На правах рукописи

Трашкеев Сергей Иванович

Структурные и нелинейно-оптические преобразования в жидких кристаллах и полупроводящих полимерах

1.3.6. – Оптика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты: Бабин Сергей Алексеевич
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, и.о. директора ФГБНТ Институт автоматики и электрометрии СО РАН

Киселев Сергей Петрович
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

Чаусов Денис Николаевич
доктор физико-математических наук,
доцент, заведующий лабораторией
ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» ИОФ РАН»

Ведущая организация: ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН)
Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Защита состоится "26" апреля 2024. г. в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.1.070.01 на базе Институте лазерной физики СО РАН по адресу 630090, г. Новосибирск 90, просп. Академика Лаврентьева 15 Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЛФ СО РАН и на сайте Совета.
Автореферат разослан "___"_____202__г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук О.Н. Прудников

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Относительно недавно в научной терминологии появилось понятие "мягкая материя" или "структурированные среды" [1, 2]. К ним, как к структурам, резко меняющим свои свойства под действием слабых воздействий, в настоящее время относится довольно большое и все возрастающее количество веществ в основном органической природы. Самым ярким, наиболее хорошо изученным и применяемым на практике представителем мягких сред являются жидкие кристаллы (ЖК), открытые еще в 1887 г. Среди полимеров, проявляющих необычные структурные свойства, выделяются проводящие, открытые в 1980-х, и, в большей степени, полупроводящие (п/п) полимеры [3]. Изучению свойств этих веществ (как и всей мягкой материи), а также различных композитов на их основе уделяется все больше внимания. Повышенный интерес объясняется как уже имеющимся практическим их использованием, так и будущим применением, основанным на новых, ранее неизвестных свойствах, зачастую относящихся к различным научным дисциплинам. В соответствии с этим изучение мягких сред приобретает особую актуальность не только в физике конденсированного состояния, но и в электродинамике, оптике, фотонике, нанотехнологии, системах управления и коммуникации и даже в области квантовых исследований и высокотемпературной сверхпроводимости. Причем данный список далеко не полный и постоянно расширяется по мере технологического развития и возможности более углубленного изучения материи при меньших пространственных и временных масштабах.

Несмотря на довольно глубокую изученность многих представителей мягкой материи, до сих пор остаются старые и возникают новые проблемы и непонимание некоторых свойств, процессов и явлений, а также механизмов их реализации, причем даже в таких, казалось бы, хорошо изученных средах, как жидкие кристаллы. Исследуемые в диссертации процессы являются либо оригинальными комбинациями известных свойств мягких сред, либо

новыми, относящимися к тем проблемам, которые не имели своего объяснения или становились таковыми в ходе настоящих исследований. Эти актуальные вопросы связаны с описанием структур с особенностями (дефектами) в жидких кристаллах и полупроводящих полимерах, а также с их нелинейно-оптическими свойствами, имеющими ранее неизвестные характеристики, во многом не аналогичными традиционным средам.

Не менее актуальным является и моделирование мягкого состояния среды, развитие которого диктуется как комплексностью вовлеченных в процесс явлений, так и их все возрастающей сложностью. Современные экспериментальные исследования становятся все более трудоемкими и дорогостоящими. В соответствии с этим возникает острая необходимость в предсказании и планировании эксперимента, что невозможно без наличия адекватной и практичной с расчетной точки зрения теории. Разработка и построение математических моделей, ориентированных на возможности численных методов, также относятся к решаемым в диссертации актуальным задачам.

Цели работы:

– разработка нового подхода для описания мягкой материи, основанного на понятии распределенности среды или дальнодействии внутренних сил, распространяющихся далее ближайшего молекулярного соседа. Данный подход позволит достичь цели описания жидкокристаллической среды в электромагнитных полях на масштабах, сравнимых с несколькими молекулярными размерами, и определить состояние среды в особых точках структуры и в различных ее фазовых состояниях;

– разработка формализма двух потенциалов для уравнений Максвелла в произвольной среде, как нового инструмента численного моделирования линейных и нелинейных сред. Такой формализм позволяет упростить

описание нелинейно-оптические и спектральнык преобразований в мягких средах с дефектами структуры;

– на основе традиционных и разработанных теоретических подходов реализация в экспериментальных исследованиях ранее не наблюдавшихся явлений в структурных и фазовых превращениях жидкокристаллической среды, находящейся в электромагнитных полях;

– экспериментальная проверка теоретического положения о необходимости "предварительной" деформации ориентационной структуры среды с нарушением симметрии накачивающим излучением для "последующей" генерации разностно-частотных волн и четных гармоник;

– экспериментальное доказательство адекватности предположения об определяющей роли квадрупольного механизма объемной нерезонансной нелинейной генерации излучения от структурных объектов с резким изменением симметрии в неполярных жидких кристаллах и полупроводящих полимерах.

<u>На защиту выносятся.</u>

1. Квазистационарные электрические поля низкого допробойного напряжения (~100 В по сравнению с 1000 В при стрикционных эффектах), воздействующие на упругую структуру жидкого кристалла, позволяют управлять в нем движением и регулярным расположением дефектов и нанообъектов.
2. Молекулы жидкого кристалла переориентируются тепловым потоком (термоориентационный эффект) или градиентом скалярного параметра порядка, аналогично электрическим полям при переориентации Фредерикса, с заменой вектора поля на градиент температуры (~1-10 град/мм) или скалярного параметра порядка.
3. Тепловой поток при термоориентационном эффекте от локализованного источника излучения (градиент интенсивности ~10^{12} – 10^{13}

Вт/м^3) среднего уровня мощности (~10–100 мВт) приводит к образованию и изменению дефектов в слабо поглощающих (< 1см$^{-1}$) жидких кристаллах.

4. В мягких органических средах возникают сверхэффективные по сравнению с традиционными полупроводниками и кристаллами нелинейные процессы нерезонансного объемного преобразования спектра излучения квадрупольного типа ($\chi^{(2)}>10^{-6}$ м/В), для которых необходима не только определенная плотность мощности, но и требуется высокий градиент интенсивности накачки, ~ 10^{13} Вт/м^3.

5. Дисклинационные (ориентационные конфигурации с особыми точками) и другие аналогичные структуры с резким изменением симметрии (на размере 10–100 нм) являются оптимальными объектами для частотного преобразования излучения в жидких кристаллах и полупроводящих полимерах.

6. Математическая модель жидкокристаллического состояния основанная на принципе нелокальности (распределенности среды), как более общая система континуальных уравнений, пригодных для описания мелкомасштабных структур и фазовых переходов.

7. Новая формулировка уравнений Максвелла для потенциалов первого порядка, расширяющая возможности численного решения волновых задач в линейной и нелинейной оптики, включая распространение излучения в мягких средах.

<u>Научная новизна работы.</u>

Результаты диссертации, вынесенные на защиту, на момент их опубликования были новы и не содержали повторения с имеющимися ранее исследованиями. К наиболее важным и новым относятся следующие результаты:

– континуальная модель жидкокристаллического состояния и фазовых переходов, основанная на предположении распределенности или интегральности среды, в пределе ближайшего соседа или близкодействия,

переходящая к классическим теориям ориентационного порядка ЖК, дающая возможность динамического описания дефектов с особыми точками, в отличии от классической модели Франка;

– метод решения сложных трехмерных задач с объемным видом деформации, основанный на переходе в систему координат, связанную с переменным в пространстве и времени направлением анизотропной оси – директора;

– формализм двух потенциалов для численного решения уравнений Максвелла в произвольной среде, обладающий рядом преимуществ при моделировании нелинейных взаимодействий излучения с анизотропной мягкой средой;

– методика приготовления ЖК нанокомпозитов для создания управляемых многомерных фазовых решеток со свойствами фотонного кристалла;

– управляемое внешними электрическими полями поступательное и вращательное движение наночастиц в ЖК матрице;

– принцип визуализации наночастиц, молекулярных и атомарных объектов ЖК пленками;

– теоретическое и экспериментальное обнаружение нового термоориентационного эффекта в ЖК, квадратичного по тепловому потоку без конвекционного перемещения жидкости; предсказание и реализация новых явлений, основанных на термоориентационном взаимодействии поглощающих ЖК с локализованным излучением: оптических вихрей, самоколлимации излучения, светоиндуцированного образования дисклинаций и переходов между ними, усиление генерации гармоник в особой точке дисклинации;

– экспериментальное подтверждение правильности предположения о светоиндуцированном механизме нарушения центральной симметрии ЖК при генерации четных гармоник и разностных частот излучения;

– получение сверхэффективных режимов нелинейной генерации на микронных и субмикронных размерах ЖК и п/п полимеров;

– обоснование квадрупольной нерезонансной модели частотного объемного преобразования излучения в мягких средах с ориентационно-электронной нелинейностью.

Научная и практическая значимость результатов исследований процессов и явлений, происходящих в таких мягких средах, как жидкие кристаллы и полупроводящие полимеры, находится в русле современных тенденций, сформировавших совсем недавно целое научное направление – "физика мягких сред". Приведенные в диссертации ранее неизвестные данные о "старейших" представителях структурированных сред (ЖК) не только расширяют и углубляют набор свойств исследуемых веществ, но и позволяют глубже понять строение и свойства столь необычной материи. Созданные на ее основе и рассмотренные в диссертации композиты, не имеющие природного аналога, только подчеркивают "неисчерпаемость" объектов физики мягких сред. Полученные в диссертации данные дают возможность улучшения имеющихся систем и разработки технических устройств нового поколения. Преимущества над традиционными устройствами определяются технологичностью использования мягкого вещества при снижении стоимости изделий из них, а также высокой эффективностью в процессах преобразования и управления энергетическими потоками, приводящей к возможности сверхминиатюризации структурированных систем до нанометрового уровня. Так, предложенные технологии создания и управляемого движения дисклинаций могут служить основой для разработки различных визуализаторов нанообъектов, управляемых фазовых решеток в виде 3D-управляемых фотонных кристаллов, электро- и оптических пинцетов, для наноконструирования, создания наноэлектродвигателей и в перспективе смогут привести к возможности разработки устройств типа "искусственная мышца".

Уникальные нелинейно-оптические свойства ЖК и п/п полимеров, несомненно, найдут применение в создании управляемых высокоэффективных преобразователей излучения и лазерных генераторов, перестраиваемых в широком спектре, включающем труднодоступные диапазоны. Миниатюризация генераторов когерентного излучения до уровня наноразмеров в сочетании с волоконно-оптическими системами малой и средней мощности позволит создавать лазерные матричные панели и другие малоразмерные устройства с управляемыми оптическими потоками.

Перечень возможных устройств, в основу которых положены результаты диссертации, может быть расширен и представляет большой практический интерес для использования в нанотехнологической области, оптике и лазерной физике, спектроскопии и системах отображения информации, телекоммуникационных технологиях и других отраслях науки и техники.

Достоверность полученных результатов. В теоретическая части работы результаты исследований проверены на примерах расчета сложных структур ЖК с предварительной тщательной верификацией используемых численных методов. Достоверность также следует из сравнений рассчитанных и наблюдаемых экспериментально многочисленных данных, как полученных в других работах, так и представленных в диссертации.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах ИЛФ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИХКГ СО РАН, ИАиЭ СО РАН, ИМ СО РАН, ИВТ СО РАН, Сибирском суперкомпьютерном центре, МГУ, ФИРАН, ИФ им. Л.В. Киренского СО РАН. Они также были представлены на Международных и Всероссийских конференциях и научных семинарах: Современные проблемы лазерной физики MPLP (Новосибирск, 2004, 2008, 2016, 2018, 2021 гг.), VI Международная конференция "Прикладная оптика" (С.-Петербург, 2004 г.), Международная конференция

по когерентной и нелинейной оптике / Международная конференция по лазерам, приложениям и технологиям ICONO/LAT (2004, 2007, 2013, 2016 гг.), 3-я Всероссийская конференция "Химия поверхности и нанотехнология" (С.-Петербург-Хилово, 2006 г.), Евродисплей-2007 (Москва, 2007 г.), 4-й Международный семинар "Наноструктурные материалы–2007. Беларусь-Россия" (2007 г.), 27-й Международный конгресс по прикладным лазерам и электрооптике (США, 2008 г.), XV Международная научная конференция «Радиолокация, навигация, связь» RLNC-2009 (Воронеж, 2009 г.), Международная конференция "Гео-Сибирь" (Новосибирск, 2010 г.), IV Международный форум по нанотехнологиям "Rusnanotech-2011" (Москва, 2011 г.), Первая Всероссийская конференция по жидким кристаллам (Иваново, 2012 г.), Конференция по компьютерной физике ССР (Москва, 2013 г.), 6-й Семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2014 г.), Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" (Новосибирск, 2014, 2015, 2017 гг.), Китайско-Русский симпозиум по оптике и фотонике (2014, 2015, 2017 гг.), 14-я Европейская конференция по жидким кристаллам (Москва, 2017 г.), XXV Всероссийская конференция с международным участием "Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды" (Новосибирск, 2017 г.), Марчуковские чтения (Новосибирск, 2017 г.), Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России" (Москва, 2017 г.), , Международная конференция по лазерной оптике ICLO (С.-Петербург, 2012, 2014, 2016, 2020, 2022 гг.).

Публикации. Всего 127 публикаций. Основные результаты диссертации изложены в 95 печатных изданиях, 54 из которых (приведенных в списке по теме диссертации) рекомендованы ВАК, индексированы Web of Science, Scopus, РИНЦ, в том числе 11 публикаций докладов конференций с индексом DOI, 2 патента и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Все результаты, вошедшие в диссертацию, получены при личном определяющем участии автора в постановке задач, разработке методов их решения, подготовке и проведении большинства экспериментов, в обработке, анализе и представлении результатов. Все новые теоретические аспекты разработаны автором диссертации.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, содержащих 146 рисунков и 3 таблиц, заключения, приложения и списка литературы, состоящего из 267 наименований. Полный объем – 325 страниц.

Содержание работы

В целом работа разбита на две взаимосвязанные части: теоретическую (главы 1 и 2) и экспериментальную (главы 3-6). Теоретические построения и способы решения математических моделей, основанные как на классических теориях, так и на оригинальных, были реализованы в процессе всего цикла исследований и приняли окончательный вид, приведенный в диссертации, только к ее завершению. Изложение результатов в хронологическом порядке сильно затруднило бы восприятие материала диссертации, соответственно, теоретическая часть выделена в первые обособленные главы. Это не означает, что в экспериментальных разделах нет расчета и теории. Они приводятся в виде адаптированных к соответствующей постановке или условию задачи моделей, как следствия классических или оригинальных построений, необходимых для описания и (или) качественного понимания проведенных экспериментов.

В диссертационном материале по нелинейной оптике основное внимание уделено жидким кристаллам, но подчеркивается, что многие, не характерные для традиционных сред свойства, являются следствием мягкости среды и использования в наиболее простом варианте высоколокализованного излучения волоконно-лазерных систем. Из результатов следует, что излучение должно иметь не только определенную

плотность мощности, но и высокий градиент интенсивности, что достигается при распространении оптической волны в одномодовом волокне (включая его торец или срез) с диаметром сердцевины 8 – 12 мкм. Обобщение на примере одного ЖК без рассмотрения других представителей мягкой среды выглядит не совсем оправданным. Для устранения подобной некорректности были выполнены исследования (§6.7 главы 6) высокоэффективной генерации гармоник в полупроводниковом полимере – политиофене с заместителями, проявившем нелинейную восприимчивость, сравнимую с ЖК, на уровне $\chi^{(2)}>10^{-6}$ м/В при накачке импульсным излучением волоконного лазера. Несмотря на небольшой объем исследований по сравнению с оптической нелинейностью ЖК, результаты отражают основные "необычные" нелинейно-оптические свойства полупроводящих полимеров. В соответствии с принятой системой изложения материала, основанной на представлении в первых главах теоретических моделей, структура диссертации имеет следующий вид.

В параграфе 1.1 первой главы содержится сводка уравнений классической теории Эриксена-Лесли-Озеена-Франка [1, 2, 5, 6]. Далее предложен метод решения сложных 3D уравнений, описывающих состояние ЖК на основе перехода в локальную систему координат с непрерывным, согласованным с директором, вращением. Метод обобщается для решения уравнений новой модели с наномасштабным разрешением и изложенной в §1.2. Глава 2 посвящена обоснованию новой формулировки для потенциалов электромагнитных полей уравнений Максвелла, более удобной для решения линейных и нелинейно-оптических задач в мягких и других сложных средах. Параграф 3.1 главы 3 и глава 4, относящиеся к экспериментальной части, в модельном плане основываются на традиционном представлении Озеена-Франка о структурах ЖК. Параграф 3.2 главы 3 и глава 5 в своей основе имеют новые положения, следующие из приведенной теоретической модели параграфа 1.2 главы 1. Глава 6 посвящена нелинейному частотному преобразованию излучения (генерации гармоник и суперконтинуума в

жидких кристаллах и полупроводящих полимерах) и относится к чисто экспериментальным работам, хотя и содержит качественные рассуждения, основанные на предлагаемой модели, необходимой для понимания механизма наблюдаемых явлений.

Более подробно о содержании диссертации.

Во Введении к диссертации обсуждается актуальность темы диссертации, кратко освещается история физики мягких сред и проблемы, не решенные до настоящего времени. В соответствии с этим формулируются цели диссертационной работы, перечисляются полученные новые результаты, их практическая ценность и положения, выносимые на защиту, описывается структура диссертации.

Глава 1 посвящена как описанию классической одноосной модели Эриксена-Лесли-Озеена-Франка [1, 2, 5, 6] для ориентационной динамики ЖК (§1.1), так и разработке новой, более общей модели (§1.2), основанной на распределенном представлении среды и необходимой для описания мелкомасштабных деформаций, таких как ориентация ЖК в мелких каплях [6, 7] и других дисклинационных структурах, приведенных в диссертации. Системы уравнений обоих подходов в общем виде достаточно сложны, даже в случае их решения с использованием численных методов [8, 9]. В связи с этим предлагается методика, позволяющая упростить исходные уравнения. В ее основу закладывается переход в локальную вращательную систему координат, связанную в каждой точке пространства и времени с направлением оси жидкого кристалла (п.1.1.4). Предполагается, что обе модели записаны в одноосном варианте, что для распределенной модели является приближением. В новой системе координат уравнения записываются в более простой форме и позволяют реализовать численные алгоритмы расчета с экономией машинных ресурсов в несколько раз по сравнению с исходными формами моделей. Подчеркивается, что использование предлагаемой методики обоснованно только при решении сложных 2D и 3D задач с объемной деформацией структуры ЖК.

Изложение новой распределенной теории упругости ЖК §1.2 можно рассматривать как обобщение экспериментальных и теоретических исследований, накопленных в области физики жидких кристаллов. В основу формирования предлагаемой теоретической модели заложены прежде всего исследования, представленные в экспериментальной части диссертации, следствием которых явилась необходимость описания жидкокристаллических структур на более мелких масштабах, включая особые точки и дисклинации. Подход, основанный на понятии распределенности среды, не является новой концепцией, он известен в физике конденсированного состояния [10] и рассмотрен в общей постановке для ЖК в публикации [11]. В диссертации понятие распределенности конкретизировано и, как результат, построена новая теория упругости ЖК.

Необходимость создания более общей модели было следствием невозможности описывать деформированные мелкомасштабные структуры ЖК классической феноменологической теорией Озеена-Франка, и в первую очередь дисклинационные состояния. Обобщающие теории предлагаются многими авторами и на настоящий момент их опубликовано достаточно большое количество, причем с использованием всех подходов, от феноменологического до молекулярно-динамического. Тем не менее все они имеют некоторые недостатки, которые приводят к тому, что процесс разработки обобщающих моделей продолжается до сих пор. В этом смысле в диссертации рассматривается иной подход, затрагивающий основные определения среды. Как оказалось, в рамках континуальности достаточно перейти к новой распределенной переменной, описывающей ЖК, а именно, ввести понятие двухточечного или интегрального параметра порядка в виде тензорной бесследовой корреляционной функции

$$S_{ij}(\mathbf{r},\mathbf{r}') = \ < l_i(\mathbf{r}) l_j(\mathbf{r}') - \frac{\delta_{ij}}{3} l_k(\mathbf{r}) l_k(\mathbf{r}') >, \qquad (1)$$

где l_k – мгновенное направление вектора оси молекул ЖК, <…> тепловое усреднение. После введения нового определения по классической схеме,

предложенной Де-Женом [12], записывается функционал свободной энергии, вариация которого как лагранжиана по (1) приводит к необходимым уравнениям ориентационного движения ЖК, сформулированного относительно двухточечного тензора S_{ij}. При таком подходе записанный функционал и уравнения движения дают возможность мелкомасштабного (на размерах нескольких молекул или в пределе континуальности) описания большинства видов ЖК при их деформации с учетом фазовых переходов.

В предельном переходе к локальности (близкодействию или приближению ближайшего соседа) новая модель для одноосного случая переходит в классическую теорию Озеена-Франка [8] и приводит к соответствию $S_{ij}(\mathbf{r},\mathbf{r}') \to Q_{ij}(\mathbf{r})$ при $\mathbf{r}' \to \mathbf{r}$, где $Q_{ij}(\mathbf{r})$ – классический одноточечный параметр порядка, введенный Цветковым [13] и использованный Де Женом [8, 12].

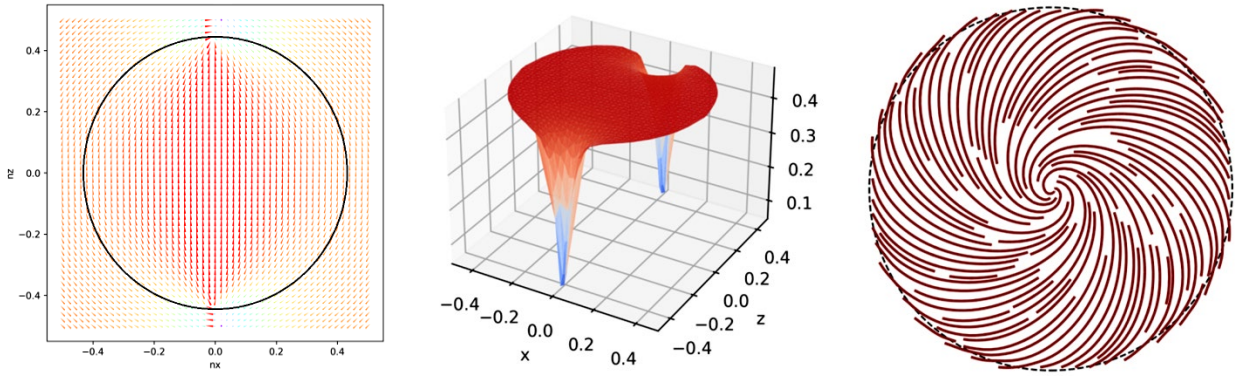
Исходя из определения (1), как корреляционной функции, естественным было бы рассчитать радиус корреляции флуктуаций. В рамках феноменологического подхода, без знания двухточечной функции распределения, это не представляется возможным. Однако в пределе близкодействия радиус корреляции вычисляется как соотношение вида

$$\xi(T) = \sqrt{\frac{2D}{a(T-T^*)}}\ ;\ \text{для сравнения, Де Жен}\ \to\ \xi_{ДЖ}(T) = \xi_0\sqrt{\frac{T^*}{T-T^*}},$$

которое совпадает с зависимостью от температуры, полученной Де Женом [8] в приближении самосогласованного поля, или приближении Ландау, где ξ_0 – длина молекулы. В полученной формуле аналогом длины молекулы является соотношение $\xi_0 = (2D/aT^*)^{1/2}$, где D – константа, не зависящая от температуры и определяющая воздействие на ориентацию директора градиента параметра порядка, $a = A/(T-T^*)$, где A – коэффициент в потенциале Ландау-Де Жена. Вычисленное значение ξ_0 близко к размеру молекулы ЖК и составляет значение порядка нескольких нанометров.

В конце главы 1 приводятся примеры, показывающие работоспособность и адекватность предложенного подхода. В частности,

находятся не расходящиеся в особых точках решения для дисклинаций, описывается их образование и уничтожение, вычисляются геометрические и энергетические параметры ядра дисклинации и делается заключение о изотропности ЖК в центре при температуре ниже фазового перехода в изотропную жидкость. Рассмотрено состояние в небольшой сферической капле нематического ЖК (НЖК, 5CB) диаметром ~300 нм. На основе численных расчетов дается ответ на вопрос о возникновении в таком объеме спиральных структур с планарными свободными (без выделенного направления на поверхности) граничными условиями. Показано, что при этом может существовать несколько стационарных устойчивых состояний, переход в которые зависит от начальных условий. Одно из решений имеет спиральную структуру (Рис.1), второе не имеет. За возникновение спиральности отвечают в основном флексомеханичекие коэффициенты μ_1 и μ_3, вводимые на основе предложенной распределенной модели с размерностью ньютон, и градиент параметра порядка, Рис.1б. В частности воздействие на ориентацию оказывает одно из слагаемых в свободной энергии в виде ($\mathrm{grad}Q\cdot\mathbf{P}$), где полярный вектор $\mathbf{P}=\mu_1\mathbf{n}\mathrm{div}\mathbf{n}-\mu_3[\mathbf{n}\times\mathrm{rot}\mathbf{n}]$.



а. б. в.

Рис.1а. Распределение директора в сечении x, y, z=0, показана вся прямоугольная расчетная область и окружность капли, нормировка на L=0,3 мкм – размер расчетной области. б – распределение скалярного параметра порядка в сечении x, y=0,z. в – проекция линий поля директора с верхней полусферы на плоскость, касающуюся полюса.

В области особых точек на полюсах $Q \to 0$. "Направление закрутки", Рис. 1в, определяется знаками комплексов $\mu_i \cdot \mathrm{grad} Q$, где Q – скалярный параметр порядка, вводимый при переходе от распределенности к пределу близкодействия. Рассчитанное состояние содержит две особые точки, расположенные на полюсах сферы. Аналогичные конфигурации наблюдаются в экспериментах [6, 7]. Полученное объяснение эффекту спиральности получено впервые.

В заключении к главе 1 делается вывод об общности и адекватности разработанной ориентационной модели распределенной анизотропной среды, пригодной для описания мелкомасштабных деформаций практически во всех видах ЖК с учетом фазовых переходов.

В Главе 2 рассматриваются вопросы, относящиеся к использованию уравнений Максвелла для задач линейной и нелинейной оптики ЖК и других мягких сред. В §2.1 главы 2 приводится вывод 3D укороченных уравнений Максвелла для одноосной анизотропной среды с переменным направлением оптической оси, которое более точно и на меньших масштабах отражает зависимость волнового электрического поля от пространственных координат, чем приближение геометрической оптики.

В §2.2 записываются уравнения Максвелла в локальной вращающейся системе координат, введенной в п.1.1.4. Следствием перехода в такую систему является добавление к инвариантной части (записанной аналогично исходным уравнениям) некоторых источников, обязанных зависимостью углов вращения директора (углов матрицы преобразования) от времени и координат.

В §2.3–2.9 рассмотрены проблемы, связанные с нахождением решений уравнений Максвелла численными методами. Этот вопрос весьма актуален, так как из-за сложности среды практически невозможно найти аналитические решения. В §2.1 перечислены основные трудности, встреченные автором при использовании стандартных методов, разработанных другими авторами, причем возрастающие при решении нелинейных задач. К ним относятся

возникновение магнитных зарядов и артефактных источников, паразитные отражения от границ, появление нефизических решений в нелинейных задачах с широким частотным спектром излучения и др. В последующих параграфах (§2.4-2.9) предлагается новая формулировка уравнений Максвелла (записанная для потенциалов и эквивалентная исходным уравнениям Максвелла), лишенная многих недостатков ранее разработанных методов:

$$\begin{aligned} &\hat{\varepsilon}\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}+\nabla\varphi\right)+\hat{\sigma}\mathbf{A}-rot\mathbf{C}=\mathbf{P}, && \hat{\varepsilon}\hat{\mu}\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\hat{I}div\mathbf{A}=0,\\ &\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial t}+\nabla\psi+\hat{\mu}^{-1}rot\mathbf{A}=\mathbf{M}, && \hat{\varepsilon}\hat{\mu}\frac{\partial\psi}{\partial t}+\hat{I}div\mathbf{C}=0, \end{aligned} \tag{2}$$

где φ и $\mathbf{A}$ – классические скалярный и векторный потенциалы, ψ и $\mathbf{C}$ – новые вспомогательные потенциалы, $\hat{I}$ – единичный оператор, остальные переменные записаны в общепринятых обозначениях (c=1): ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, σ – проводимость (в общем виде ε, μ, σ – тензоры, зависящие от времени и координат), $\mathbf{P}$ и $\mathbf{M}$ – векторы диэлектрической и магнитной поляризуемости. Электрическое $\mathbf{E}$ и магнитное $\mathbf{B}$ поля связаны с потенциалами из (2) дублирующими соотношениями

$$-\hat{\varepsilon}\left(\nabla\varphi+\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}\right)=\hat{\varepsilon}\mathbf{E}=-rot\mathbf{C}-4\pi\left(\mathbf{P}-\hat{\sigma}\mathbf{A}\right),$$

$$\hat{\mu}^{-1}rot\mathbf{A}=\hat{\mu}^{-1}\mathbf{B}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{C}}{\partial t}-\nabla\psi+4\pi\mathbf{M},$$

из которых поля можно определять двумя способами. Левые равенства являются классическими определениями потенциалов, правые – дополнительные, появившиеся вследствие введения новых потенциалов ψ и $\mathbf{C}$, необходимых для понижения порядка уравнений со второго до первого. Основное преимущество (2) прежде всего заключается в записи уравнений первого порядка в "чисто" гиперболическом виде, это означает отсутствие неэволюционных уравнений или ограничений (условия на дивергенции полей), входящих в уравнения Максвелла в исходной форме. Делается заключение, что новая формулировка не только имеет значение для

разработки численных алгоритмов, но и может представлять интерес для других научных отраслей, например, квантовой механики и электродинамики.

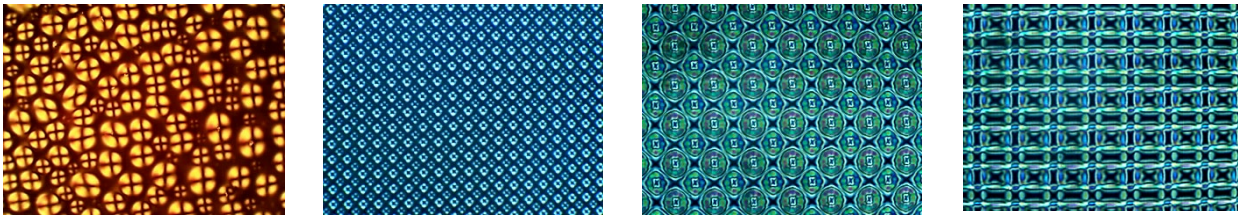
В конце главы 2 §2.9 приведены сравнения решений, полученных на основе предлагаемой формулировки и методом FDTD [14]. Показаны преимущества нового потенциального подхода.

В заключении к теоретической части диссертации (главы 1 и 2) делается вывод, что предложенные методы позволят дать ответы на многие вопросы теории жидких кристаллов и нелинейной оптики мягких сред, включая объяснение данным, приводимым в экспериментальной части диссертации.

Глава 3 посвящена изучению структур, возникающих при воздействии формы ограничивающей поверхности и теплового потока в НЖК. Основа приводимых теоретических и экспериментальных исследований была заложена в ранних публикациях по изучению селективных спектров отражения от капсулированных (занимающих сферический объем) холестерических ЖК [15] и в [16], где изучалась гидродинамика в капле НЖК.

В §3.1 описаны разработанные принципы управляемого движения и регулярного расположения дефектов с помощью внешних квазистационарных электрических полей. Экспериментальные и расчетные исследования были проведены для композитных сред на основе смесей нематиков с нанообъектами (<20 нм), полимерными молекулами и атомарными частицами. Предложенная теоретическая модель, основанная на классической теории, удовлетворительно объясняла наблюдаемые явления, достаточно точно определяла размер области деформации директора вокруг одиночной наночастицы (рис. 2а,б) в ЖК нанокомпозитах и позволяла качественно предвидеть результаты при планировании экспериментов. Правомочность использования классического подхода определялась фактом исключения особенности ориентационной структуры, "отсутствием" ЖК в

области наночастицы.. Разработанная оригинальная технология приготовления смесей, основанная на внедрении через поверхность НЖК наночастиц в объем среды внешним электрическим полем, позволила проводить исследования смесей в широком концентрационном интервале, что было затруднительно для методов, используемых другими авторами. В проведенных экспериментах был обоснован принцип управляемого движения и регулярного расположения дефектов, образованных нанообъектами, в жидких кристаллах с помощью внешних квазистационарных электрических полей, задаваемых системой электродов. В качестве результата были продемонстрированы управляемые фазовые решетки (рис.2б-г) или фотонно-кристаллические системы, приемы для наноконструирования и прототип наномотора с внешним электроприводом. Показана возможность использования ЖК в качестве визуализаторов малоразмерных объектов вплоть до атомарных.



а б в г

Рис.2 – текстуры пленок ЖК в скрещенных поляризаторах. а – хаотичное расположение наночастиц Au, диаметр диска ~50–100 мкм. б–г – примеры регулярного расположения дефектов – управляемые решетки, размер повторяющегося пикселя ~50x50 мкм.

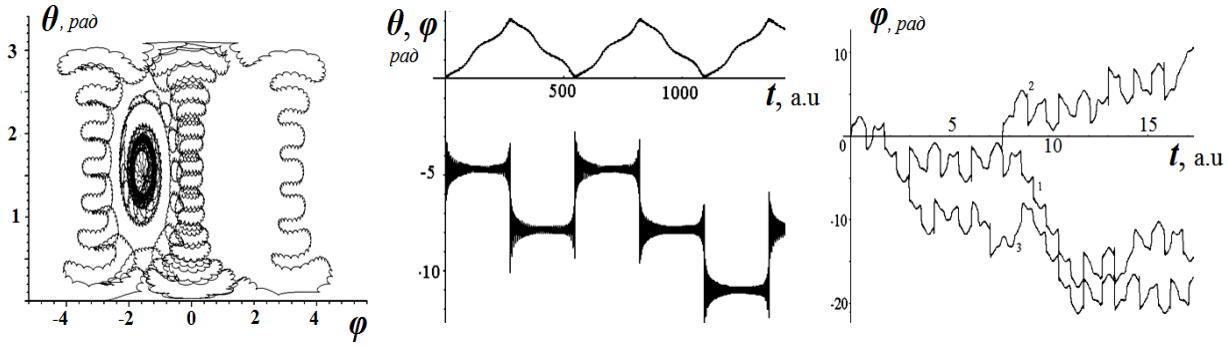
В §3.2 описывается новый тип ориентационного взаимодействия ЖК с тепловым потоком. Обнаруженные эффекты были предсказаны автором теоретически и затем наблюдались экспериментально, причем находились в хорошем согласии с предложенной математической моделью. Модель термоориентационного взаимодействия квадратична по градиенту температуры и описывает термодеформацию из стационарного, не текущего состояния (в отличие от термомеханических эффектов в ЖК [17, 18], возникающих при наличии гидродинамических потоков) и аналогична

переориентации Фредерикса, но с заменой электрического или магнитного поля на градиент температуры.

В Заключении к главе 3 сделан вывод о возможности использования предложенного принципа перемещения и упаковки дефектов в различных оптических и фотонных устройствах, ноноэлектрических и наномеханических системах, включая возможность создания "искусственных мышц". Также утверждается, что найденное термоориентационное взаимодействие (§3.4) является пока единственным механизмом дистанционного управления (рождение, уничтожение и взаимные переходы с изменением силы дисклинации) структурой с особенностями ориентации без наночастичного источника при использовании высоколокализованного излучения в поглощающих ЖК. Для реализации данного механизма наиболее удобно использование волоконно-лазерных систем (имеющих исходно высокую локализацию излучения, сосредоточенного в области 8–12 мкм в волокне и на его торце) со средней мощностью излучения 5–200 мВт и ЖК с коэффициентом поглощения ~1 см$^{-1}$.

<u>В Главе 4</u> решаются задачи, связанные с возможностью реализации в НЖК высокочастотных ориентационных изменений. Предложена упрощенная модель, качественно описывающая объемные осцилляции директора в сложных, многокомпонентных электрических полях радиочастотного диапазона. Рассчитанные характеристики фазовых траекторий ориентационного движения могли реализовывать формы движения от стационарных переориентаций до осцилляций и хаотичных вращений типа странного аттрактора (Рис.3а). При определенном виде воздействия внешних полей динамические осцилляции директора могли иметь некий дискретный вид с переходами из одного состояния в другое (Рис.3б,в). В результате можно трактовать приведенные исследования как обнаружение нового объекта с нелинейной ориентационной динамикой на основе ЖК во многокомпонентных электрических полях с разнообразными динамическими характеристиками.

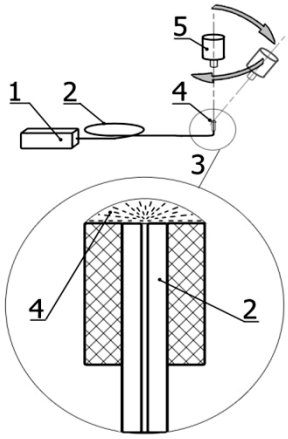
В заключении главы 4 делается вывод о возможности использования полученных результатов для создания быстрых (~1–10 МГц) оптических переключателей параметров излучения.



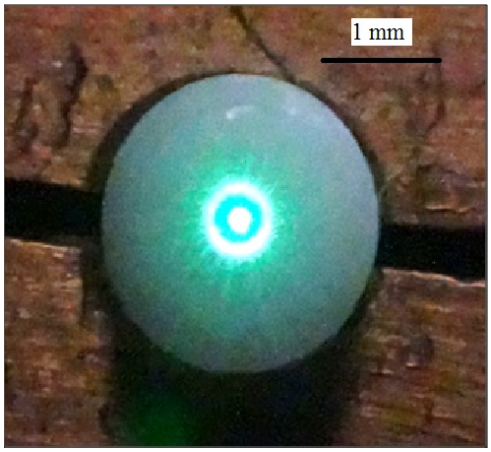
а. б. в.

Рис.3. а – фазовая траектория $\theta=\theta(\varphi)$, решение в виде аттрактора; б. – состояния директора (значения полярного и азимутального углов θ - вверху и φ - внизу) от времени с осцилляциями в дискретных положениях; в – изменения азимутального угла φ от времени, кривые 1, 2 и 3 – с небольшим отличием в начальных условиях.

<u>Глава 5</u> посвящена вопросам нелинейно-оптических преобразований излучения и деформации под его воздействием в жидких кристаллах. Одной из основных целей данной главы является реализация возможности создания управляемых, ограниченных в пространстве, структур (дисклинаций) с помощью воздействия на ориентационное состояние ЖК локализованного излучения.



а.



б.

Рис. 4. а – наиболее простая и часто используемая в экспериментах схема. 1-лазер, 2-волокно, 3-образец, 4-НЖК, 5-приемник. б – фотография торца коннектора с НЖК при генерации гармоник в условиях рис.4а. Эффективность ГТГ ~ 12–15%.

В §5.1 рассматриваются особенности процессов, являющихся следствием одновременной реализации ориентационного и электронного механизмов оптической нелинейности. В §5.2 описываются оснастка и технологические приемы, использованные при проведении экспериментов. Подчеркивается простота прежде всего внешнего волоконного оборудования, позволившего провести достаточно большое число разнообразных экспериментов. На Рис. 4а приведена схема эксперимента с наиболее простой и часто используемой оснасткой для капли НЖК, на Рис.4б – фотография ГТГ с использованием схемы Рис. 4а. Из наиболее сложных устройств описываются оригинальные фемто- и пикосекундные волоконные лазерные системы, разработанные в ИЛФ СО РАН и НГУ с участием диссертанта в первую очередь при формировании технического задания для реализации необходимых параметров излучателей.

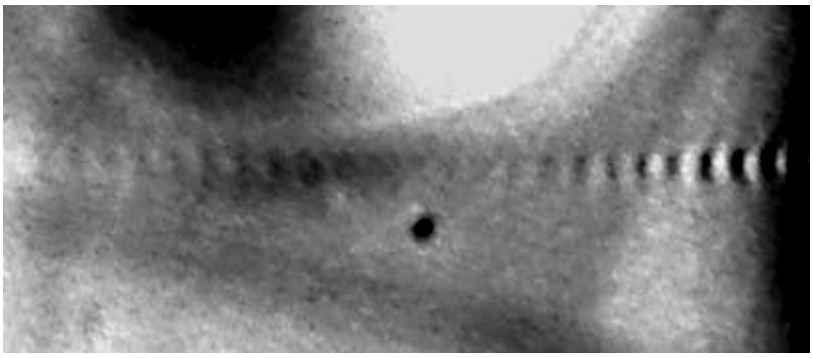


Рис. 5. Ориентационный след (вертикальные штрихи – периодическое изменение директора вдоль канала излучения), видимый в скрещенных поляризаторах самоколимирующегося излучения волоконного лазера в НЖК, поперечный размер штриха ~10 мкм.

В §5.3 рассматриваются ранее не наблюдавшиеся процессы, протекающие вследствие обнаруженного (см. §3.2) эффекта термоориентационного взаимодействия ЖК с локализованным излучением. В качестве примера на Рис. 5 приведен процесс самоколимации излучения. Проведенные эксперименты с использованием волоконно-лазерных систем показали адекватность предложенной новой модели (п.3.2.2, п.3.2.4) взаимодействия тепловых потоков с ЖК, а также позволили сделать заключение о применимости экспериментальных и теоретических

результатов для разработки компактных и недорогих устройств преобразования излучения.

Следующие §§5.4–5.6 посвящены нелинейным процессам, вызывающим спектральные изменения в излучении при его распространении в жидком кристалле. Теоретическое рассмотрение в виде приближенных моделей позволило реализовать эксперимент по генерации разностных частот в ИК-диапазоне (λ~10 мкм) при воздействии на слой НЖК сфокусированного излучения нескольких длин волн аргонового лазера. Полученные результаты подтвердили выдвинутую ранее другими авторами гипотезу о нарушении центральной симметрии за счет светоиндуцированной деформации НЖК [19]. Также новизной выполненного эксперимента является результат по измерению эффективной константы квадратичной восприимчивости $\chi^{(2)}$. После тщательной калибровки установки с использованием излучения черного тела (графит) и системы спектральных фильтров оказалось, что $\chi^{(2)}$~10^{-6}м/В. Эта огромная (по сравнению с обычными неорганическими полупроводниками и кристаллами, где $\chi^{(2)}$~10^{-12}м/В) величина позволила получить эффективность преобразования в разностное излучение, сравнимую с квантовым пределом, $\Delta\omega/\omega$.

В заключении к главе 5 отмечается перспективность научно-технического применения полученных результатов в областях, связанных с использованием достижений нелинейной оптики и лазерной физики, причем наибольший эффект использования следует ожидать в волоконно-лазерных системах, интегрированных с жидкокристаллическими объектами и другими мягкими нелинейными средами.

В Главе 6 продолжено рассмотрение вопросов нелинейной оптики для спектрального преобразования излучения в жидких кристаллах и полупроводниковых полимерах. Несмотря на то что полимерам уделено относительно мало внимания (§5.1, §6.7), эти данные необходимы для демонстрации общности нелинейно-оптических свойств мягких сред.

Вопросам поиска органических сред с большими нелинейностями (намного превосходящими нелинейности неорганических полупроводников) было уделено значительное внимание в течение последних 30 лет [20,21], и результат был отрицательным. Положительный результат в решении данной проблемы, приведенный в диссертации, можно рассматривать как вклад в развитие нелинейной оптики органических сред с возможностью создания на их основе высокоэффективных нелинейных устройств нового типа.

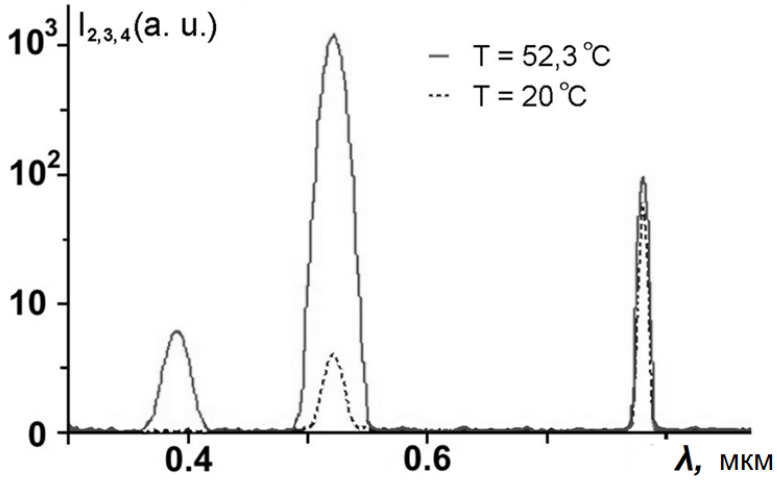


Рис.6. Спектр одновременной генерации гармоник при комнатной температуре (*T*=20ºС – пунктирная линия) и вблизи фазового перехода (*T*=52,3ºС – сплошная линия). Накачка осуществлялась фемтосекундным волоконным лазером с λ≈1,5 мкм.

В §§6.1-6.6 рассмотрены экспериментально и теоретически особенности генерации гармоник (ГГ) и широкополосных спектров излучения в ЖК, отличающие их от аналогичных явлений в традиционных неорганических средах. Анализируются полученные характеристики и условия возникновения сверхэффективных частотных преобразований излучения. Показано, что обнаруженный термоориентационный эффект вследствие поглощения исходного (накачивающего) локализованного излучения создает дисклинационную структуру в ЖК, конфигурация которой наиболее эффективно формирует нелинейное излучение. Как наиболее интересный результат приводится спектр излучения 2-й, 3-й и 4-й гармоник одновременно в НЖК (Рис.4 а, б) при использовании (как и во всех других экспериментах) маломощных импульсных (средняя мощность 0,02–0,2 Вт, длительность 0,6 – 30 пс, частота повторения 15 – 17 МГц) волоконно-лазерных источников накачивающего излучения. В качестве еще одной принципиальной особенности приводятся данные экспериментов (§6.7), где

независимо от плотности мощности показывается четкая зависимость эффективности ГГ от поперечного градиента интенсивности накачивающего излучения (Рис.7). Данный результат было достаточно сложно получить без использования волоконно-лазерных систем, которые обладали наиболее оптимальным соотношением плотности мощности и градиента интенсивности.

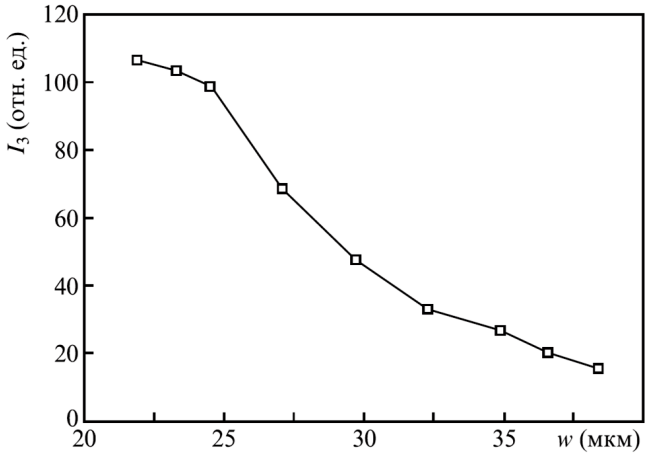


Рис.7. Зависимость мощности ГТГ в политиофене от ширины перетяжки w для определения влияния градиента интенсивности накачки при постоянной средней плотности мощности накачки: $P/w^2(h)\approx 3{,}5\cdot 10^8$ Вт/м^2.

При обобщении результатов исследований главы 6 делается вывод (§6.8) об объемном квадрупольном механизме нерезонансной генерации гармоник в рассмотренных мягких средах. На базе данного вывода дается объяснение отрицательности результата предыдущих исследователей, основывающихся в своих работах на дипольной модели, в поиске высокоэффективных нелинейных органических сред.

В заключении подводится итог всему циклу работ, представленному в диссертации. Делается вывод о достижении целей, поставленных перед выполнением исследований и сформулированных во введении. Подчеркивается, что на основе анализа накопленных в течение всего времени экспериментальных данных и сопутствующих теоретических рассуждений была разработана математическая модель. Новый подход, заключающийся во введении принципа распределенности мягкой материи и потенциальной формулировки уравнений Максвелла и оформлен как законченная модель в первых двух главах. Поздняя формулировка модели не означает отсутствия использования многих положений нового подхода в объяснении или

планировании экспериментов. В частности, приведенная в главе 3 термоориентационная модель полностью согласуется с общим положением распределенной теории, если учесть зависимость скалярного параметра порядка от температуры. Также эксперименты по частотному преобразованию излучения, описанные в главе 5, опирались на численные расчеты, являющиеся приближением той же предложенной модели. В главе 6 планирование экспериментов и интерпретация полученных данных проводилась с использованием качественных представлений новой модели. В Заключении говорится, что в рамках континуальности пока не найдено противоречий в новом подходе описания жидкокристаллических сред. При этом приводятся данные о возможности объяснения ранее непонятных явлений, в частности, в п. 1.2.9 показан расчет структуры НЖК в сферическом объеме, где возникает закрученное состояние, не имеющее объяснения в рамках существующих моделей других авторов.

Рассмотренные экспериментально и теоретически различные системы жидких кристаллов и полупроводниковых полимеров, как сами по себе, так и в сочетании с лазерными технологиями, представляют собой варианты искусственных структурированных сред с возможностью самоорганизации. Проведенные исследования и модели, дающие возможность физического понимания протекающих в мягких средах процессов, расширяют и без того большую область объектов физики мягких сред. О перспективности подобных исследований и получения на их основе новых структурных объектов или интеллектуальных материалов можно судить по обзору [22], в котором утверждается, что именно в этой и смежных областях (в первую очередь биотехнологических) следует ожидать научный прорыв, видимо, сравнимый с открытием неорганических полупроводников.

К основным результатам диссертации относятся следующие (ниже, ссылки на приоритетные работы из списка публикаций автора диссертации)**:**

– **<u>глава 1</u>**, методика решения сложных трехмерных задач с объемной деформацией жидкокристаллических структур, основанная на переходе в непрерывно вращающуюся систему координат, определяемую направлением директора ЖК [21,28,29];

– континуальная ориентационная модель упругости распределенного ЖК, основанная на введении интегрального (двухточечного) тензорного параметра порядка для расчета фазового состояния деформированного ЖК на размерах и временах, включая нанометровый масштаб и световые частоты [54];

– **<u>глава 2</u>**, укороченная модель уравнений Максвелла для анизотропных сред с переменным направлением оптической оси [7]; новая формулировка уравнений Максвелла в виде гиперболической системы уравнений для потенциалов без дифференциальных ограничений неэволюционного типа в произвольной среде, включая нелинейную и анизотропную [31];

– **<u>глава 3</u>**, разработка оригинальной технологии внедрения наночастиц и полимерных молекул с широким концентрационным диапазоном в объем ЖК через его поверхность с помощью внешних постоянных электрических полей [23,25];

– обоснование и реализация способа изготовления управляемых внешними электрическими полями фазовых решеток с регулярным расположением наночастиц (дефектов) в виде многомерных фотонных кристаллов с микролинзовыми ячейками в НЖК [23,25];

– предложение и экспериментальная реализация управляемого перемещения наночастиц в ЖК под действием электрических полей среднего уровня (~100 В) напряжения, включая вращение в виде "наномотора" с внешним электроприводом [29];

– принцип и его экспериментальная реализация панорамной визуализации альфа-излучения, включая низкоэнергетическое (~1 МэВ), жидкокристаллической пленкой во внешнем электрическом поле [22];

– теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение наличия в ЖК неконвекционного термоориентационного эффекта, квадратичного по тепловому потоку (в общем виде квадрату градиента параметра порядка); количественное определение и измерение новой константы, входящей в разработанную математическую модель [27.28,54];

– **глава 4**, теоретическая модель и экспериментальная реализация быстрого ориентационного движения директора с частотой до нескольких МГц под действием скрещенных переменных электрических полей, исследование стохастических режимов в виде странного аттрактора и дискретных динамических состояний с переходами между ними; предложение на основе полученного высокочастотного вращения директора НЖК создать быстрые переключатели поляризации излучения в высокочастотных системах отображения информации [19,20];

– **глава 5**, описание и экспериментальная реализация нелинейной генерации оптических вихрей; конструкция с каплей НЖК на торце коннектора оптоволокна и использование волоконно-лазерной системы, дающие высокий коэффициент преобразования исходного излучения в вихревой пучок и режим самоколлимации излучения; общая модель самовоздействия излучения на основе оригинальной термоориентационной и существующей светоиндуцированной моделей ЖК [29,30,35,36,43,49,51];

– реализация в поглощающих ЖК при высокой локализации излучения заданных дисклинаций различной силы и управление переходами между ними, описание наблюдаемого взаимодействия на основе обнаруженного термоориентационного эффекта [29,30,35];

– экспериментальное получение объемной генерации разностной частоты слоем (~100 мкм) нематического ЖК с эффективностью, сравнимой с квантовым пределом, измерение квадратичной восприимчивости преобразования на уровне рекордной величины ~10^{-6} м/В; доказательство адекватности предположения о нарушении начальной центральной

симметрии мягкой среды (ЖК) за счет ее деформации волной накачки [26,45];

– **<u>глава 6</u>**, методика проведения экспериментальных исследований нелинейно-оптических и других свойств мягких сред с помощью волоконно-лазерных систем низкого и среднего уровня мощности (~100 мВт), имеющих высокую степень локализации излучения в волокне [29,30,35,36,43];

– экспериментальное доказательство связи высокоэффективной генерации гармоник в ЖК (до 13% на толщине ~100 мкм) с дисклинацией, наведенной локализованным (ширина пучка 5-10 мкм) излучением накачки; наблюдение генерации в ЖК четырех гармоник одновременно в узком температурном диапазоне, регистрация отличий от нелинейности традиционных сред в виде немонотонных зависимостей в генерации гармоник от поляризации, интенсивности и других характеристик накачивающего излучения [45];

– экспериментальная реализация при использовании волоконно-лазерных систем генерации второй и третьей гармоник в пленках субмикронной толщины полупроводящего полимера (политиофен с заместителями), обнаружение в этих полимерах, как и в ЖК, гигантской квадратичной восприимчивости (~10^{-5} – 10^{-6} м/В) и особых условий ее реализации [47,48];

– как один из основных итогов сделано и обосновано утверждение о нерезонансном квадрупольном механизме объемного высокоэффективного частотного преобразования излучения в мягких средах (на примере ЖК и полупроводящих полимеров), реализованного с помощью волоконно-лазерной системы, имеющей не только высокую плотность мощности, но и достаточно большой пространственный градиент интенсивности накачки [48].

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Золотько А.С. К теории эффекта Фредерикса в световом поле / Золотько А.С., Китаева В.Ф., Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И. // Краткие сообщения по физике. 1982. № 1. С.12-18.
2. Золотько А.С. Численный расчет порога перехода Фредерикса в поле световой волны обыкновенного типа / Золотько А.С., Китаева В.Ф., Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И., Кроо Н., Чиллаг Л. // Краткие сообщения по физике. 1984. № 10. С.30-34.
3. Преображенский Н.Г. Томографическая интероскопия фазовой неоднородности / Преображенский Н.Г., Пикалов В.В., Трашкеев С.И. // Оптика и спектроскопия. 1985. Т.59, вып.6. С.1357-1358.
4. Преображенский Н.Г. К вопросу о светоиндуцированном переходе Фредерикса в поле наклонной о-волны / Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И. // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60, вып. 6. С.541-546.
5. Китаева В.Ф. О восстановлении поля директора жидкого кристалла томографическим методом / Китаева В.Ф., Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И. // Краткие сообщения по физике. 1986. № 4. С.31-33.
6. Преображенский Н.Г. Светоиндуцированный переход Фредерикса в поле наклонной неплоской о-волны / Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62, вып. 1. С.86-90.
7. Преображенский Н.Г. Многомодовый режим колебаний директора нематического жидкого кристалла в световом поле наклонной о-волны / Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62, вып. 6. С. 1404-1406.
8. Громов А.Н. Жидкокристаллический визуализатор инфракрасного излучения / Громов А.Н., Жаркова Г.М., Трашкеев С.И. // ПТЭ. 1987. № 3. С. 210.

9. Преображенский Н.Г. Светоиндуцированная переориентация в гибридно ориентированном нематике при воздействии на него обыкновенной волны / Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И. // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 67, вып. 5. С.1130-1137.
10. Трашкеев С.И. Аналитические и численные методы расчета ориентационной нелинейности жидких кристаллов: диссертация канд. физ.-мат. наук. / Трашкеев С.И. Новосибирск, 1989.
11. Жаркова Г.М. Ориентация жидких кристаллов в сферическом объеме / Жаркова Г.М., Трашкеев С.И. // Кристаллография. 1989. Т. 34, вып. 3. С.695-701.
12. Zharkova G.M. Encapsulated Liquid Crystal Orientation and Optical Properties in a Spherical Capsule / Zharkova G.M., Naumenko S.V., Trashkeev S.I., Khachaturyan V.M. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1990. V. 192, P. 143-147.
13. Zharkova G.M. Termographical films containing encaotulated liquid crastals / Zharkova G.M., Naumenko S.V., Trashkeev S.I., Khachaturyan V.M. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1991. V.209. P. 31-37.
14. Zharkova G.M. Dynamics of the Behavior of Nematic Films in Gas-Dynamic Flows / Zharkova G.M., Preobrazhenskii N.G., Trashkeev S.I. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1992. V. 64, N 6. P. 828-830.
15. Трашкеев С.И. Ориентационный резонанс при нелинейном взаимодействии световых волн с нематическим жидким кристаллом / Трашкеев С.И. // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 75, № 1. С.75-78.
16. Zharkova G.M. Optical Recording of Shear Flow of Nematic Liquid Crystal in a Gasdynamic Flow / Zharkova G.M., Trashkeev S.I. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1994. V. 35, N 5. P. 695-703.
17. Korotaev V.M. Optical Response of a Layer of a Nematic Liquid Crystal to an Air Flow / Korotaev V.M., Trashkeev S.I., Zharkova G.M. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 1998. V. 39, N 4. P. 569-575.

18. Патент № 2216828. Способ термоэлектрического преобразования энергии / Грачев Г.Н., Никифоров А.А., Трашкеев С.И. // Заяв. № 2001121964, Поступ. 07.08.2001, Приоритет 07.08.01.
19. Klement'ev V.M. High-Frequency Changes in the Orientation of Nematic Liquid Crystals in Radio Frequency Crossed Electric Fields / Klement'ev V.M., Trashkeev S.I., Statsenco P.A., Valinurov T.D. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2004. V. 45, N 6. P. 805-817.
20. Trashkeev S.I. Determinate and stochastic orientation dynamics of nematic liquid crystals in the cross electric fields with the frequencies up to the megahertz range / Trashkeev S.I., Klement'ev V.M., Statsenko P.A. // Liquid Crystals. 2006. V. 33, N 4. P. 417-438. DOI: 10.1080/02678290600594539.
21. Trashkeev S.I. Orientation mechanics of liquid crystals. Transition to a local coordinate system / Trashkeev S.I. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2007. V. 48, N 2. P. 229-240. DOI: 10.1007/s10808-007-0030-y.
22. Trashkeev S.I. Observation of the Electrostatic Defects Induced by Ionizing Radiation in a Liquid Crystal / Trashkeev S.I., Pozdnyakov G.A. // Technical Physics Letters. 2007. V. 33, N 5. P. 438-440. DOI: 10.1134/S1063785007050239.
23. Trashkeev S.I. Nanostructures in Nematic Liquid Crystal / Trashkeev S.I., Grachev G.N., Pozdnyakov G.A. // Technical Physics. 2007. V. 52, N 9. P. 1188-1194. DOI: 10.1134/S1063784207090149.
24. Трашкеев С.И. Преобразователь тепловой энергии в электрическую на основе жидкокристаллических нанокомпозитов / Трашкеев С.И. // Заявка на изобретение № 2008106557; приоритет от 19.02.2008 г.
25. Клементьев В.М. Методы визуализации и упорядочения нанообъектов в жидкокристаллической среде / Клементьев В.М., Поздняков Г.А., Трашкеев С.И. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. № 3. С. 32-37.

26. Trashkeev S.I. Highly efficient lasing at difference frequencies in a nematic liquid crystal / Trashkeev S.I., Klement'ev V.M., Pozdnyakov G.A. // Quantum Electronics. 2008. V. 38, N 4. P. 373-376. DOI: 10.1070/QE2008v038n04ABEH013719.
27. Demenev E.I. Nonlinear Orientational Interaction of a Nematic Liquid Crystal with a Heat Flux / Demenev E.I., Pozdnyakov G.A., Trashkeev S.I. // Technical Physics Letters. 2009. V. 35, N 7. P. 674-677. DOI: 10.1134/S1063785009070256.
28. Trashkeev S.I. Thermal Orientation Effect in a Nematic Liquid Crystal / Trashkeev S.I., Britvin A.V. // Technical Physics. 2011. V. 56, N 6. P. 747-753. DOI: 10.1134/S1063784211060247.
29. Bagayev S.N. New methods of highly efficient controlled generation of radiation by liquid crystal nanostructures in a wide spectral range / Bagayev S.N., Klementyev V.M., Nyushkov B.N., Pivtsov V.S., Trashkeev S.I. // Journal of Physics: Conference Series. 2012. V. 345. 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/345/1/012018.
30. Nyushkov B.N. Generation of harmonics and supercontinuum in nematic liquid crystals / Nyushkov B.N., Trashkeev S.I., Klementyev V.M., Pivtsov V.S., Kobtsev S.M. // Quantum Electronics. 2013. V. 43, N 2. P. 107-113. DOI: 10.1070/QE2013v043n02ABEH015048.
31. Kudryavtsev A.N. Formalism of Two Potentials for the Numerical Solution of the Maxwell’s Equations / Kudryavtsev A.N., Trashkeev S.I. // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2013. V. 53, N 11. P. 1653-1663. DOI: 10.1134/S0965542513110079.
32. Anisimov O.A. New Possibilities of OD ESR: Vacuum Ultraviolet Generation of Radical Ion Pairs / Anisimov O.A., Verkhovlyuk V.N., Zikirin S.B., Matveeva A.G., Trashkeev S.I., Molin Yu.N. // Applied Magnetic Resonance. 2014. V. 45, N 9. P. 881-892. DOI 10.1007/s00723-014-0560-4.
33. Стаценко П.А. Программный комплекс для вычисления распространения излучения через системы оптических элементов в

трехмерном дифракционном приближении / Стаценко П.А., Трашкеев С.И. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014663128, Заявка № 2014660824, Дата поступления 27.10.2014, Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.12.2014.

34. Стаценко П.А. Программный комплекс для определения собственных мод и потерь резонатора в трехмерном дифракционном приближении / Стаценко П.А., Трашкеев С.И. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014663131, Заявка № 2014660826, Дата поступления 27.10.2014, Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16.12.2014.
35. Trashkeev S.I. Optical trigger based on a fiber-copuled liquid crystal / Trashkeev S.I., Nyushkov B.N., Galev R.V., Kolker D.B., Denisov V.I. // Proceedings of 17th International Conference "Laser Optics 2016", St. Petersburg, Russia, 27 June - 1 July, 2016. IEEE, 2016. R8-13. ISBN: 978-1-4673-9735-3, DOI:10.1109/LO.2016.7549844.
36. Nyushkov B.N. Fiber-to-fiber nonlinear coupling via a nematic liquid crystal / Nyushkov B.N., Trashkeev S.I., Ivanenko A.V., Kolker D.B., Purtov P.A. // Laser Physics Letters. 2017. V. 14, N 1. 015104 (5 pp.) DOI:10.1088/1612-202X/14/1/015104.
37. Galev R. Numerical simulation of laser beam interaction with a liquid crystal medium in a miniature fiber-optical system / Galev R., Kudryavtsev A., Trashkeev S. // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1893. 030044. DOI 10.1063/1.5007502.
38. Galev R. Numerical simulation of generation of optical vortices at light beam propagation through a layer of a nematic liquid crystal / Galev R., Kudryavtsev A., Trashkeev S. // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1893. 030045. DOI: 10.1063/1.5007503.
39. Galev R. Numerical simulation of light propagation through composite and anisotropic media using supercomputers. Supercomputing / Galev R.,

Kudryavtsev A., Trashkeev S. // RuSCDays 2017 / V. Voevodin and S. Sobolev (Eds.). Springer, Cham, (Communications in Computer and Information Science, V.793). Chapter 18. P. 229-240. DOI: 10.1007/978-3-319-71255-0_18.

40. Галёв Р.В. Численное моделирование генерации оптических вихрей при прохождении пучка света через слой нематического жидкого кристалла / Галёв Р.В., Кудрявцев А.Н., Трашкеев С.И. // Марчуковские научные чтения – 2017. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г.). Новосибирск: Омега Принт, 2017. С. 170.
41. Патент на полезную модель RU 172914 U1. Миниатюрный волоконный оптический затвор на основе жидкого кристалла / Трашкеев С.И., Нюшков Б.Н., Колкер Д.Б., Денисов В.И., Примаков Д.Ю. // Заявка № 2016125107 от 22.06.2016. Дата публ. 31.07.2017.
42. Budagovsky I. Optical Fredericksz transition and director field structure recording in dye-doped nematic liquid-crystalline polymer / Budagovsky I., Kuznetsova A., Shvetsov S., Smayev M., Zolot'ko A., Statsenko P., Trashkeev S., Bobrovsky A., Boiko N., Shibaev V. // Journal of Molecular Liquids. 2019. V. 276. P. 275-281. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.11.113.
43. Trashkeev S.I. Mode conversion of infrared laser beam in fibre-coupled liquid crystal / Trashkeev S.I., Nyushkov B.N., Shvetsov S.A. // AIP Conference Proceedings. 2019. V. 2098. 020015. DOI: 10.1063/1.5098159.
44. Kuznetsov S.A. Применение концепции ультратонких резонансных поглотителей для управления миллиметровым излучением с помощью жидких кристаллов / Kuznetsov S.A., Nikolaev N.A., Trashkeev S.I., Lazorskiy P.A., Arzhannikov A.V. // Сибирский физический журнал. 2019. Т.14, N 2. С. 86-102. DOI: 10.25205/2541-9447-2019-14-2-86-102.
45. Trashkeev S.I. Harmonic generation in a nematic liquid crystal / Trashkeev S.I., Vasenin N.T., Vatnik S.M., Vedin I.A., Ivanenko A.V., Klementyev

V.M. // Laser Physics Letters. 2020. V.17, N 7. 075002. DOI: 10.1088/1612-202X/ab930f.

46. Nyushkov B.N. Pulse shortening in synchronously-pumped mode-locked Yb-fiber lasers / Nyushkov B.N., Smirnov S.V., Ivanenko A.V., Trashkeev S.I., Kolker D.B., Kobtsev S.M. // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg. 2020. 9285861. DOI: 10.1109/ICLO48556.2020.9285861.
47. Ivanenko A.V. Generation of optical harmonics in fiber-coupled semiconducting polythiophene films / Ivanenko A.V., Trashkeev S.I., Vasenin N.T., Nyushkov B.N., Kulik L.V., Nevostruev D.A., Kobtsev S.M. // International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg. 2020. 9285822. DOI: 10.1109/ICLO48556.2020.9285822.
48. Vasenin N.T. High-efficiency generation of harmonics in polythiophene / Vasenin N.T., Ivanenko A.V., Klement'ev V.M., Kulik L.V., Nevostruev D.A., Nyushkov B.N., Trashkeev S.I., Khomyakov M.N. // Quantum Electronics. 2021. V.51, N 5. P. 437-445. DOI: 10.1070/QEL17509.
49. Shvetsov S.A. Light-induced umbilical defects due to temperature gradients in nematic liquid crystal with a free surface / Shvetsov S.A., Zolot'ko A.S., Voronin G.A., Emelyanenko A.V., Andreev M.M., Budakov M.A., Statsenko P.A., Trashkeev S.I. // Optical Materials express. 2021. V. 11, N 6. P. 1705-1712. DOI: 10.1364/OME.425926.
50. Shvetsov S.A. Light beam interaction with the nematic liquid crystal film deposited onto absorbing substrate / Shvetsov S.A., Zolot'ko A.S., Voronin G.A., Emelyanenko A.V., Statsenko P.A., Trashkeev S.I. // MODERN PROBLEMS OF LASER PHYSICS - MPLP-2021: The IX International Symposium, 22-28 August 2021, Novosibirsk. C. 143-144. DOI: 10.54041/9785859571857.
51. Shvetsov S.A. Coexistence of light-induced thermocapillary and orientational effects in thin nematic films with a free surface / Shvetsov S.A., Zolot'ko A.S., Voronin G.A., Emelyanenko A.V., Statsenko P.A.,

Trashkeev S.I. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2067. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/2067/1/012016.

52. Программный комплекс для моделирования процесса распространения излучения в квазиоптическом приближении в среде с переменным коэффициентом преломления / Стаценко П.А., Трашкеев С.И. // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022660641. Заявка № 2022660281. Дата поступления 08.06.2022. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08.06.2022.
53. Kirpichnikov A.V. Optimization of the optical scheme of weak absorption measurement in transparent materials / Kirpichnikov A.V., Petrov V.V., Trunov V.I., Statsenko P.A., Trashkeev S.I. // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). St.Petersburg, Russia, 20-24 June, 2022. P. 91 (R2-p19). DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840027.
54. Трашкеев С.И. Нелокальный тензорный параметр порядка деформированного состояния жидких кристаллов / Трашкеев С.И., Стаценко П.А., Хомяков М.Н., Швецов С.А. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2023. Т. 23, № 3. С. 59-69. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.3.59.

Список использованной литературы

1. De Gennes P.G. Soft matter / De Gennes P.G. // Reviews of Modern Physics. 1991. V. 64, N 3.
2. Клеман М. Основы физики частично упорядоченных сред / Клеман М., Лаврентович О. М.: Физматлит, 2007. 680 с. (Kleman M. Soft Matter Physics / Kleman M., Lavrentovich O. New York: Springer-Verlag, 2003.)
3. Алешин А.Н. Транспорт носителей заряда в проводящих полимерах на металлической стороне перехода металл–диэлектрик (Обзор) / Алешин А.Н. // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, N 11. С. 2162-2184.
4. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: структура и свойства / Блинов Л.М. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2013. (Blinov L.M. Structure and

Properties of Liquid Crystals / Blinov L.M. Dordrecht et al.: Springer, 2011.)

5. Khoo I.-C. Liquid Crystals. 2nd ed. / Khoo I.-C. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
6. Dinger A.R., Stark H. Twist transition in nematic droplets: a stability analysis / Dinger A.R., Stark H. // Liquid Crystals. 1999. V. 26, N 5. P. 753-758.
7. Shvetsov S.A. Optical orientation of nematic liquid crystal droplets via photoisomerization of an azodendrimer dopant / Shvetsov S.A., Emelyanenko A.V., Boiko N. I., Zolot'ko A.S., Yan-Song Zhang, Jui-Hsiang Liu, Khokhlov A.R. // Beilstein J. Nanotechnol. 2018. V. 9. P. 870–879.
8. Де Жен П. Физика жидких кристаллов / Де Жен П. М.: Мир, 1977. (De Gennes P.G. The Physics of Liquid Crystals / De Gennes P.G. Clarendon, Oxford, 1975.)
9. Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах / Пикин С.А. М.: Наука, 1981.
10. Eringen A.C. Nonlocal Continuum Field Theories / Eringen A.C. N.Y. et al.: Springer, 2001.
11. Eringen C.A. Nonlocal continuum theory of liquid crystals / Eringen C.A. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1981. V. 75. P. 321-343.
12. De Gennes P.G. Short range order effects in the isotropic phase of nematics and cholesterics / De Gennes P.G. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1971. V. 12. P. 193-214.
13. Zwetkoff W. Uber die Moleculanordnung in der anisotrop-flussigen / Zwetkoff W. // Phase, Acta Physicochim. URSS. 1942. V. 16. P. 132.
14. Taflove A., Hagness S.C. Computational electrodynamics. The finite-difference time-domain method. 3rd ed. / Taflove A., Hagness S.C. Boston; N.Y.: Artech House, 2005.

15. Жаркова Г.М., Трашкеев С.И. Ориентация жидких кристаллов в сферическом объеме / Жаркова Г.М., Трашкеев С.И. // Кристаллография. 1989. Т. 34, вып. 3. С. 695-701.
16. Коротаев В.М. Оптический отклик слоя нематического жидкого кристалла на воздействие потока воздуха / Коротаев В.М., Трашкеев С.И., Жаркова Г.М. // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 4.
17. Ландау Л.Д. Теория упругости / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. М.: Наука, 1987. Т. VII. 248 с.
18. Акопян Р.С. Термомеханические эффекты в деформированных нематиках / Акопян Р.С., Зельдович Б.Я. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87, вып. 5(11). С. 1660-1669.
19. Ou-Yang Zhong-can. Theory of second-harmonic generation in nematic liquid crystals / Ou-Yang Zhong-can, Xie Yu-zhang // Phys. Rev. A. 1985. V. 32, N 2. P. 1189-1200.
20. Nonlinear Optical Properties of Organic Molecules and Crystals / Chemla D.S., Zyss J. (Ed.). San Diego: Academic Press, Inc., 1987. V. 1,2.
21. Greene B.I. All-Optical Nonlinearities in Organics / Greene B.I., Orenstein J., Schmitt-Rink S. // Science. 1990. V. 247(4943). P. 679.
22. Manning M.L. Essay: Collections of Deformable Particles Present Exciting Challenges for Soft Matter and Biological Physics / Manning M.L. // Phys. Rev. Letters. 2023. V. 130. 130002.