

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

**Свойства рассеяния света анизотропными слоями, состоящими из
квазиподобных доменов со случайной азимутальной ориентацией**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса

направления 03.06.01 «Физика и астрономия»

физического факультета

Яковлева Дмитрия Дмитриевича

Научный руководитель

заведующий кафедрой оптики и биофотоники

д.ф.-м.н., профессор

_____ Тучин В.В.

Саратов 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время методы светорассеяния прочно зарекомендовали себя как удобный инструмент при изучении многих сложных систем. Методы теории рассеяния, позволяющие учесть оптическую анизотропию (двулучепреломление) среды, широко используются при изучении жидких кристаллов, полимеров, биотканей, а также при создании новых полимерных, жидкокристаллических (ЖК) и композитных материалов и практических устройств на их основе. Особо следует отметить исключительно важную роль, которую сыграли методы теории рассеяния, основанные на применении приближения однократного рассеяния, при прояснении природы ЖК состояния и изучении фазовых переходов в мезоморфных средах. Часто при изучении жидких кристаллов и полимеров условия эксперимента делают адекватной постановку задачи о рассеянии на слое жидкого кристалла или полимерной пленке как задачи о дифракции светового пучка на слое сплошной локально одноосной среды с независимыми от пространственных координат главными показателями преломления и почти всюду плавно меняющейся в пространстве ориентацией оптической оси, причем это изменение носит случайный характер при движении вдоль направлений, параллельных границам слоя, и почти регулярный характер при движении в направлении, перпендикулярном границам слоя. Примером реальных систем, допускающих такое модельное описание, являются нематические и холестерические слои с так называемой шпирен-текстурой, которая характерна как для низкомолекулярных ЖК, так и для ЖК-полимеров. Относительно недавно было обнаружено, что при определенных условиях на такого рода слоях можно наблюдать ряд интересных спектральных и поляризационных эффектов, связанных с рассеянием света [1,2], которые не могут быть объяснены в рамках традиционного подхода к рассмотрению рассеяния на таких структурах, основанного на использовании приближения Релея-Ганса-Дебая. Опыты проводились на тонких мелкодоменных нематических и холестерических ЖК слоях со случайными планарными граничными условиями (RPA (random planar alignment) слоях), которые реализуются в ЖК ячейках с ненатертыми полимерными ориентирующими слоями. В работах [1,2] было продемонстрировано, что нематические RPA слои могут обладать смешанным, диффузно-направленным, характером пропускания с ярко выраженной квазипериодической зависимостью коэффициента пропускания нерассеянной компоненты (коллимированного пропускания) от частоты падающего света (спектрально-селективное рассеяние). Ещё одним интересным эффектом является гигантское

оптическое вращение, наблюдавшееся на холестерических RPA слоях с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали ЖК-материала [1,2]. В работе [1] основные особенности спектрально-селективного рассеяния и гигантского оптического вращения были объяснены в рамках простого теоретического подхода, в котором RPA-слой представлялся как монослой доменов, идентичных по структуре, но имеющих случайную азимутальную ориентацию (*эквидоменный слой*). Наличие и свойства нерассеянной компоненты были объяснены присутствием у матриц Джонса, характеризующих пропускание света микродоменом, составляющей, инвариантной относительно азимутальных поворотов этого домена. В дальнейшем мы будем называть этот теоретический подход *эквидоменной теорией*. При дальнейшем исследовании RPA слоев было экспериментально установлено, что возможность наблюдать некоторые из указанных эффектов сохраняется и при значительных отклонениях структуры ЖК-слоя от эквидоменной; уменьшается только степень проявления этих эффектов. Например, было показано [2], что приложение к нематическим RPA слоям электрического напряжения, превышающего по величине пороговое напряжение перехода Фредерикса для планарных структур, приводит к смещению экстремумов и понижению высоты максимумов коллимированного пропускания. При этом величина смещения экстремумов достаточно хорошо предсказывается эквидоменной теорией [2]. Понижение максимумов коллимированного пропускания и, соответственно, усиление рассеяния на длинах волн максимумов коллимированного пропускания, было объяснено на качественном уровне увеличением отклонения структуры ЖК слоя от эквидоменной, что было подтверждено данными о структуре RPA слоев под действием напряжения, полученными методами поляризационной микроскопии. Таким образом, будучи подвергнутым действию электрического поля, слой ЖК оставался квазиэквидоменным, однако степень подобия его элементов уменьшалась, и это в явном виде проявилось в его свойствах рассеяния. В случае RPA-слоев холестерических ЖК с большим по сравнению с длиной волны естественным шагом спирали в [2] была продемонстрирована возможность реализации 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, что находится в хорошем соответствии с предсказаниями эквидоменной теории [2]. Однако для некоторых из исследованных образцов (образцы отличались толщиной ЖК слоя), которые проявляли гигантское оптическое вращение в отсутствие напряжения, существовал определенный диапазон напряжений, в котором при

падении на слой линейно поляризованного квазимонохроматического света нерассеянная компонента прошедшего через слой света имела не линейную, а эллиптическую поляризацию, что противоречит предсказаниям эквидоменной теории и также свидетельствует о существенном отклонении структуры слоя от эквидоменной. Одной из целей настоящей работы являлась разработка теоретического аппарата, позволяющего предсказывать изменения свойств рассеяния РРА-слоев при уменьшении степени подобия составляющих их элементов. По своей сути указанные оптические эффекты представляют собой явления одного класса. Они наблюдаются в условиях, когда радиус когерентности падающего светового пучка во много раз превышает радиус корреляции ориентации локальных характеристических осей структуры в плоскости слоя, и обусловлены интерференцией вторичных волн, выходящих из разных областей слоя с площади, охватывающей очень большое количество доменов. Когерентность этих вторичных волн в значительной степени определяется структурным подобием доменов, и именно подобие является ключевым условием для проявления этих эффектов. Это дает возможность использовать эти эффекты для получения информации о структуре слоя. Развитие адекватной теории явлений этого класса, нацеленной на выявление закономерностей рассеяния света на квазиэквидоменных слоях разных типов и разработку общих принципов и подходов, которые бы позволили использовать эти закономерности для характеристики структуры оптически анизотропных объектов разной природы, представляется нам актуальной задачей.

1. Шерман, М. М. Особенности пропускания света монослоем одинаковых по структуре анизотропных доменов со случайной азимутальной ориентацией / М. М. Шерман, Д. А. Яковлев // *Опт. Спектр.* – 2010. – Т. 109. – С. 206–215.

2. Шерман, М. М. Электрооптические свойства жидкокристаллических слоев со случайными планарными условиями на границах: дис. канд. физ.- мат. наук / М. М. Шерман. – Саратов, 2012. – 186 с.

Целью данной работы явилась разработка статистической теории рассеяния света на квазиэквидоменных слоях, соотносящей структурные свойства слоев с их свойствами рассеяния и позволяющей учесть отклонения структуры случайно-неоднородных анизотропных слоев от эквидоменной в реальных ситуациях.

Основными задачами данной работы являются:

1. Разработать теоретический подход, позволяющий при известных статистических характеристиках структуры слоя для случая освещения слоя хорошо коллимированным пучком в нормальном направлении

предсказать спектральные, поляризационные и угловые характеристики выходящего из квазиэквидоменного слоя света.

2. Установить характер связи формы угловых спектров линейно поляризованных компонент света, рассеянного на статистически вращательно-инвариантных двулучепреломляющих слоях, с корреляционными структурными характеристиками слоев при нормальном падении света.
3. Выявить характерные особенности рассеяния света на эквидоменных и квазиэквидоменных мозаичных слоях с хиральными и нехиральными доменами для случая нормального падения света.
4. Экспериментально оценить статистические структурные параметры реальных холестерических и нематических RPA-слоев, требующиеся для численного моделирования оптических характеристик этих слоев в соответствии с разрабатываемым подходом, методами поляризационной микроскопии.
5. Экспериментально проверить теоретические предсказания, полученные в рамках разрабатываемого подхода.
6. Сравнить теоретические результаты с известными из литературы экспериментальными данными. Оценить возможность интерпретации литературных экспериментальных данных.
7. Оценить границы применимости приближения прямых лучей при рассмотрении задачи о дифракции света на неоднородных двулучепреломляющих слоях.

Объект исследования: оптические свойства неоднородных анизотропных сред.

Предмет исследования: светорассеивающие свойства слоев двулучепреломляющих материалов со случайной вариацией ориентации локальных оптических осей.

Методология и методы исследования.

Используемый в работе теоретический подход основан на методе обобщенных матриц Мюллера и приближении прямых лучей.

Один из разделов главы 1 посвящен оценке границ приближения прямых лучей. Эти границы оценивались путем сравнения решений для двулучепреломляющих дифракционных решеток различного типа, полученных в приближении прямых лучей, с решениями, полученными более точным методом – модальным методом решеток.

Основные теоретические результаты настоящей работы были проверены экспериментально. Проверка проводилась на образцах RPA слоев: на двух ЖК ячейках, заполненных нематическим ЖК E7, с толщиной ЖК слоя $d \approx 3$ мкм и 5 мкм, и трех ЖК ячейках, заполненные холестерическим ЖК-материалом, представляющим собой смесь нематика E7 и холестерической добавки ZLI-811 (~0.7%, левая), с толщиной ЖК слоя $d \approx 3, 4$ и 5 мкм. Естественный шаг спирали холестерического ЖК-материала составлял порядка 11 мкм. Ячейки были собраны из промышленных стеклянных пластин с ITO покрытием. Случайная планарная ориентация ЖК обеспечивалась ненатертыми полиимидными слоями (полиимид PIA 3744, Chisso LIXON aligner), нанесенными на поверхность ITO слоев методом центрифугирования. После нанесения полиимидные слои не подвергались какой-либо обработке, способной привести к появлению выделенного направления азимутальной ориентации ЖК молекул в макроскопическом масштабе. Ячейки заполнялись ЖК материалом в изотропной фазе, чтобы предотвратить ориентацию потоком. После охлаждения на ЖК ячейку подавалось напряжение 4 В, после отключения которого в ячейке реализовывалось некоторое стабильное состояние, которое воспроизводилось при следующих переключениях напряжения. Наличие такого состояния говорит о реализации эффекта поверхностной памяти в слое. При изучении электрооптического отклика ячеек к электродам ячейки прикладывалось переменное напряжение в диапазоне 0–3.2 В (частота 1 кГц).

Для характеристики микроструктуры ЖК слоев в экспериментальных ячейках использовался метод микроскопического поляризационного картографирования.

При экспериментальном измерении индикатрис рассеяния образцов RPA слоев ЖК ячейка освещалась коллимированным пучком от лазерного источника. Интенсивность рассеянной компоненты регистрировалась с помощью фотодиода. Сигнал фотодиода усиливался усилителем тока и регистрировался микроамперметром. При измерении угловых зависимостей интенсивности фотодиод перемещался в плоскости, перпендикулярной пучку. Использовались два лазерных источника излучения: гелий-неоновый лазер ЛГН-207А с длиной волны 632.8 нм и твердотельный лазер с диодной накачкой Optronic YLM-532/SLN-30 с длиной волны 532 нм. В измерениях с использованием гелий-неонового лазера между лазером и ячейкой располагались телескоп и диафрагма. Диаметр пучка на ячейке при использовании обоих лазеров составлял примерно 2 мм.

Для характеристики состояния поляризации нерассеянной компоненты прошедшего через ЖК ячейку света использовался разработанный автором

метод измерения спектров параметров Стокса на установке, использующей схему «линейный поляризатор – образец – компенсатор – линейный анализатор».

Исследование состояние поляризации рассеянной компоненты проводилось на установке, использующей схему «линейный поляризатор – компенсатор – образец – компенсатор – линейный анализатор».

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

Научная новизна работы:

1. Разработан новый эффективный теоретический подход к задаче о рассеянии света на случайно-неоднородных анизотропных слоях в условиях нормального освещения слоя коллимированным световым пучком, позволяющий учесть кооперативные эффекты при рассеянии света на таких слоях и связать статистические структурные характеристики слоя с его характеристиками рассеяния.
2. Впервые получено явное выражение для обобщенной матрицы Мюллера пропускания квазиэквидоменного слоя, позволяющее разделить вклад флуктуаций ориентации характеристических осей доменов и вклад флуктуаций структуры доменов в спектральные и поляризационные свойства нерассеянной компоненты и угловые и поляризационные свойства рассеянной компоненты прошедшего поля.
3. Впервые в терминах статистической оптики интерпретированы селективное рассеяние света на нематических RPA слоях и эффект гигантского оптического вращения для холестерических RPA слоев с естественным шагом спирали, существенно превосходящим длину волны падающего света.
4. Теоретически предсказан и экспериментально подтвержден эффект инверсии поляризации при рассеянии на статистически вращательно-инвариантном мозаичном слое света с круговой поляризацией.
5. Экспериментально обнаружены и теоретически объяснены проявления электроиндуцированного циркулярного дихроизма RPA слоями непоглощающих холестерических ЖК с естественным шагом спирали, существенно превосходящим длину волны падающего света.
6. Разработана оригинальная методика, позволяющая на основе данных микроскопического поляризационного картирования оценивать степень

подобия доменов в сложно-неоднородных анизотропных слоях и степень их ориентационной упорядоченности.

7. Впервые показано, что в случае статистически вращательно-инвариантных эквидоменных слоев без локальных поляризационно-зависимых потерь форма углового распределения ортогонально поляризованных составляющих рассеянной компоненты не зависит от структуры домена-прототипа.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

- Результаты, полученные в ходе исследований, существенно расширяют представления об особенностях рассеяния света на сложно неоднородных слоях оптически анизотропных материалов.
- Теоретические результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы при анализе экспериментальных данных и выработке условий эксперимента для характеристики случайно-неоднородных анизотропных сред методами малоуглового рассеяния света. Выявленные особенности рассеяния света на мозаичных двулучепреломляющих слоях могут быть использованы при разработке эффективных оптических методов исследования и характеристики слоев анизотропных материалов.
- Знание закономерностей взаимодействия света со случайно-неоднородными двулучепреломляющими средами также важно с точки зрения применения их специфических свойств рассеяния в оптических устройствах. Теоретический подход, разработанный в ходе исследований, может быть использован при разработке новых электрооптических устройств на основе случайно-неоднородных жидкокристаллических слоев.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В случае нормального падения коллимированного светового пучка на мозаичный двулучепреломляющий слой соотношение между спектральными и поляризационными характеристикам нерассеянной компоненты света, прошедшего мозаичный двулучепреломляющий слой, и спектральными и поляризационными характеристиками падающего пучка, в пределах применимости приближения прямых лучей могут быть оценены по значению матрицы, получаемой усреднением матрицы Джонса локального пропускания слоя по площади слоя.

2. Для статистически вращательно-инвариантных эквидоменных слоев без локальных поляризационно-зависимых потерь в условиях нормального освещения слоя коллимированным пучком поляризационные свойства рассеянной компоненты зависят от свойств корреляции ориентации доменов и от состояния поляризации падающего света, но не зависят от внутренней структуры доменов.
3. При рассмотрении рассеяния света на статистически вращательно-инвариантном эквидоменном слое без локальных поляризационно-зависимых потерь при нормальном падении света, форма индикатрис рассеяния может быть предсказана по значениям среднего по площади слоя косинуса удвоенной разности значений угла азимутальной ориентации характеристической оси доменов в разных точках слоя как функции от расстояния между этими точками.
4. При нормальном падении на случайный статистически вращательно инвариантный эквидоменный слой коллимированного светового пучка с правой (левой) круговой поляризацией рассеянная компонента прошедшего слоя света имеет левую (правую) круговую поляризацию.
5. Статистически вращательно инвариантные мозаичные слои, состоящие из хиральных доменов, в отсутствие поляризационно-зависимого отражения и поглощения в условиях нормального освещения слоя коллимированным пучком не могут проявлять кругового дихроизма в отсутствие вариации поляризационно-среднего фазового сдвига по площади слоя. Наличие вариации поляризационно-среднего фазового сдвига по площади слоя и хиральность слоя как системы доменов являются необходимыми условиями проявления кругового дихроизма такими слоями.

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

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 определено понятие статистически вращательно инвариантного слоя как слоя, светорассеивающие свойства которого не зависят от его азимутальной ориентации. Представлен краткий обзор оптических эффектов, наблюдавшихся при рассеянии света на статистически вращательно-инвариантных слоях низкомолекулярных и полимерных ЖК. Введено понятие квазиэквидоменного слоя как мозаичного слоя, состоящего из доменов, являющихся точной или приближенной копией одного и того же домена-прототипа, имеющих разную азимутальную ориентацию их

характеристических осей. Рассмотрены эквидоменные и квазиэквидоменные модели случайно-неоднородных ЖК слоев. Описан метод обобщенных матриц Мюллера и приближение прямых лучей, на которых основан теоретический подход, предложенный в главе 2. Кроме того, рассматриваются основы используемых в настоящей работе экспериментальных методов, использующих схему «поляризатор-образец-анализатор», в частности, метода микроскопического поляризационного картирования.

В главе 2 представлен новый теоретический подход к задаче о рассеянии света на мозаичных двулучепреломляющих слоях. С помощью этого подхода установлено соотношение формы угловых спектров линейно поляризованных компонент света, рассеянного на статистически вращательно-инвариантных мозаичных двулучепреломляющих слоях с корреляционными структурными характеристиками слоев. Получено удобное аналитическое представление обобщенной матрицы Мюллера для эквидоменных и квазиэквидоменных слоев без локальных поляризационно-зависимых потерь. Это представление использовано для выявления особенностей рассеяния света на статистически вращательно-инвариантных эквидоменных слоях. С помощью численных экспериментов оценены границы применимости приближения прямых лучей, используемого в рамках предлагаемого подхода.

В главе 3 проведено сравнение характеристик рассеяния реальных нематических RPA слоев, структура которых близка к эквидоменной, с предсказываемыми теорией, предложенной в главе 2, для эквидоменных слоев с нехиральными доменами. Теоретически исследовано влияние отклонений структуры реальных нематических RPA слоев от эквидоменной на форму спектров направленного пропускания слоев и значения коэффициента направленного пропускания слоев в спектральных максимумах.

В главе 4 приведены результаты детального экспериментального исследования электрооптических характеристик холестерических RPA слоев с шагом спирали, большим по сравнению с длинами волн спектральных компонент падающего света (LPCRPA (long-pitch cholesteric RPA) слоев). Показано, что LPCRPA слои вне полос поглощения ЖК материала могут проявлять круговой дихроизм. С помощью микроскопического поляризационного картирования установлено, что в условиях, когда при падении на LPCRPA слой неполяризованного пучка нерассеянная компонента является циркулярно поляризованной или почти циркулярно поляризованной, структура слоя сильно отклоняется от эквидоменной. Установлены структурные свойства, необходимые для проявления кругового дихроизма неэквидоменными слоями. Проведена экспериментальная проверка вывода относительно независимости состояния поляризации рассеянной компоненты

от структуры домена-прототипа для эквидоменных слоев, полученного в главе 2.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Полный объем работы составляет 234 страницы, включая 69 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 158 наименований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по данной работе заключаются в следующем:

1. Разработана статистическая теория рассеяния света на мозаичных двулучепреломляющих слоях. Показано, что разработанная теория хорошо предсказывает характеристики рассеяния RPA слоев исходя из их микроструктурных свойств.
2. Получено удобное представление обобщенной двухточечной матрицы Мюллера, позволяющее разделить вклад флуктуаций ориентации характеристических осей доменов и вклад флуктуаций структуры доменов в общую картину рассеяния, и в ряде случаев приводящее к удобным аналитическим формулам.
3. Найден общий вид средней обобщенной матрица Мюллера $M_A(\mathbf{R})$ статистически инвариантных квазиэквидоменных слоев и выявлены ограничения на вид картин рассеяния для таких слоев. Установлена форма функции $M_A(\mathbf{R})$, при которой картины рассеяния H_V и V_V обладают круговой симметрией, а также форма, при которой эти картины рассеяния являются инвариантными относительно азимутального поворота на 90° . Для мозаичных двулучепреломляющих слоев, состоящих из однородных фрагментов с разной азимутальной ориентацией оптической оси, найдены статистические структурные свойства слоев, при которых картины рассеяния H_V и V_V будут обладать круговой симметрией, а также статистическая структурная характеристика, ответственная за ориентацию четырехлистников рассеяния относительно направления поляризации падающего света на H_V - и V_V -дифрактограммах.
4. Показано, что если на эквидоменный слой, не вносящий поляризационно зависимых потерь, в нормальном направлении падает циркулярно поляризованный пучок, то рассеянная компонента прошедшего света тоже является циркулярно поляризованной, но с противоположным направлением вращения вектора напряженности электрического поля.
5. Получено аналитическое выражение для коэффициента направленного пропускания статистически нехиральных мозаичных слоев, позволяющее объяснить отклонения экспериментальных спектральных зависимостей коэффициента направленного пропускания нематических RPA слоев от предсказываемых эквидоменной теорией.

6. Экспериментально установлено, что LPCRPA слои могут проявлять круговой дихроизм вне полос поглощения ЖК материала и вне полос брэгговского отражения. В этом случае при нормальном падении на слой неполяризованного пучка нерассеянная компонента прошедшего света может иметь частичную круговую поляризацию. Доля циркулярно поляризованной составляющей может достигать 100%.
7. В рамках разработанного теоретического подхода установлены условия проявления кругового дихроизма мозаичными двулучепреломляющими слоями в отсутствие локальных поляризационно-зависимых потерь. Найдены статистические структурные свойства слоя, при которых степень проявления кругового дихроизма является максимальной.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на **конференциях**:

- Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике (Saratov Fall Meeting' 2012) (Саратов, РФ, 2012)
- Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике (Saratov Fall Meeting' 2013) (Саратов, РФ, 2013);
- Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике (Saratov Fall Meeting' 2014) (Саратов, РФ, 2014);
- Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике (Saratov Fall Meeting' 2015) (Саратов, РФ, 2015);
- Международной конференции молодых ученых и специалистов (Оптика - 2015) (Санкт-Петербург, РФ, 2015);
- Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике (Saratov Fall Meeting' 2016) (Саратов, РФ, 2016);
- Европейской конференции по жидким кристаллам (14th European Conference on Liquid Crystals) (Москва, РФ, 2017);
- Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике (Saratov Fall Meeting' 2017) (Саратов, РФ, 2017);
- Международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике (Saratov Fall Meeting' 2018) (Саратов, РФ, 2018).

Публикации автора по теме диссертации в журналах, включенных в перечень ВАК:

1. Yakovlev, D. D. Electrically induced circular dichroism of multidomain layers of a long-pitch cholesteric liquid crystal / D. D. Yakovlev, M. M. Sherman, D. A. Yakovlev // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 9031. – P. 90311B-1–90311B-6.
2. Yakovlev, D. D. Characterization of and correcting for imperfections of compound zero-order waveplates for spectral polarization measurements. // D. D. Yakovlev // Proc. SPIE. – 2014. – Vol. 9031. – P. 90311C-1–90311C-5.
3. Yakovlev, D. D. Electrically-controlled scattering of light by nematic liquid crystal layers with random planar alignment: transformation of the scattered component / D. D. Yakovlev, V. M. Ryabtsev, M. M. Sherman, D. A. Yakovlev // Proc. SPIE. – 2015. – Vol. 9448. – P. 94482F-1–94482F-5.
4. Яковлев Д. Д. Картины рассеяния ортогонально поляризованных компонент света для статистически вращательно-инвариантных мозаичных двулучепреломляющих слоев / Д. Д. Яковлев, Д. А. Яковлев // Опт. Спектр. – 2019. – Т. 126. – С. 324–335.
5. Яковлев Д. Д. Особенности структуры статистически вращательно-инвариантных мозаичных двулучепреломляющих слоев, проявляющих круговой дихроизм / Д. Д. Яковлев // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. – Т.19, №3 – 2019 (принята к печати).
6. Яковлев Д. Д. Границы применимости приближения прямых лучей при моделировании оптических свойств жидкокристаллических дифракционных решеток / Д. Д. Яковлев, Д. А. Яковлев // КО. – 2019 (направлена в печать 16.04.19).
7. Yakovlev D. D. Features of light scattering on mosaic layers composed of structurally similar birefringent domains / D. D. Yakovlev, M. M. Sherman, A. A. Murauski, D. A. Yakovlev // J. Mod. Opt. – 2019 (направлена в печать 13.03.19).

Прочие публикации по тематике диссертации:

1. Яковлев, Д. Д. Оптическая характеристика структуры случайно-неоднородных жидкокристаллических слоев / Д. Д. Яковлев, Д. А. Яковлев //Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015», СПб:Университет ИТМО, 2015 – С. 25–28.
2. Яковлев, Д. Д. Картины рассеяния ортогонально поляризованных компонент света для статистически вращательно-инвариантных двулучепреломляющих фазовых экранов / Д. Д. Яковлев, Д. А. Яковлев // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2017: материалы Международного симпозиума и Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2017, Саратов: «Новый ветер», 2017 – С. 88–94.