матрицы Джонса $\mathbf{T}(x,y) = \mathbf{T}_C + \mathbf{T}_S(x,y)$, характеризующей локальное пропускание этого слоя. Матрица \mathbf{T}_C описывает трансформацию, осуществляемую слоем без искажения волнового фронта. Для произвольного эквидоменного слоя (1) матрица \mathbf{T}_C равна вращательно инвариантной составляющей матрицы Джонса отдельного домена. В работе [2] показано, что матрица \mathbf{T}_C может быть выражена следующим образом

$$\mathbf{T}_C = K \begin{pmatrix} a' & b' \\ -b' & a' \end{pmatrix},$$

где a' и b' – вещественные параметры, K – скалярный комплексный коэффициент, учитывающий средний фазовый набег, и представляет собой с точностью до скалярного множителя матрицу поворота. Последнее означает, что нерассеянная составляющая имеет такой же эллипс поляризации, что и падающая волна, но этот эллипс, в общем случае, повернут. В качестве оптической модели нематического RPA-слоя рассматривается эквидоменный слой с $\theta(z) = 0$ и $\varphi(z) = 0$. Для такого слоя

$$a' = \cos\left(\frac{\pi\Delta n d}{\lambda}\right), \quad b' = 0,$$

где $\Delta n = n_{||} - n_{\perp}$, $n_{||}$, n_{\perp} – главные показатели преломления ЖК, d – толщина ЖК слоя. Равенство b' нулю означает, что никакого поворота эллипса поляризации в данном случае не происходит, то есть нерассеянная составляющая прошедшего света имеет точно такую же поляризацию, как падающий свет, что и наблюдается в эксперименте. Коэффициент коллимированного пропускания ЖК ячейки в этом случае может быть приближенно выражен следующим образом

$$t_C = t_{SUR} \cos^2\left(\frac{\pi\Delta n d}{\lambda}\right),$$

где t_{SUR} – энергетический коэффициент пропускания слоев, расположенных вокруг ЖК слоя. Коэффициент t_{SUR} учитывает оптические потери в слоях, окружающих ЖК слой в ячейке.

Для эквидоменного слоя с $\theta(z) = 0$ и $\varphi(z) = 2\pi z/p_0$ (модель холестерического RPA-слоя)

$$a' = \cos Q \cos \Phi + \frac{\bar{\Phi}}{Q} \sin Q \sin \Phi, \quad b' = -\cos Q \sin \Phi + \frac{\bar{\Phi}}{Q} \sin Q \cos \Phi, \quad (2)$$

где

$$Q = \sqrt{G^2 + \bar{\Phi}^2}, \quad \bar{\Phi} = \frac{1}{2}(\sqrt{n_{\parallel}/n_{\perp}} + \sqrt{n_{\perp}/n_{\parallel}})\Phi, \quad G = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda},$$

$\Phi = \varphi(d) - \varphi(0)$ – угол закрученности структуры. Здесь параметр b' , в общем случае, отличен от нуля, и происходит поворот плоскости поляризации. Коэффициент пропускания t_C ячейки с таким ЖК слоем может быть выражен следующим образом:

$$t_C = t_{SUR} (\cos^2 Q + (\Phi/Q)^2 \sin^2 Q).$$

Присутствие второго слагаемого в данном выражении объясняет меньшую глубину минимумов t_C в случае холестерического слоя.

В силу узости конуса рассеяния света ЖК ячейкой и отсутствия поглощения в ЖК слое с высокой точностью выполняется соотношение $t_{SUR} = t_{TOT}$, где t_{TOT} – интегральное пропускание ячейки. Поэтому, отношение t_C/t_{TOT} для нематической RPA ячейки в отсутствие напряжения в рамках данной модели может быть представлено следующим образом

$$\frac{t_C}{t_{TOT}} = \cos^2 \frac{\pi(n_{\parallel} - n_{\perp})d}{\lambda}. \quad (3)$$

На рис. 5 сравниваются экспериментальные спектры t_C/t_{TOT} с теоретическими, рассчитанными в соответствии с (3). Экспериментальные кривые были рассчитаны по спектрам, показанным на рис. 1, из которых предварительно сглаживанием была устранена мелко-масштабная интерференционная рябь. Теоретические спектры, рассчитанные с использованием литературных данных по показателям преломления материала E7, были подогнаны к экспериментальным вариацией d . Как видно из рис. 5, форма теоретических спектров достаточно хорошо согласуется с формой экспериментальных спектров, и имеет место очень хорошее соответствие в положении экстремумов экспериментальных и теоретических кривых.

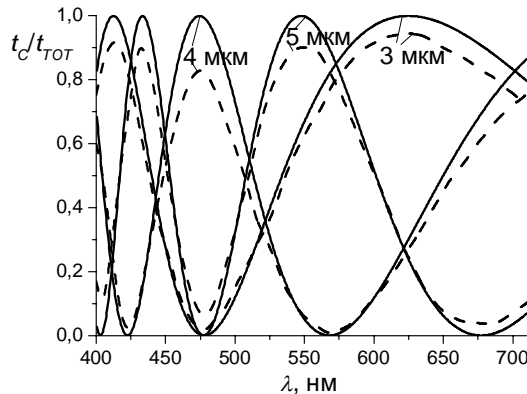


Рис. 5. Экспериментальные и подогнанные теоретические спектры приведенного пропускания для нематических RPA ячеек с номинальной толщиной ЖК слоя 3, 4 и 5 мкм (ячейки с ИТО слоями) в отсутствие напряжения. Сплошные линии – теория, пунктирные – эксперимент.

На рис. 3(б) и 4(б) представлены результаты расчета характеристик направленного пропускания нематического и холестерического RPA-слоев, проведенного в соответст-

вии с представленной теоретической моделью. Все расчеты проводились при $t_{SUR} = |K|^2 = 1$, т.е. без учета потерь. Из представленных результатов видно хорошее качественное соответствие между экспериментальными и теоретическими данными, что подтверждает состоятельность эквидоменной модели. Очень хорошо воспроизводится положение спектральных максимумов и минимумов, а также характер трансформации коэффициентов передачи при повороте анализатора. На рис. 6 сравниваются экспериментальная и теоретическая зависимости угла поворота плоскости поляризации проходящего света ρ от длины волны в случае холестерического слоя. В данном случае имеется хорошее количественное соответствие экспериментальных и теоретических данных.

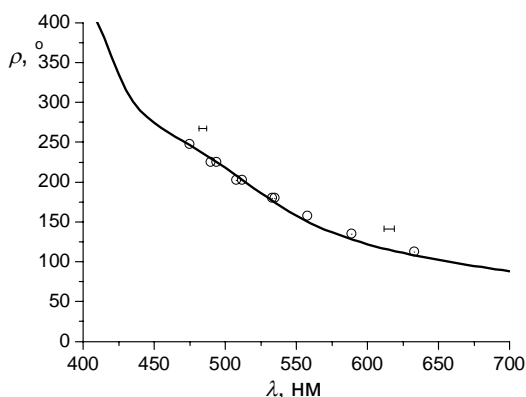


Рис. 6. Зависимость угла поворота плоскости поляризации нерассеянной составляющей прошедшего света от длины волны для холестерической RPA ячейки (без ITO слоев). Сплошной линией показаны результаты моделирования, кружками – экспериментальные точки.

Эффект вращения плоскости поляризации, проявляемый холестерическими RPA-слоями, имеет определенную аналогию с эффектом вращения плоскости поляризации монодоменными планарными холестерическими слоями, который проявляется последними при выполнении условий $\lambda \ll \bar{n}p$ и

$$\lambda \gg |\Delta np|/2. \quad (4)$$

В частности, в обоих случаях направление вращения плоскости поляризации противоположно направлению закрученности холестерической спирали. Однако в первом случае, в отличие от второго, зависимость угла поворота плоскости поляризации ρ от толщины не является линейной, и реализация эффекта не зависит от выполнения условия (4).

Электрооптика RPA-слоев

Глава 3 посвящена исследованию электрооптического отклика нематических и холестерических (с большим естественным шагом спирали) RPA-слоев. В начале главы представлена эквидоменная модель электрооптического отклика RPA-слоев, основанная на предположении, что при наложении внешнего электрического поля структура ЖК слоя остается квазиэквидоменной и существенным образом изменяются только функции $\theta(z)$ и $\varphi(z)$ (1). При вычислении коллимированного пропускания RPA-слой считается эквидоменным. При этом используются функции $\theta(z)$ и $\varphi(z)$, рассчитанные в соответствии с континуальной теорией упругости ЖК, но без учета неоднородности поля ЖК директора по координатам x и y (т.е. в предположении малости производных $\partial \mathbf{n} / \partial x$ и $\partial \mathbf{n} / \partial y$). При рассмотрении нематических RPA-слоев предполагается, что $\varphi(z) = 0$. Это приводит к следующему выражению для коллимированного пропускания ЖК ячейки

$$t_C = t_{SUR} \cos^2 \left(\frac{\pi \langle \Delta n \rangle d}{\lambda} \right),$$

где

$$\langle \Delta n \rangle = \frac{1}{d} \int_0^d \frac{n_{\parallel} n_{\perp}}{\sqrt{n_{\perp}^2 \cos^2 \theta(z) + n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta(z)}} dz - n_{\perp}$$

– эффективный коэффициент двулучепреломления. Происходящая под действием электрического поля переориентация молекул ЖК и соответствующие изменения $\langle \Delta n \rangle$ должны приводить к смещению экстремумов коллимированного пропускания. Эксперименты с электроуправляемыми нематическими ячейками показали, что смещение экстремумов коллимированного пропускания при приложении к ЖК слою электрического напряжения действительно происходит, причем положение экстремумов коллимированного пропускания достаточно хорошо предсказывается эквидоменной теорией (см. рис. 7 и 8).

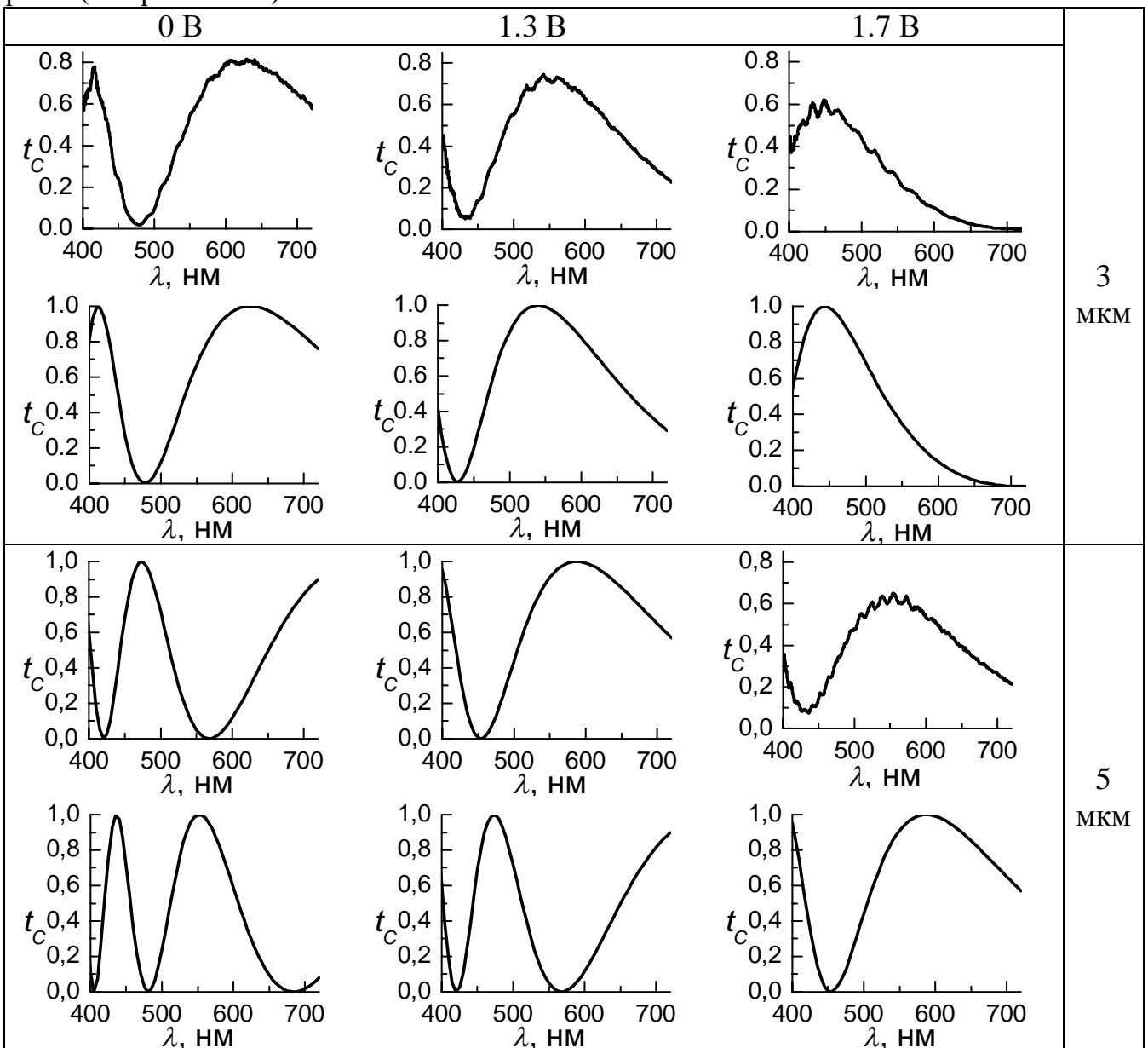


Рис. 7. Экспериментальные (верхние ряды) и теоретические (нижние ряды) спектры коллимированного пропускания нематических RPA ячеек с номинальной толщиной ЖК слоя 3 и 5 мкм при различных значениях приложенного напряжения.

Численные расчеты проводились с помощью системы компьютерного моделирования ЖК устройств LCD-DESIGN с использованием литературных значений физических констант материала E7.

В экспериментах с нематическими ячейками наряду со смещением экстремумов t_c наблюдалось некоторое понижение максимумов t_c при увеличении напряжения на ЖК слое (см. рис. 7). Это понижение не может быть объяснено в рамках эквидоменной модели. Его основные причины были выявлены в результате микроскопических исследований образцов. Они обсуждаются в главе 4.

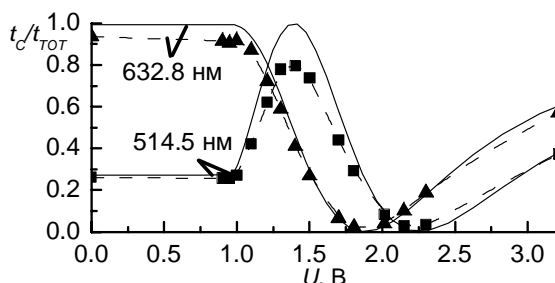


Рис. 8. Экспериментальные зависимости приведенного коллимированного пропускания t_c/t_{TOT} от напряжения U для ячейки с номинальной толщиной ЖК слоя 3 мкм на длинах волн 514.5 нм и 632.8 нм (символы и пунктирные кривые) и теоретические зависимости t_c/t_{TOT} от U для ЖК слоя толщиной $d = 2.85$ мкм, рассчитанные с учетом падения напряжения на PI слоях (сплошные линии).

Наиболее интересной особенностью электрооптического отклика RPA-слоев холестерических ЖК с большим естественным шагом спирали, предсказываемой эквидоменной теорией, является электроуправляемая оптическая активность, объясняемая изменением отношения величин a' и b' (2), сопровождающим трансформацию поля директора под действием приложенного электрического напряжения. Согласно этой теории, при падении на слой линейно поляризованного света нерассеянная компонента прошедшего света должна иметь линейную поляризацию, при этом угол ρ между плоскостями поляризации нерассеянной компоненты и падающего света должен зависеть от величины приложенного к слою напряжения U . Эксперименты показали, что этот электрооптический эффект при определенном сочетании параметров ЖК слоя действительно может наблюдаться на холестерических RPA-слоях. Нами были исследованы три холестерические ячейки с различной толщиной ЖК слоя ($d \approx 3, 4$ и 5 мкм). Описанный эффект электроуправляемой оптической активности наблюдался только на ячейке с $d \approx 3$ мкм. На рис. 9 представлена экспериментальная кривая $\Delta\rho(U) = \rho(U) - \rho(0)$ для этой ячейки. На этом же рисунке представлена соответствующая теоретическая кривая. Близость теоретической и экспериментальной кривых позволяет говорить в данном случае не только о качественном, но и о неплохом количественном соответствии теории и эксперимента. Электрооптический отклик холестерических RPA ячеек с большей толщиной ЖК слоя принципиально отличался от предсказываемого эквидоменной моделью. Оказалось, что для этих ячеек существует определенный диапазон напряжений, при которых при падении на ячейку линейно поляризованного квазимонохроматического света нерассеянная компонента прошедшего через ячейку света имеет не линейную, а эллиптическую поляризацию, что принципиально противоречит эквидоменной модели.

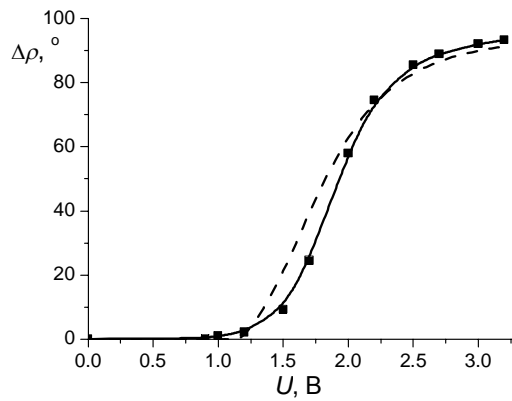


Рис. 9. Экспериментальная и теоретическая зависимости угла поворота плоскости поляризации $\Delta\rho$ для холестерической RPA ячейки с номинальной толщиной ЖК слоя 3 мкм от приложенного напряжения. Значками и сплошной линией показана экспериментальная зависимость, пунктиром – теоретическая.

Специфические электрооптические свойства нематических RPA ячеек, в принципе, позволяют использовать такие ячейки в качестве управляемых светофильтров и диффузоров. В разделе 3.4 рассматриваются некоторые аспекты, связанные с этими возможными применениями RPA ячеек. Отмечена аналогия формы спектров коллимированного пропускания нематических RPA ячеек (CSS-фильтров) и одноступенчатых интерференционно-поляризационных (ИП) фильтров на ЖК. Но CSS-фильтры не требуют использования поляризаторов и имеют значительно более высокое пропускание в спектральных максимумах, чем ИП-фильтры, а также являются поляризационно-независимыми, то есть коэффициент пропускания фильтра не зависит от состояния поляризации падающего света. Собирая стопу из нескольких нематических RPA ячеек с различной толщиной ЖК слоев, выбираемой в соответствии с алгоритмом, используемым в фильтрах Лио, для того чтобы подавить нежелательные пики пропускания, можно получить управляемый комбинированный CSS-фильтр с изолированными полосами пропускания. Показано, что нематические RPA-слои могут быть эффективно использованы в качестве управляемых диффузоров для квазимонохроматических пучков, позволяющих устанавливать нужное соотношение рассеянной и нерассеянной компонент. Одним из потенциальных достоинств таких устройств является относительно широкий рабочий спектральный диапазон, по существу совпадающий с областью прозрачности элементов ЖК ячейки. При использовании обычных материалов для элементов ЖК ячейки (силикатное стекло, ITO и т.д.) рабочий диапазон таких устройств может охватывать область длин волн от 380 до 1500 нм. Представлены результаты экспериментальной оценки времен отклика нематических RPA-слоев.

В главе 4 приведены результаты микроскопических исследований RPA-слоев, полученные с использованием системы поляризационного картографирования, разработанной в Саратовском государственном университете. Макроскопические исследования выявили некоторые детали, которые не могут быть объяснены в рамках эквидоменной модели, и в той или иной степени свидетельствуют о дефектности структуры ЖК слоя. Под «дефектностью» здесь понимается не только присутствие обычных дефектов типа дисклинаций, но и любые отклонения реальной структуры ЖК слоя от эквидоменной. Основной целью микроскопических исследований было установить характер дефектности структуры нематических RPA-слоев в отсутствие приложенного напряжения и причины повышения дефектности структуры при приложении напряжения.

Картографирование показало, что в отсутствие внешнего электрического поля основное отличие структуры реальных нематических RPA-слоев от эквидоменной состоит в том, что в доменах реальной структуры наблюдается небольшая вариация азимутальной ориентации локальной оптической оси при движении вдоль нормали к границам слоя (т.е. локальная закрученность). Установлено, что для всех исследованных нематических слоев локальный угол закрученности Φ варьируется в пределах от -25° до 25° , а среднее значение Φ близко к нулю. Показана корреляция между высотой максимумов коллимированного пропускания и шириной функции распределения Φ .

Наряду с обычными для нематиков дисклинациями полуцелой и целой силы, в исследуемых слоях наблюдались узкие «дефектные» полосы с поворотом директора на 90° , разделяющие области с ортогональной ориентацией директора. Присутствие этих полос свидетельствует о реализации так называемого эффекта поверхностной памяти (surface memory effect), обусловленного адсорбцией молекул ЖК на поверхности полимера. Последнее объясняет и тот экспериментально установленный факт, что для нематических RPA-слоев азимутальная ориентация, форма и размеры доменов под действием электрического поля изменяются очень мало.

Микроскопические исследования показали, что, находясь под действием электрического поля, нематические RPA-слои сохраняют структуру близкую к эквидоменной, однако образуются новые дефекты. Наиболее существенно на макроскопические оптические характеристики влияют образующиеся под действием поля стационарные стенки Брохарда-Легера (БЛ) – полосы плавного перехода между доменами с противоположным наклоном директора через квазипланарную или квазигомеотропную структуру. В таблице 1 представлены карты распределения приведенной фазовой задержки Δ , для одной из областей нематической ячейки с $d \approx 5$ мкм, сделанные в отсутствие напряжения и при напряжениях 1.3 и 1.7 В для двух длин волн.

Таблица 1. Карты распределения приведенной фазовой задержки Δ одной из областей нематического слоя с $d \approx 5$ мкм при различных значениях приложенного напряжения U для разных длин волн λ

U , В	Фотография в скрещенных поляризаторах	Δ	
		$\lambda = 466$ нм	$\lambda = 544$ нм
0			
1.3			
1.7			

$\Delta, ^\circ$

200
190
180
170
160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

Приведенная фазовая задержка связана с параметрами ЖК слоя следующим образом $\Delta = |2\pi m \pm 2\pi \Delta n d / \lambda|$, где m – некоторое целое число. Сравнивая представленные карты можно заметить, что для обеих длин волн в центральной части стенок БЛ, реализующихся при напряжениях 1.3 и 1.7 В, приведенная фазовая задержка остается такой же, как при отсутствии напряжения на ЖК слое. Это свидетельствует о том, что конфигурация директора в центре этих стенок близка к планарной. Поскольку оптические свойства ЖК слоя в пределах стенок БЛ сильно отличаются от свойств окружающих их областей, на этих стенках должно происходить достаточно сильное рассеяние света. А так как они занимают значительную площадь ЖК слоя, их присутствие должно заметно понижать коллимированное пропускание. Это позволяет сделать вывод, что основной причиной понижения максимумов коллимированного пропускания при наложении на ЖК слой электрического поля является рассеяние света на стенках БЛ. Продемонстрировано, что существование стационарных стенок БЛ связано с присутствием в исходной доменной структуре дисклинаций полуцелой силы.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты:

1. Проведено детальное исследование специфических макроскопических оптических свойств RPA-слоев нематических и холестерических (с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали) жидких кристаллов, связанных с селективным рассеянием, обусловленным их квазиэквидоменной структурой.
2. Выявлен квазипериодический характер спектров коллимированного пропускания нематических RPA-слоев и показана независимость этих спектров от состояния поляризации падающего света. Установлено, что положение максимумов и минимумов коллимированного пропускания мелкодоменных нематических слоев, проявляющих CSS, с достаточной точностью предсказывается эквидоменной теорией.
3. Экспериментально установлено, что в отсутствие внешнего электрического поля при нормальном падении линейно поляризованного света на RPA-слой холестерического ЖК с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали нерассеянная компонента прошедшего света имеет линейную поляризацию; направление поляризации нерассеянной компоненты сильно зависит от длины волны и толщины слоя ЖК; эффект поворота плоскости поляризации хорошо описывается в рамках эквидоменной теории.
4. Экспериментально показано, что наложение на нематические RPA-слои, проявляющие CSS, электрического напряжения, превышающего по величине пороговое напряжение перехода Фредерикса для планарных структур, приводит к смещению экстремумов коллимированного пропускания и понижению высоты максимумов коллимированного пропускания; величина смещения экстремумов зависит от величины приложенного напряжения. Показаны возможности использования ЖК ячеек, проявляющих данный эффект, в качестве поляризационно-независимых перестраиваемых спектральных фильтров и поляризационно-независимых управляемых диффузоров.
5. Экспериментально показано, что в тонких RPA-слоях холестерических ЖК с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали возможна реализация режима, когда плавное изменение величины электрического напряжения, приложенного к ЖК слою, приводит к плавному повороту плоскости поляризации нерассеянной компоненты прошедшего света с сохранением его линейной поляриза-

ции. Показано, что данный эффект также достаточно хорошо описывается эквидоменной теорией.

6. Выявлены особенности микроструктуры нематических RPA-слоев, определяющие особенности спектров коллимированного пропускания этих слоев и трансформации этих спектров под действием внешнего электрического поля. Установлено, что отклонение высоты максимумов коллимированного пропускания от предсказываемой эквидоменной моделью для таких слоев в отсутствие приложенного напряжения объясняется присутствием дисклинаций и пространственно-зависимой локальной закрученностью поля директора по координате, перпендикулярной границам ЖК слоя. Установлено, что понижение максимумов коллимированного пропускания при наложении напряжения на ЖК слой связано, главным образом, с возникновением под действием поля стационарных стенок Брохарда-Легера, стабилизированных дисклинациями полупространственной силы.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Sherman M.M., Yakovlev D.A. Optical properties of multi-domain anisotropic layers with random in-plane orientation of domains // Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6536. – P. 65360H-1–65360H-6.
2. Шерман М.М., Яковлев Д.А. Особенности пропускания света монослоем одинаковых по структуре анизотропных доменов со случайной азимутальной ориентацией // Опт. Спектр. – 2010. – Т. 109, № 2. – С. 206–215.
3. Шерман М.М., Яковлев Д.А. Спектральная селекция и оптическая активность мультидоменных анизотропных слоев // Проблемы оптической физики: материалы 11-ой Междунар. науч. школы по оптике, лазерной физике и биофизике, Саратов, 2008. – С. 118–123.
4. Шерман М.М., Яковлев Д.А. Электроуправляемый диффузор на основе нематических мультидоменных слоев // Сб. докл. 19-й Всерос. конф. «Лазеры. Измерения. Информатика», СПб., 2009. – Т. 2. – С. 225–239.
5. Sherman M.M., Yakovlev D.A., Tao D., Murauski A., Chigrinov V.G. Electrically controlled transmission spectral filters for collimated beams on the base of nematic layers with schlieren structure. // 22nd International Liquid Crystal Conference: abstr. – Korea, 2008. – P. 211.
6. Шерман М.М., Эффект электроуправляемой спектральной фильтрации на мультидоменных жидкокристаллических слоях // Научные исследования студентов: материалы итоговой студ. конф., Саратов, 2008. – С. 48–49.
7. Sherman M.M. Electrically controlled diffuser on the base of multi-domain nematic layers for laser beams // OPTO Meeting for Young Researchers' 2010: abstr. – Poland, 2010. – P. 25.
8. Sherman M.M. Macro- and microscopic properties of multidomain nematic liquid crystals with random planar orientation // International OSA Network of Students 8: abstr. – Russia, 2010. – P. 41.