

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Яковлева Дмитрия Дмитриевича «Свойства рассеяния света анизотропными слоями, состоящими из квазиподобных доменов со случайной азимутальной ориентацией», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

В диссертационной работе Яковлева Д.Д. исследуется рассеяние света в слое жидкого кристалла (ЖК), ориентация которого во всех трех измерениях неоднородна и может носить случайный характер. Большое внимание уделено теоретическим методам теории рассеяния. Основные выводы исследования подтверждены в диссертационной работе экспериментально. Для научного сообщества значительный интерес к жидкокристаллическим слоям связан прежде всего с возможностью их практического приложения для реализации широкого класса перестраиваемых оптических устройств на основе функциональных экранов и дифракционных решеток. Теория рассеяния анизотропных слоев успешно объясняет такие явления, как смешанное диффузно-направленное пропускание, почти синусоидальная зависимость коэффициента пропускания от частоты падающего излучения, поляризационная ортогональность падающей и рассеянной волн, гигантское оптическое вращение. Существующие аналитические подходы явно недостаточны сами по себе в силу сложности и многообразия жидкокристаллических структур. Универсальные численные пакеты на основе методов конечных элементов и конечных разностей, несмотря на доступность существенных вычислительных ресурсов, зачастую также не решают задачу с необходимой точностью, из-за неизбежных погрешностей сетки и нарушений граничных условий. На практике учет неоднородности по толщине слоя осуществляется прочно зарекомендовавшими себя матричными методами Джонса и Берремана. Периодическая неоднородность в плоскости слоя может учитываться через строгую теорию связанных волн (rigorous coupled-wave analysis, RCWA). Случайные неоднородности могут описываться в приближениях дискретных

диполей (discrete dipole approximation, DDA), Рэлея-Ганса-Дебая (совокупность элементарных анизотропных рассеивающих объемов), приближении прямых лучей (одномерная задача по толщине слоя), в недавно развитом приближении вращательно-инвариантных матриц Джонса (rotation-invariant Jones Matrix, RIJM). Актуальной остается задача учета нарушения упрощающих условий, в частности, для квазиподобных доменов со случайной азимутальной ориентацией. В связи с этим тема диссертационной работы Яковлева Д.Д., безусловно, актуальна.

Диссертация Яковлева Д.Д. состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, библиографического списка. Текст диссертации изложен на 174 страницах. Библиографический список включает 158 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, описана научная новизна диссертационной работы, указано количество публикаций по теме работы, а также приведен солидный список конференций с личным участием автора диссертации.

**В первой главе** проведен краткий анализ современных работ по теме диссертационного исследования. Сделан обзор объектов и методов исследования. Введен набор понятий, необходимый для понимания основного содержания. Сложные закономерности и формулы приводятся с отсылками на фундаментальные работы таких признанных ученых как В.Г. Чигринов, О.Е. Короткова, Э. Вольф и Л. Мандель.

**Вторая глава** посвящена теории и методам исследования рассеяния света на мозаичных оптически анизотропных слоях. Рассматривается случай нормального падения однородно поляризованного коллимированного пучка на тонкий неоднородный слой. При решении дифракционной задачи слой аппроксимируется плоским бесконечно протяженным амплитудно-фазовым экраном, характеристики локального пропускания которого соответствуют характеристикам пропускания рассматриваемого слоя в приближении прямых

лучей. Вводится ряд математических конструкций: обобщенная матрица Мюллера и корреляционные характеристики поля директора ЖК. В данной главе впервые анализируются светорассеивающие свойства вращательно-неинвариантных слоев с симметричным распределением директора. Показано, что при падении линейно поляризованного пучка с поляризацией в плоскости, параллельной или перпендикулярной оси преимущественной ориентации локальных оптических осей, нерассеянная компонента является линейно поляризованной. Если падающий свет линейно поляризован в плоскости, которая составляет угол  $45^\circ$  с x-осью директора, то нерассеянная компонента в общем случае эллиптически поляризована. Независимо от ориентации поляризации падающего света рассеянная компонента в общем случае является преимущественно линейно поляризованной. Если падающий свет поляризован циркулярно, то нерассеянная компонента в общем случае эллиптически поляризована, а рассеянная компонента имеет циркулярную поляризацию, ортогональную поляризации падающего света. С помощью компьютерного моделирования модальным методом решеток на распространенных примерах оценены границы применимости приближения прямых лучей для расчета оптических характеристик неоднородных оптически анизотропных слоев. Совокупность полученных результатов показывает новые способы управления угловым распределением, поляризацией и интенсивностью излучения, прошедшего через мозаичный оптически анизотропный слой.

**Третья глава** диссертации посвящена сравнению теоретических предсказаний с экспериментальными индикатрисами рассеяния, корреляционными характеристиками и спектрами для *нехиральных* нематических слоев со случайными планарными граничными условиями (random planar alignment, RPA), структура которых близка к эквидоменным. Образцы RPA-слоев представляли собою ЖК-ячейки с толщиной от 3 до 5 микрон, заполненные нематическим ЖК E7. Ячейки были собраны из стекла с ITO-покрытием и слоями ненатертого полиимида для случайной планарной ориентации. Масштаб гомогенизации для ЖК-слоев составлял приблизительно

200 мкм, а радиус корреляции – приблизительно 10 мкм. Теоретически исследовано влияние отклонений структуры RPA-слоев от эквидоменной на форму спектров пропускания, а также контраст спектральных максимумов. Уменьшение контраста при увеличении напряжения для нематических RPA-слоев может быть вызвано увеличением дисперсии разности фаз. Показано, что значительное увеличение дисперсии с увеличением напряжения при превышении порога Фредерикса происходит из-за возникновения стенок Брошара-Леже. Аналогичный подход может быть использован для количественного описания электроуправляемого селективного рассеяния композитными слоями с цилиндрическими каплями нематического ЖК-материала.

**В четвертой главе** исследовано рассеяние света на статистически вращательно-инвариантных, статистически *хиральных* мозаичных слоях с большим шагом спирали (long-pitch cholesteric RPA, LPC-RPA). Приведены результаты детального экспериментального исследования электрооптических характеристик LPC-RPA слоев. Показано, что LPC-RPA слои вне полос поглощения ЖК материала могут проявлять круговой дихроизм. Микроскопическое поляризационное картирование позволило установить, что структура слоя сильно отклоняется от эквидоменной в условиях, когда при падении на LPC-RPA слой неполяризованного пучка нерассеянная компонента является почти циркулярно поляризованной. 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.

**В заключении** четко сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Анализ диссертационной работы и публикации автора по теме исследования свидетельствуют об обоснованности **защищаемых научных положений**, выносимых автором на защиту. Ряд результатов обладает научной

**новизной.** Разработан новый теоретический подход к задаче о рассеянии света на случайно-неоднородных анизотропных слоях при нормальном падении на слой коллимированного светового пучка. Такой подход учитывает кооперативные эффекты при рассеянии света и связывает статистические структурные характеристики слоя с его характеристиками рассеяния. Обобщенная матрица Мюллера для пропускания квазиэквидоменного слоя позволяет разделить вклады флуктуаций ориентации доменов и флуктуаций структуры доменов. Статистически интерпретированы селективное рассеяние света, эффект инверсии поляризации для света с круговой поляризацией и эффект гигантского оптического вращения, наблюдаемый на холестерических RPA-слоях. Экспериментально обнаружен и объяснен эффект электроиндуцированного циркулярного дихроизма на RPA-слоях непоглощающего холестерика. При этом форма углового распределения ортогонально поляризованных составляющих рассеянной компоненты не зависит от структуры домена-прототипа.

#### **Практическая значимость работы**

Результаты исследований получены с использованием современного аппарата теоретической и математической физики. Проведено последовательное сопоставление теоретических результатов с данными, полученными экспериментально для углового рассеяния света. Высокая научная и практическая значимость полученных результатов обусловлена тем, что автором решены задачи эффективного управления спектральными и поляризационными характеристиками рассеяния на случайно-неоднородных двулучепреломляющих слоях, путем приложения к ним электрического напряжения. Проведенные в работе исследования открывают возможности для создания новых электрооптических устройств.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1) Имеются единичные замечания по объяснению приводимых графиков. Так на рисунке 1.7 (стр. 26) графики б и в полностью совпадают. В тексте это

совпадение не прокомментировано. На рис. 2.12 б пояснения 1-2-3 кажутся поставлены в обратном порядке (3-2-1). На стр. 100 по этому поводу отмечается: «критические значения периода решетки увеличиваются как с увеличением  $\Delta n$ , так и с увеличением  $d\lambda$  (это не является общим правилом; см., например, рис. 2.12)». Однако такая краткая констатация не снимает недоразумения.

2) Представляется не достаточно систематизированным разбросанное по главам определение математических обозначений, например,  $[T_{\text{balkq}}]_{jj}$ ,  $\phi_{\lambda 0,2}$ , а также десятка терминов и соответствующих аббревиатур, составленных из четырех-шести слов. Например, NPNTMB, NPUTMB, LPC-RPA, CMAO, TMAO, AMAO, SFLH. Четыре раза упоминается и вынесен в название пункта термин: «единая теория когерентности и поляризации», что, по всей видимости, является переводом на русский язык термина из названия статьи Э. Вольфа [120] «Unified theory of coherence and polarization», примененного в отношении случайных волновых пучков. Здесь уместно использовать более нейтральный перевод слова «unified» как «объединенная». Непринятый в оптике термин «толща» (стр. 92) уместно заменить количественным понятием «толщина». Впрочем, замечание отчасти компенсируется таблицей (автореферат, стр.12-13), где сделана попытка собрать вместе разбросанные по тексту названия и сокращения структур и методов: simple mosaic birefringent (SMB), non-planar mosaic birefringent (NPMB), statistically non-chiral mosaic (SNCM), nematic random planar alignment (NRPA), rotationally invariant Jones matrix (RIJM) и прочие.

3) В пункте 1.2.1. вводится понятие статистической вращательной инвариантности и дается описание характерных четырехлепестковых картин рассеяния  $\times$ -типа и  $+$ -типа в параллельных и скрещенных поляризаторах (рис. 1.4 на стр. 21), что находится в полном согласии с симметричными соображениями. Приводимые в дальнейшем формулы могут количественно описывать явление. Тем не менее у меня остается вопрос о физическом смысле и качественном объяснении картин рассеяния.

4) В пункте 1.2.2. описывается спектрально-селективное электроуправляемое рассеяние RPA-слоев и капсулированных ЖК-пленок. В диссертации упоминается об интерференционной природе явления, однако отсутствует качественное объяснение явления. В то же время в оригинальных работах автора, например, [Yakovlev D.D. et al 2019 JMO], синусоидальный характер спектральной селективности объясняется на примере целоволновой фазовой пластинки, образуемой ЖК-доменом. Это же замечание относится к качественному объяснению весьма любопытного рассеяния с поляризацией, ортогональной к поляризации падающего света.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и не вносят принципиальных изменений в Положения и Выводы, выносимые автором на защиту.

Результаты исследования, вошедшие в диссертацию, могут считаться достоверными на основании математически корректной проверки совпадения теоретических выводов и экспериментальных данных. Основные результаты опубликованы в ведущих журналах по оптике и апробированы на научных конференциях высокого уровня.

### **Заключение**

Считаю, что в целом диссертационная работа Яковлева Д.Д. «Свойства рассеяния света анизотропными слоями, состоящими из квазиподобных доменов со случайной азимутальной ориентацией» выполнена на актуальную тему, на высоком научном уровне. Текст диссертации сопровождается качественными иллюстрациями и написан с использованием строгого математического аппарата. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную исследовательскую работу, отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор – Яковлев

Дмитрий Дмитриевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

Тимофеев Иван Владимирович

Доктор физико-математических наук (шифр специальности: 01.04.05 Оптика), ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией фотоники молекулярных систем, Института физики им. Л. В. Киренского ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск. Тел.: +7 (3912) 90-56-37. E-mail: tiv@iph.krasn.ru

Подпись официального оппонента

Тимофеева И.В. удостоверяю:

Директор ИФ СО РАН, д.ф.-м.н.

28.03.2022



Балаев Д.А.

**Сведения об оппоненте:**

Фамилия, Имя, Отчество	Тимофеев Иван Владимирович
Место работы	Института физики им. Л. В. Киренского ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Должность	Заведующий лабораторией фотоники молекулярных систем
Степень и шифр специальности, по которой была защищена диссертация	Доктор физико-математических наук, 01.04.05 – Оптика
Почтовый адрес	660036, г.Красноярск, ул.Академгородок, 50, Институт физики им. Л. В. Киренского ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», лаборатория фотоники молекулярных систем
Телефон	+7 3912 905637