

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи
УДК [535:530.182]:532.783

Золотько Александр Степанович

Оптическая ориентация жидких кристаллов

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор Л.М. Блинов,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской Академии Наук, г. Москва

Доктор физико-математических наук, профессор В.А. Беляков,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской Академии Наук,
г. Черноголовка, Московская область

Доктор физико-математических наук А.В. Казначеев,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской Академии Наук, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, г. Москва

Защита состоится 26 октября 2015 г. в 12 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.023.03 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н.Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 53, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук и на сайте <http://www.lebedev.ru>

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 года

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03,
доктор физико-математических наук

М.А. Казарян

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Жидкокристаллические фазы занимают промежуточное положение между обычной изотропной жидкостью без дальнего пространственного порядка молекул и их преимущественной ориентации и кристаллическими фазами с дальним трехмерным трансляционным порядком и ориентационной упорядоченностью. Жидкие кристаллы (ЖК) относятся к так называемой “мягкой материи”, для которой характерна чрезвычайно высокая восприимчивость к внешним воздействиям. В сочетании с большой анизотропией, это обеспечивает уникальность и разнообразие свойств ЖК и возможность их применений.

Жидкие кристаллы применяются в дисплеях и электрооптических модуляторах света, используются для визуализации температурных полей, медицинской диагностики, управления световыми полями с помощью фотоннокристаллических структур и т.д. Они рассматриваются как перспективные материалы для лазеров с распределенной обратной связью и терагерцовой техники. ЖК структуры часто встречаются в биологических тканях.

Значительный интерес представляют эффекты взаимодействия ЖК с внешними полями. Основные закономерности воздействия низкочастотных полей (магнитного и электрического) на нематические жидкие кристаллы (НЖК) были установлены в работах В.К. Фредерикса еще в 1920–1930 гг. Был обнаружен пороговый эффект переориентации директора НЖК (единичного вектора, характеризующего направление преимущественной ориентации молекул), проявляющийся при взаимно перпендикулярной ориентации поля и директора. Переориентация директора НЖК в низкочастотном электрическом

поле, обусловленная анизотропией диэлектрической проницаемости, лежит в основе работы большинства современных жидкокристаллических дисплеев.

Вместе с тем, вопрос об аналогичных явлениях, происходящих в ЖК под действием электрических полей со световыми частотами оставался открытым вплоть до 1980 г., когда в работах [1, 2] наблюдалась переориентация директора под действием светового поля.

После нашей работы [2] стало ясно, что оптическая ориентация директора НЖК, имея общность с переориентацией в низкочастотных полях (в частности, наличие порога), обнаруживает также и принципиальные отличия (например, колебания директора). Эти отличия связаны с проявлением волновых свойств света при его распространении в жидком кристалле, являющемся сильно анизотропной и (при деформации директора) неоднородной средой. Кроме того, оптическая ориентация в НЖК сопровождается сильными эффектами самовоздействия световых пучков.

Помимо проявления специфически оптических эффектов, не имеющих аналогов в низкочастотных полях, актуальность исследования оптической ориентации в жидких кристаллах обусловлена высокой эффективностью их взаимодействия со светом, что проявляется в больших значениях оптических нелинейностей.

С практической точки зрения изучение оптической ориентации жидких кристаллов важно для выяснения возможностей создания чисто оптических модуляторов, оптических ограничителей, устройств для усиления световых пучков.

Цель работы

Выяснение специфических свойств оптической ориентации жидких кристаллов и связанных с ней трансформаций световых пучков.

Достижение этой цели предполагало решение следующих **задач**:

1. Установление закономерностей ориентационного воздействия света на прозрачные НЖК.
2. Выяснение характерных черт трансформации световых пучков в жидких кристаллах.
3. Изучение комбинированного воздействия света и низкочастотного электрического поля на НЖК.
4. Поиск эффектов оптической ориентации в поглощающих жидких кристаллах.
5. Поиск возможностей реализации бистабильности НЖК и ориентационных переходов первого рода в присутствии светового поля.

Новизна работы

Большинство эффектов взаимодействия света с НЖК, рассмотренных в диссертации, в том числе, ориентационный фазовый переход, аналогичный переходу Фредерикса в низкочастотных полях, колебания директора НЖК в световом поле, абберационная самофокусировка светового пучка в прозрачных НЖК, самовоздействие света в НЖК в присутствии постоянного электрического поля, оптическая генерация периодических структур в холестерических жидких кристаллах (ХЖК), знакопеременная оптическая нелинейность в НЖК с примесью азокрасителей, оптический ориентационный фазовый переход первого рода в НЖК в линейно поляризованном световом поле, возрастание оптического вращающего момента при переходе от низкомолекулярных к высокомолекулярным поглощающим добавкам были впервые обнаружены в работах автора.

Научная и практическая значимость работы

Исследования, вошедшие в диссертацию, позволили установить полную картину взаимодействия света с прозрачными НЖК в зависимости от направления распространения и поляризации световой волны. Был обнаружен и

изучен ориентационный фазовый переход под действием света, аналогичный переходу переходу Фредерикса в низкочастотных полях – пороговая переориентация директора НЖК при взаимно перпендикулярной ориентации светового поля и директора (светоиндуцированный переход Фредерикса, СПФ). Выявлены принципиальные отличия в воздействии на НЖК световых и низкочастотных полей, наиболее яркими из которых являются колебательные режимы поля директора в обыкновенной световой волне, нелинейная зависимость скоростей переориентации и релаксации поля директора от квадрата поля и зависимость порога от ширины светового пучка.

Обнаружены новые эффекты самовоздействия света в НЖК, в том числе, нелинейная оптическая активность при нелинейной рефракции лучей в НЖК и генерация оптической катастрофы “гиперболическая омбилика” в световом пучке, прошедшем НЖК. Показано, что абберрационное самовоздействие света является эффективным инструментом для исследования эффектов оптической ориентации в жидких кристаллах и их физических механизмов. В частности, регистрируя параметры абберрационной картины (число абберрационных колец, расходимость, интенсивность на оси, поляризацию абберрационных колец), можно установить величину и знак светоиндуцированного показателя преломления, восстановить динамику трансформации поля директора и установить, какое воздействие света (объемное или поверхностное) вызывает переориентацию директора.

В холестерической фазе жидких кристаллов обнаружена и исследована оптическая генерация двумерных периодических структур поля директора, обусловленная изменением шага холестерической спирали при нагреве ХЖК и при фотоконформационных переходах составляющих его молекул.

В НЖК с примесью красителей обнаружена ориентационная оптическая нелинейность, величина и знак которой зависят от геометрии взаимодействия светового поля и директора НЖК. Зависимость величины нелинейности от угла

между световым полем и директором НЖК позволила впервые реализовать СПФ первого рода в линейно поляризованной световой волне. Предложен механизм оптической ориентации поглощающих нематических жидких кристаллов, связанный с нецентральностью межмолекулярного взаимодействия.

Установлено, что переход от низкомолекулярных поглощающих добавок к высокомолекулярным (при одинаковой концентрации хромофоров) существенно увеличивает оптический вращающий момент, действующий на директор НЖК. Для НЖК с добавкой гребнеобразного полимера получено наибольшее по абсолютной величине значение отношения фактора усиления η оптического вращающего момента к поглощению $\eta_\alpha = \eta / (\alpha_{\parallel} + 2\alpha_{\perp}) = - 2.3 \text{ см}$ ($\alpha_{\parallel}$ и $\alpha_{\perp}$ – коэффициенты поглощения необыкновенной и обыкновенной волн).

Наблюдавшиеся эффекты взаимодействия света с жидкими кристаллами могут использоваться для измерения макроскопических параметров НЖК, характеризующих их оптические и вязкоупругие свойства.

Ориентационные нелинейности жидких кристаллов позволяют наблюдать и исследовать нелинейнооптические эффекты в слабых световых полях.

Эффекты ориентационного взаимодействия света с прозрачными и поглощающими НЖК (в том числе, в присутствии постоянного поля), в частности эффекты оптической бистабильности, представляют интерес для создания чисто оптических модуляторов, оптических ограничителей, приборов для усиления световых пучков.

Аксиально симметричные структуры, возникающие при фазовом переходе нематик–изотропная жидкость, могут быть использованы для генерации оптических вихрей.

Выяснение характера и механизмов взаимодействия света с простейшими жидкокристаллическими фазами (нематической и холестерической) образует фундамент для исследования возможности нелинейнооптических эффектов в

более сложных мезофазах (например, в полимерных жидкокристаллических фазах, жидкокристаллических фазах в биологических объектах).

Совокупность полученных результатов представляет собой новое крупное научное достижение – решение задачи о нелинейном ориентационном взаимодействии поляризованного света с жидкими кристаллами.

Личный вклад автора

Эксперименты по изучению взаимодействия света с прозрачными НЖК, с холестерическими и смектическими жидкими кристаллами, с НЖК в области температурных фазовых переходов и первые эксперименты по исследованию взаимодействия света с НЖК в присутствии постоянного поля были проведены совместно с В.Ф. Китаевой. Ряд экспериментов по взаимодействию НЖК со светом циркулярной поляризации был выполнен совместно с В.Ю. Федоровичем. Остальные экспериментальные исследования были выполнены под руководством автора или лично автором. Автор внес определяющий вклад в разработку моделей взаимодействия света с НЖК.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В нематической фазе жидких кристаллов под действием света происходит фазовый переход, аналогичный переходу Фредерикса в низкочастотных электрических и магнитных полях и отвечающий изменению преимущественного направления молекул (директора). Переход имеет пороговый характер при невозмущенной ориентации директора кристалла, перпендикулярной вектору светового поля. Светоиндуцированный переход качественно отличается от перехода в низкочастотных полях: возникают колебания поля директора в обыкновенной световой волне, скорости переориентации и релаксации директора нелинейно зависят от мощности светового пучка.

2. Ориентационное взаимодействие светового пучка с плотностью мощности 10^3 Вт/см^2 с НЖК приводит к его абберационной самофокусировке и нелинейной оптической активности,
3. При прохождении светового пучка через НЖК, находящийся под воздействием статического электрического поля, происходит снятие его экранировки, приводящее к деформации поля директора и самовоздействию светового пучка. При этом трансформация светового пучка принципиально отличается от таковой в отсутствие постоянного поля, расходимость теряет симметрию.
4. В холестерических жидких кристаллах (ХЖК) самовоздействие света при плотности мощности $\sim 10^3 \text{ Вт/см}^2$ приводит к развитию дифракционной картины, обусловленной светоиндуцированными двумерными периодическими структурами, возникающими из-за изменения шага холестерической спирали при фото-конформационных внутримолекулярных переходах вещества ХЖК.
5. Установлено, что оптический вращающий момент, индуцируемый в нематической матрице высокомолекулярными соединениями, в несколько раз превышает момент, индуцируемый низкомолекулярными красителями. Добавка 0.5% гребнеобразного полимера повышает коэффициент нелинейности нематической матрицы в 60 раз.
6. При нормальном падении световой волны на НЖК происходит ориентационный фазовый переход первого рода, обладающий широкой областью бистабильности поля директора. Переход наблюдался в НЖК с примесью дендримера. Род оптического перехода может переключаться при изменении поляризации света или добавлении низкочастотного поля. Воздействие света трансформирует переход второго рода, происходящий при изменении низкочастотного поля, в переход первого рода.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертации, основана на большом количестве измерений, неоднократно выполненных с разными образцами, и соответствии экспериментальных данных результатам расчетов.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации докладывались на VII Вавиловской конференции (Новосибирск, 1982), XI Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Ереван, 1982), Международной конференции и школе “Лазеры и применения” (Бухарест, Румыния, 1982), Международном симпозиуме “Синергетика и кооперативные явления в твердых телах и макромолекулах ” (Таллин, 1982), XIX Всесоюзном съезде по спектроскопии (Томск, 1983), 4-й международной школе по когерентной оптике (Бехин, Чехословакия, 1983), Международных конференциях по когерентной и нелинейной оптике (Минск, 1988; Москва, 1998; Минск, Беларусь, 2001; Санкт-Петербург, 2005; Минск, Беларусь, 2007; Казань, 2010), II Всесоюзном семинаре “Оптика жидких кристаллов” (Красноярск, 1990), 10-й конференции по конденсированным средам (Лиссабон, Португалия, 1990), V, VI, VII, IX, XI, XII, XIII и XIV Международных семинарах по оптике жидких кристаллов (Шиюфок, Венгрия, 1993; Ле Туке, Франция, 1995; Хеппенхайм, Германия, 1997; Сорренто, Италия, 2001; Клеарвотер, США, 2005; Пуэбла, Мексика, 2007; Эриче, Италия, 2009; Ереван, Армения, 2011), 16-й и 22-й международных конференциях по жидким кристаллам (Кент, США, 1996; Чеджу, Корея, 2008), Международной конференции по нелинейной спектроскопии рассеяния света (19-е Европейское совещание по КАРС) (Москва, 2000), Международной конференции по квантовой электронике (Москва, 2002), Научной сессии МИФИ (Москва, 2003), 10-й Международной конференции по нелинейной оптике жидких и фоторефрактивных кристаллов (Алушта, Украина, 2004), VI Международной

конференции “Лазерная физика и оптические технологии” (Гродно, Беларусь, 2006), 2-м Международном совещании по жидким кристаллам для фотоники (Кембридж, Великобритания, 2008), 10-й Европейской конференции по жидким кристаллам (Кольмар, Франция, 2009), 5-й Всероссийской Каргинской конференции “Полимеры-2010”.

Основные результаты опубликованы в 48 статьях в рецензируемых научных журналах.

Представленные в диссертации результаты получены в отделе Оптики низкотемпературной плазмы ФИАН. Работа выполнялась в рамках планов ФИАН и поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 98-03-32226-а, 02-02-16927-а, 04-02-17354-а, 05-02-17418-а, 08-02-01382-а, 09-02-12216-офи_м, 11-02-01315-а), Федеральной программой “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 02.740.11.0447), Российским научным фондом (грант 14–12–00784).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Объем диссертации составляет 218 страниц, включая 94 рисунка, одну таблицу и список литературы из 317 наименований.

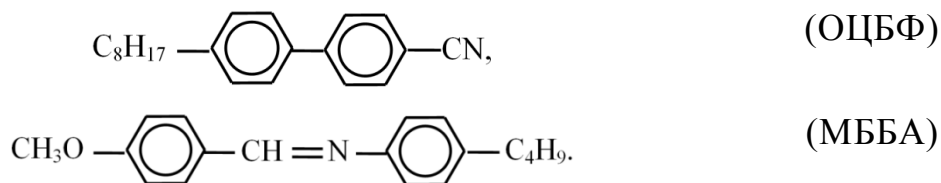
Содержание диссертационной работы

Во **Введении** дана краткая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулирована цель исследования и приведен обзор предшествующих работ по оптике жидких кристаллов.

В **первой главе** описаны результаты исследования ориентационного воздействия света на прозрачные НЖК.

В параграфе 1.1 изложены результаты первых экспериментальных работ, в которых был обнаружен фотоиндуцированный переход Фредерикса (СПФ) и установлены его основные свойства.

Исследовались гомеотропно ориентированные образцы НЖК ОЦБФ и МББА



ОЦБФ и МББА имеют нематическую фазу в температурных интервалах 33–40°C и 22–47°C, соответственно. Образцы освещались сфокусированным пучком непрерывного аргонового лазера (радиус перетяжки $w_0 \sim 50$ мкм) при различных углах падения и различной поляризации световой волны (рис. 1). При этом наблюдались качественные различия в трансформации светового пучка.

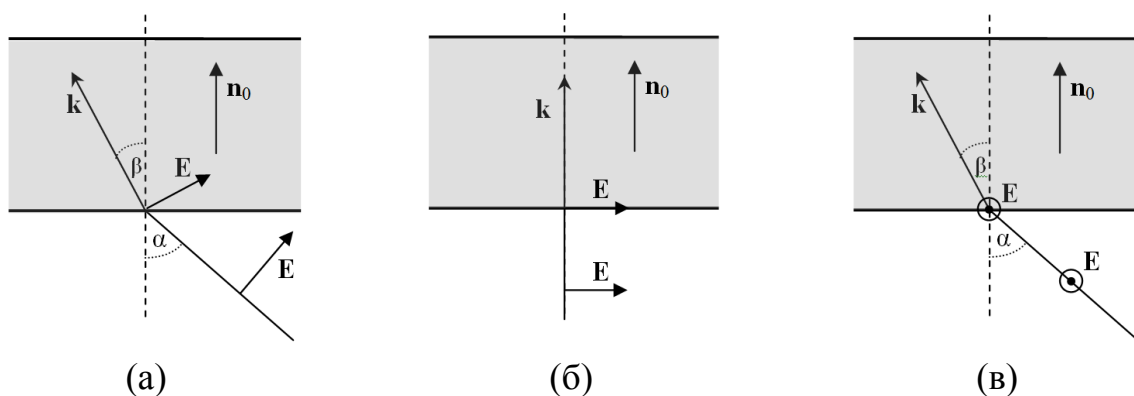


Рис. 1. Геометрия взаимодействия светового поля и директора гомеотропно ориентированного НЖК: (а) наклонное падение горизонтально поляризованной световой волны, (б) нормальное падение линейно (горизонтально) поляризованной световой волны. (в) наклонное падение вертикально поляризованной световой волны, $\mathbf{E}$ – световое поле, $\mathbf{k}$ – волновой вектор света, α – угол падения, β – угол преломления, $\mathbf{n}_0$ – невозмущенный директор НЖК.

При наклонном падении необыкновенной световой волны на НЖК (рис. 1а) наблюдалось резкое уширение светового пучка и возникновение в его поперечном сечении системы колец, характерных для абберационного

самовоздействия. Зависимости расходимости $\theta(P)$ (для ОЦБФ) и числа абберационных колец $N(P)$ (для МББА) от мощности светового пучка P представлены на рис. 2 (кривые 2–4) и 3 (кривая 2). При больших значениях P происходит насыщение расходимости θ и числа абберационных колец N . Обращают на себя внимание большие значения θ и N : расходимость достигает значения $\theta \sim 25^\circ$; число абберационных колец $N \sim 60$. Время установления стационарной абберационной картины зависит от P и α и составляет 2–30 с для ОЦБФ. Фотографии абберационной картины при различных значениях мощности светового пучка P представлены на рис. 4.

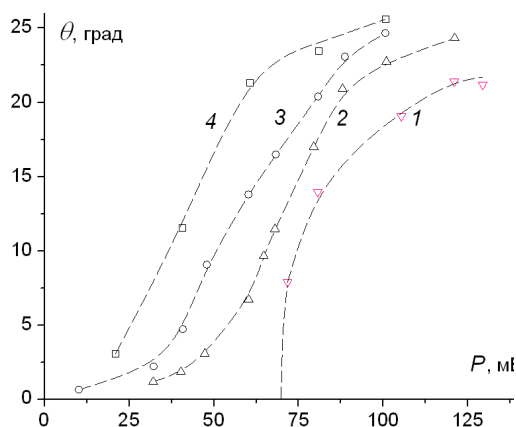


Рис. 2. Зависимость расходимости светового пучка, прошедшего через НЖК ОЦБФ ($L = 150$ мкм, $T = 37^\circ$) от его мощности P при различных углах падения $\alpha = (1) 0^\circ, (2) 10^\circ, (3) 20^\circ, (4) 30^\circ$.

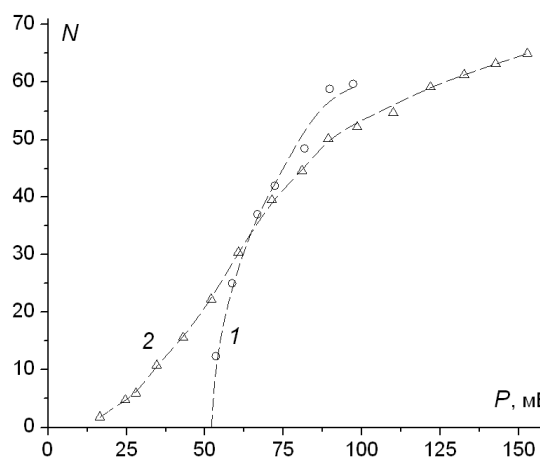


Рис. 3. Зависимость числа абберационных колец N для светового пучка, прошедшего через НЖК МББА ($L = 120$ мкм, $T = 23^\circ$), от его мощности P при различных углах падения $\alpha = (1) 0^\circ, (2) 30^\circ$.

При нормальном падении линейно поляризованной волны на НЖК абберационная картина возникала только при превышении некоторой пороговой мощности светового пучка $P_{\text{пор}}$ (рис. 2 и 3, кривые 1). При $P > P_{\text{пор}}$ картина возникала через некоторое время задержки t_3 и развивалась аналогично случаю наклонного падения света. Так, для 150-мкм образца ОЦБФ порог равен $P_{\text{пор}} =$

70 мВт, пороговая плотность мощности $\sim 10^3$ Вт/см². Вблизи порога времена задержки могут быть очень большими ($t_3 \sim 10$ мин).

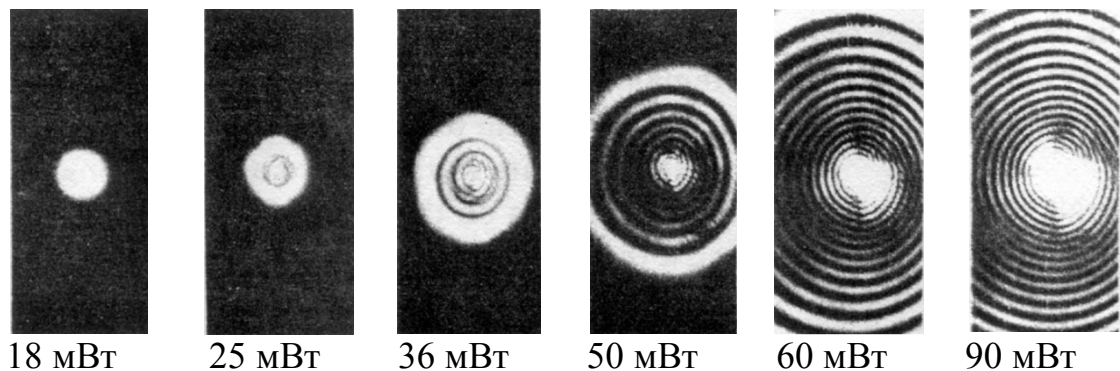


Рис. 4. Абберационная картина светового пучка (угол падения $\alpha = 30^\circ$), прошедшего через НЖК ОЦБФ ($L = 150$ мкм, $T = 37^\circ$), при различных значениях мощности P .

Величина порога светоиндуцированной переориентации, как и в случае низкочастотных полей, зависит от толщины НЖК. Для ОЦБФ при уменьшении толщины образца L от 150 до 50 мкм величина пороговой мощности увеличивалась примерно в 3 раза, но закон $E_{\text{пор}} \sim 1/L$, характерный для переходов в низкочастотных полях, при этом не выполняется.

При нормальном падении на НЖК циркулярно поляризованной световой волны взаимодействие света с НЖК также является пороговым, однако порог в два раза выше, чем для света линейной поляризации. Вблизи порога картина нестабильна, период пульсаций ~ 1 мин.

При наклонном ($\alpha > 1^\circ$, рис. 1в) падении на НЖК обыкновенной волны абберационная картина нестабильна: пучок много раз уширяется и схлопывается с характерным периодом ~ 1 мин. При больших углах падения $\alpha > 10^\circ$ уширение картины для НЖК ОЦБФ не наблюдалось вплоть до мощности ~ 200 мВт.

Наблюдаемое самовоздействие светового пучка вызвано изменением показателя преломления НЖК при светоиндуцированным повороте директора НЖК (о чем однозначно свидетельствует динамика эффекта).

Таким образом, в описанных в данном параграфе экспериментах наблюдался ориентационный переход, аналогичный переходу Фредерикса в низкочастотных полях (светоиндуцированный переход Фредерикса, СПФ). Для него характерны свойства, ранее наблюдавшиеся в низкочастотных полях – пороговый характер переориентации директора при взаимно перпендикулярном расположении светового поля $\mathbf{E}$ и невозмущенного директора $\mathbf{n}_0$ ($\mathbf{E} \perp \mathbf{n}_0$), насыщение переориентации при больших полях, увеличение порога с возрастанием толщины жидкокристаллического слоя.

В то же время, эксперименты показали принципиальные отличия оптической ориентации директора от ориентации низкочастотными полями. Прежде всего, характер переориентации директора зависит не только от взаимной ориентации светового поля $\mathbf{E}$ и невозмущенного директора $\mathbf{n}_0$, но и от направления распространения световой волны (задаваемого волновым вектором $\mathbf{k}$). Наиболее ярким примером такой зависимости является возникновение колебательных режимов в поле обыкновенной волны при возрастании угла падения света на НЖК. Установлено также, что оптическая переориентация директора НЖК световым пучком сопровождается абберационной самофокусировкой.

Результаты детального экспериментального и теоретического исследования ориентационного взаимодействия света и НЖК представлены в последующих параграфах первой главы и в первых двух параграфах второй главы.

В заключительной части данного параграфа анализируется зависимость порога СПФ от ширины пучка и толщины НЖК. Показано, что причиной отклонения от закона $E_{пор} \sim 1/L$ является поперечная неоднородность светового поля. Найдено приближенное выражение для порога светоиндуцированной переориентации директора для электрического поля E_0 на оси светового пучка

$$E_{0,\text{пор.}} = \sqrt{\frac{8\pi K}{\Delta\varepsilon}} \left(\frac{\pi}{L} + \frac{\sqrt{2}}{w_0} \right), \quad (1)$$

где K – упругая постоянная Франка, $\Delta\varepsilon$ – анизотропия диэлектрической проницаемости на световой частоте. Соотношение (1) означает, что зависимость $E_{\text{пор}} \sim 1/L$ имеет место только для широких ($L \gg w_0$) световых пучков. Результаты расчета пороговой мощности пучка с использованием формулы (1) объясняют зависимость $P_{\text{пор}}$ от толщины НЖК, обнаруженную в наших экспериментах. Кроме того, результаты проведенных расчетов хорошо согласуются с результатами измерения зависимости $P_{\text{пор}}(w_0)$, проведенного в [3] в широком диапазоне значений w_0 .

В параграфе 1.2 вариационным методом найдено надпороговое поле директора при СПФ и с его помощью рассчитаны основные параметры абберационной самофокусировки (расходимость светового пучка θ и число абберационных колец N в его поперечном сечении). Результаты хорошо согласуются с описанными в предыдущем параграфе экспериментальными данными.

Показано, что наблюдаемое в эксперименте в области насыщения число абберационных колец соответствует полному (на 90°) повороту директора НЖК параллельно световому полю и светоиндуцированному изменению показателя преломления $\Delta n = 0.2$.

В параграфе 1.3 экспериментально и теоретически изучена динамика переориентации и релаксации директора в световом пучке.

Эксперимент проводился с гомеотропно ориентированным образцом НЖК ОЦБФ толщиной $L = 150$ мкм. При этом световой пучок фокусировался в НЖК линзами с различными фокусными расстояниями $f = 170$ или 280 мм (радиусы перетяжки $w_0 = 42$ и 77 мкм, пороги СПФ $P_{\text{пор}} = 47$ и 85 мВт).

Динамика переориентации директора изучалась по развитию осцилляций интенсивности в центре абберационной картины (соответствующих появлению

или исчезновению абберационных колец) после резкого увеличения мощности пучка до величины $P > P_{\text{пор}}$. Релаксация поля директора изучалась для $w_0 = 77$ мкм после уменьшения мощности пучка от значения $P > P_{\text{пор}}$ до конечной мощности $P < P_{\text{пор}}$.

Было установлено, что переориентация и релаксация директора являются экспоненциальными $\psi_m(t) \sim e^{\chi t}$ (ψ_m – угол поворота директора на оси пучка в центре НЖК). При $P > P_{\text{пор}}$ параметр χ имеет смысл скорости переориентации ($\chi > 0$); при $P < P_{\text{пор}}$ – скорости релаксации ($\chi < 0$). Зависимости $\chi(P)$ не являются линейными. Так, при $P < 20$ мВт ($w_0 = 77$ мкм) скорость релаксации постоянна, при больших значениях мощности величина χ быстро возрастает. Нелинейный характер зависимости $\chi(P)$ еще раз демонстрирует принципиальное различие переориентации директора НЖК в ограниченном световом пучке и в пространственно однородных полях.

Для теоретического описания динамики поля директора было получено уравнение для угла поворота директора в гауссовом световом пучке, аналогичное по форме нестационарному уравнению Шредингера. Это уравнение было решено вариационным методом, его решение позволило дать адекватное описание динамики переориентации и релаксации директора НЖК в световом пучке. При этом сложный характер зависимости $\chi(E)$ связан с тем обстоятельством, что поперечно-неоднородная мода деформации поля директора возбуждается только при превышении световым полем некоторого критического значения $E_{\text{кр}} < E_{\text{пор}}$ (подобно тому, что уровень дискретного спектра появляется только при определенной глубине потенциальной ямы).

По экспериментальным данным была определена вращательная вязкость НЖК ОЦБФ $\gamma_1 = 0.6$ П. Эта величина совпадает с известным из литературы значением.

СПФ в прозрачных НЖК под действием линейно поляризованного света, как и переход Фредерикса в низкочастотных полях [4, 5], можно рассматривать

как ориентационный фазовый переход второго рода. При этом параметром порядка является угол поворота директора, а аналогом температуры – мощность светового пучка. Результаты, полученные в данном параграфе, выявляют новое свойство фазовых переходов второго рода, заключающееся в нелинейности зависимости скорости релаксации от расстояния до точки перехода.

В параграфе 1.4 представлены результаты экспериментального и теоретического исследования колебаний поля директора и параметров светового пучка, возбуждаемых при наклонном падении на гомеотропно ориентированный НЖК обыкновенной волны (рис. 1в).

Эксперименты, проведенные с гомеотропно ориентированным НЖК ОЦБФ показали, что при больших углах падения ($\alpha > 20^\circ$) самофокусировка светового пучка не наблюдалось вплоть до 300 мВт.

В интервале углов падения $1-2^\circ < \alpha < 20^\circ$ возникает колебательный режим самофокусировки (и, соответственно, переориентации директора НЖК), который является пороговым. Пороговая мощность возрастает от 50 до 220 мВт при увеличении угла падения α от 0° до 20° .

С увеличением α при фиксированной мощности P амплитуда колебаний уменьшается (рис. 5). Амплитуды последовательных колебаний неодинаковы, однако периоды осцилляций (начиная со второй) близки, что позволяет говорить о среднем периоде.

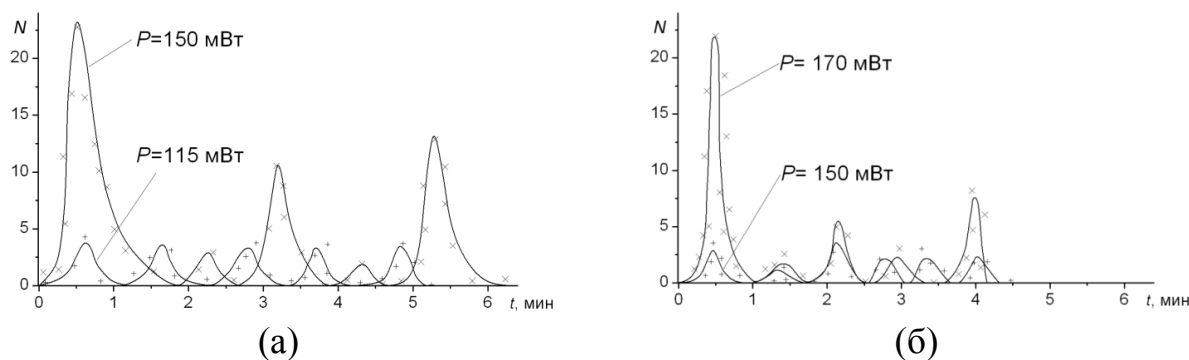


Рис. 5. Экспериментальные зависимости числа абберационных колец N при разных значениях мощности светового пучка P и угла $\alpha =$ (а) 5° и (б) 7° .

В диссертации рассчитана зависимость порога СПФ от угла падения α для ограниченного светового пучка. Результаты расчета описывают эффект возрастания порога с увеличением угла падения. Проводится сопоставление с результатами расчета порога СПФ в работах других авторов.

Представлены две развитые автором модели возникновения колебаний поля директора.

В рамках первой модели численно решена самосогласованная система дифференциальных уравнений для амплитуд необыкновенной и обыкновенной волн и поля директора. Для упрощения, рассматривалось нормальное падение света на НЖК с наклонными граничными условиями. Поле директора описывалось полярным углом ψ – угол между директором НЖК и осью Y, перпендикулярной ЖК слою и азимутальным углом φ – угол между проекцией директора на плоскость ЖК слоя и плоскостью, проходящей через невозмущенный директор и ось Y. Для этих углов использовалось модовое приближение

$$\psi(y,t) = \beta + \psi_1(t)\sin(\pi y/L), \quad (2)$$

$$\varphi(y,t) = \varphi_1(t)\sin(\pi y/L), \quad (3)$$

где β – угол преломления. Результаты расчета показывают возникновение предельного цикла. Рассчитанный период (60 с) по порядку величины совпадает с характерными значениями, наблюдавшимися в эксперименте. Амплитуда первой осцилляции значительно больше амплитуд последующих осцилляций, что согласуется с экспериментом.

В рамках второй модели [6] рассматривалось наклонное падение световой волны на НЖК с невозмущенной ориентацией директора, перпендикулярной стенкам ячейки. Исследовался случай достаточно малых углов отклонения директора НЖК от невозмущенной ориентации. Обыкновенные дифференциальные уравнения для амплитуд необыкновенной и обыкновенной световых волн были решены методом

усреднения. Далее методом Галеркина была получена система из трех обыкновенных дифференциальных уравнений для угловых координат поля директора ψ_0 , φ_0 , φ_1 , определяемых соотношениями

$$\psi(y,t) = \psi_0(t) \sin(\pi y/L), \quad (4)$$

$$\varphi(y,t) = \varphi_0(t) + \varphi_1(t) \cos(\pi y/L). \quad (5)$$

Здесь φ – угол между проекцией директора на плоскость ЖК слоя и плоскостью падения световой волны.

С помощью численного решения системы дифференциальных уравнений было показано, что мере возрастания плотности мощности световой волны возникают апериодические, затухающие и периодические колебания. Результаты расчета хорошо описывают экспериментальные результаты [6], полученные соавторами диссертанта.

Впервые обнаруженные нами в [2] осцилляции поля директора в обыкновенной световой волне привлекли значительное внимание и изучались в работах ряда исследовательских групп (в, основном, с точки зрения исследования сценариев перехода от регулярных к хаотическим колебаниям). Обзор многих работ можно найти в [7].

В параграфе 1.5 представлены результаты экспериментального и теоретического исследования СПФ в поле нормально падающего светового пучка циркулярной поляризации.

Эксперименты проводились с гомеотропно ориентированными НЖК МББА ($L = 120$ мкм) и ОЦБФ ($L = 150$ мкм). Как и в случае линейной поляризации, наблюдалось пороговое абберационное самовоздействие светового пучка, свидетельствующее о пороговой переориентации директора. При этом порог перехода был в два раза больше, чем для линейно поляризованного света.

Абберационная картина в прошедшем световом пучке состоит из системы абберационных колец и яркого пятна в центре, при этом

направления поляризации колец и пятна взаимно перпендикулярны и меняются во времени. Плоскость поляризации абберационных колец совпадает с плоскостью переориентации директора; пятно в центре соответствует обыкновенной волне.

Для НЖК ОЦБФ при небольшом превышении порога наблюдалась прецессия плоскости переориентации директора НЖК. При этом скорость поворота плоскости поляризации Ω , а также расхожимость картины непостоянны. Величина Ω изменялась от 0.02 до 0.07 рад/с; плоскость поляризации абберационной картины поворачивалась на 360° за время $t_{\text{пов}} = 190$ с. Вдали от порога возможна стабилизация картины (для МБА при $P = 150$ мВт $N \sim 43$ и $\theta \sim 25^\circ$).

Вращение плоскости поляризации абберационных колец (и, соответственно, плоскости переориентации директора) связано с трансформацией циркулярной поляризации света в деформированном НЖК в эллиптическую с длинной осью эллипса поляризации ориентированной под углом 45° к плоскости директора. Директор стремится ориентироваться параллельно этой оси, что и приводит к прецессии. Выполнен расчет величины Ω , результат которого согласуется с экспериментом.

В диссертации рассчитаны параметры светового пучка и поле директора НЖК при малых полярных углах его отклонения от невозмущенной ориентации. Для этого была решена самосогласованная система уравнений для амплитуд необыкновенной и обыкновенной волн и поля директора, которое характеризовалось тремя угловыми координатами ψ_0 , φ_0 , φ_1 , определяемыми соотношениями (4) и (5). Было показано, что влияние неплоской деформации поля директора ($\varphi_1 \neq 0$) на поляризацию света приводит к скачкообразному переходу в деформированное состояние (ориентационному переходу первого рода) и бистабильности поля директора. Результаты расчетов объясняют эксперимент [8].

Колебания НЖК в циркулярно поляризованной волне впоследствии экспериментально и теоретически изучались во многих работах. Теоретический анализ таких режимов предполагает учет большого числа пространственных гармоник.

Вторая глава посвящена эффектам самовоздействия света в НЖК.

В параграфе 2.1 представлены результаты экспериментального и теоретического исследования поляризации абберационной картины.

Было установлено, что поляризация картины зависит от угла α падения света на кристалл, угла θ отклонения луча от оси светового пучка и угла Ψ , отсчитываемого в плоскости экрана от горизонтали (рис. 6). При падении на НЖК необыкновенной световой волны для $\Psi = 0^\circ$ поляризация остается линейной и горизонтальной. Для остальных лучей можно выделить два случая: (1) наклонное падение света под большими углами ($\alpha > 20^\circ$) и (2) нормальное падение света и падение под малыми углами ($\alpha < 20^\circ$). В первом случае поляризация остается линейной; во второй случае – становится эллиптической.

Для данного угла α угол φ поворота плоскости поляризации (или большой оси эллипса поляризации) максимален при $\Psi = 90^\circ$ и при нормальном падении достигает 90° (рис. 7).

Трансформации поляризации вызвана нелинейной рефракцией лучей, в результате которой, при распространении света через деформированный НЖК, направления поляризации нормальных волн поворачиваются. Например, для лучей, приходящих в точки В и В', в случае нормального падения светового пучка на НЖК необыкновенная волна поляризована вертикально, в то время как для лучей, входящих в НЖК, она горизонтальна. При этом, для наклонного падения света под достаточно

большими углами выполняется режим Могена; при нормальном падении имеет место энергообмен нормальных волн.

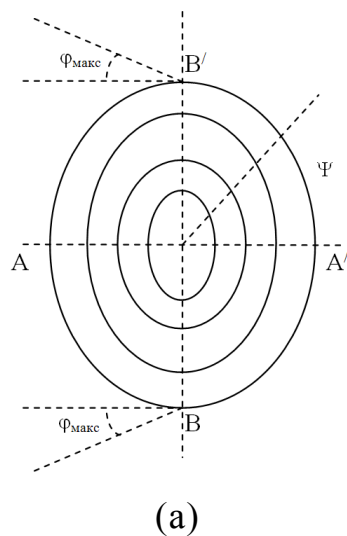


Рис. 6. Схематическое изображение абберационной картины. $\varphi_{\text{макс}}$ – максимальный угол поворота большой оси эллипса поляризации.

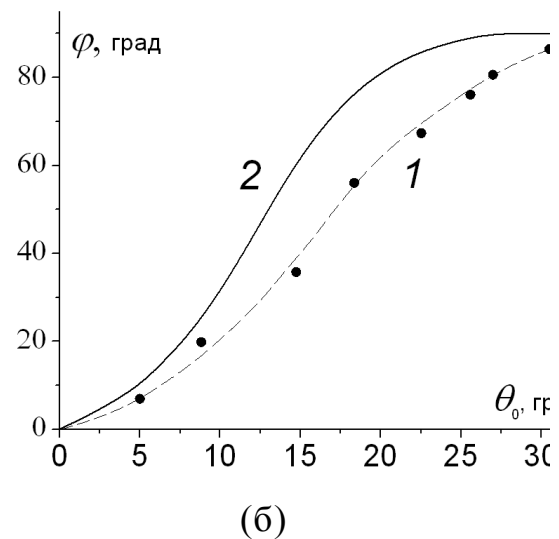


Рис. 7. Зависимость угла φ поворота оси эллипса поляризации от угла нелинейной рефракции θ_0 при $\Psi=90^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$: 1 – эксперимент, 2 – расчет.

Эффект трансформации поляризации описан с помощью укороченных уравнений для энергообмена нормальных волн. Их решения согласуются с экспериментом (см. рис. 7).

Обнаруженное явление можно рассматривать как новый сильный эффект нелинейной оптической активности, приводящий к повороту плоскости поляризации на 90° на толщине нелинейной среды ~ 100 мкм. Величина удельной константы нелинейного поворота плоскости поляризации $\sim 1 \cdot \text{град} \cdot \text{см} / \text{Вт}$. Поворот плоскости поляризации можно использовать для определения угла поворота директора на границах ЖК слоя.

В параграфе 2.2 представлены результаты экспериментального и теоретического исследования формы абберационной картины в прошедшем через НЖК и отраженном от него световых пучках.

Аберрационные кольца в световом пучке, прошедшем через НЖК, имеют овальную форму. Они вытянуты в направлении, перпендикулярном направлению поляризации падающего света; отношение вертикального (BB' , рис. 6) и горизонтального (AA') диаметров аберрационной картины составляет 1.1–1.4.

Вытянутость аберрационной картины объясняется упругой анизотропией. В приближении $K_2 < K_1 = K_3$ вариационным методом рассчитаны поле директора НЖК в световом пучке и параметры аберрационной самофокусировки.

Экспериментально исследованы свойства светового пучка, отраженного от НЖК при различных ориентациях ЖК ячеек и различных знаках оптической нелинейности (отрицательная нелинейность достигалась в НЖК с примесью красителей, см. главу IV). Было установлено, что знак самовоздействия для отраженного пучка может изменяться, также может наблюдаться дифракционная картина, соответствующая катастрофе “гиперболическая омбилика”.

Изменение распределения интенсивности в отраженном пучке связано с его вторым (после отражения от подложки) прохождением через деформированный жидкокристаллический слой. При этом дополнительный набег фазы имеет весьма сложный характер, так как (1) при отражении изменяется угол между световым полем и директором и (2) ось отраженного пучка не совпадает с осью падающего.

Сравнительный анализ стационарных аберрационных картин в прошедшем и отраженном пучках может быть использован для определения знака ориентационной нелинейности (направления светоиндуцированного поворота директора). Это оказывается возможным даже в присутствии сильного поглощения, что часто имеет место в НЖК с примесью красителей.

В параграфе 2.3 представлен обзор предшествующих работ, посвященных исследованию фоторефрактивного эффекта [9, 10]. В качестве механизмов фоторефракции рассматривались “объемный эффект” – переориентация директора НЖК в пространственно неоднородном электрическом поле, созданном светоиндуцированными зарядами, генерированными и локализованными в объеме НЖК, а также “поверхностный” эффект – переориентация директора НЖК из-за генерации и перераспределения зарядов на поверхностях жидкокристаллического слоя. Как правило, фоторефрактивные эффекты наблюдались в присутствии постоянного электрического поля и исследовались с помощью многоволнового взаимодействия. Самовоздействие светового пучка не исследовалось.

В диссертации представлены результаты экспериментального исследования самовоздействия светового пучка в чистой (нелегированной) нематической матрице ЖКМ-1277, а также в этой матрице с примесью красителей метиловый красный (МК) и родамин 6Ж (Р6Ж), в присутствии постоянного поля. Использовались образцы толщиной $L = 100$ мкм планарной и гомеотропной ориентации.

На рис. 8а показана стационарная абберационная картина, возникающая при прохождении наклонно падающего светового пучка необыкновенной поляризации через планарно ориентированный НЖК ЖКМ-1277.

Время её формирования ~ 10 с, что соответствует характерному времени переориентации директора. Картина асимметрична и с левой стороны содержит излом, соответствующий оптической катастрофе “гиперболическая омбилика”. Изменение знака угла падения α или полярности напряжения U (рис. 8б) “отражает” абберационную картину относительно вертикальной линии (штриховая линия на рис. 8а),

проходящей через точку О (центр светового пучка до развития самовоздействия). При нормальном падении света ($\alpha = 0^\circ$) постоянное электрическое поля приводит к картине из деформированных колец с незначительной асимметрией.

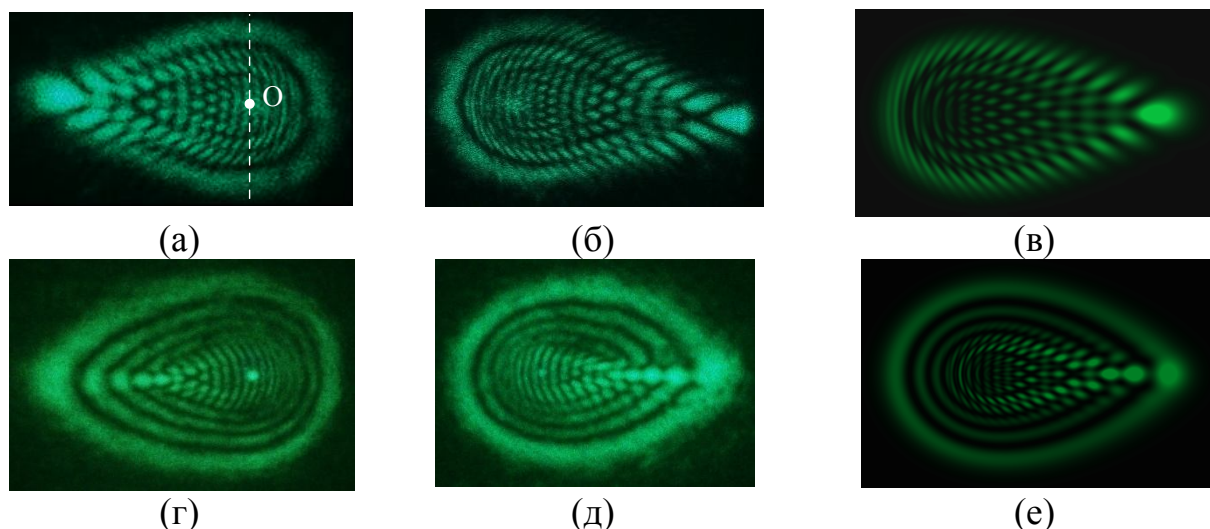


Рис. 8. (а, б, г, д) Аберрационные картины для наклонно падающего светового пучка ($\lambda = 515$ нм), прошедшего через планарно ориентированные НЖК: (а, б) ЖКМ-1277, $P = 20$ мВт, (угол падения $\alpha = 40^\circ$, приложено постоянное напряжение $U =$ (а) $+3$ В, (б) -3 В; (г, д) ЖКМ-1277+0.1% МК, $P = 5$ мВт, $U = +2$ В, $\alpha =$ (г) -60° , (д) $+60^\circ$. (в, е) Рассчитанные аберрационные картины для случаев снятия экранировки (в) только на аноде и (е) на обоих электродах (степень снятия экранировки на аноде больше, чем на катоде).

Описанные выше свойства аберрационной картины характерны и для НЖК с примесью 0.1% МК (рис. 8г, 8д), Однако в этом случае распределение интенсивности, скорее, похоже на обычную систему колец, “излом” расположен внутри картины.

Для всех НЖК отличительной чертой аберрационной картины является характер её зависимости от поляризации света. Поворот плоскости поляризации от горизонтали уменьшает интенсивность картины, не изменяя существенно распределение интенсивности (за исключением центральной точки, в которой появляется яркое пятно). Это означает, что поляризация не влияет на деформацию поля директора, т.е, переориентация директора в

нашем эксперименте обусловлена снятием экранировки внешнего электрического поля поверхностными зарядами. Асимметрия абберационной картины вызвана различием степени снятия экранировки на аноде и катоде.

Коэффициенты нелинейности n_2 для НЖК с примесью красителей МК и Р6Ж равны $n_2 \sim 10^{-2} \text{ см}^2/\text{Вт}$, что на два порядка превышает соответствующие значения для ориентационной нелинейности, связанной с анизотропией диэлектрической проницаемости.

Наблюдение поверхностного фоторефрактивного эффекта для образцов различного состава и типа ориентации свидетельствует об общности этого эффекта.

В параграфе 2.4 построена модель самовоздействия светового пучка в НЖК, обусловленного поверхностным фоторефрактивным эффектом.

Снятие экранировки электрического поля световым пучком моделировалось полем положительного и отрицательного точечных зарядов, расположенных вне ЖК слоя со стороны анода и катода. Были рассчитаны деформация поля директора НЖК и нелинейный набег фазы. Соответствующая абберационная картина для случая снятия экранировки на аноде показана на рис. 8в. На рис. 8е показана картина для случая, когда экранировка снимается также (в меньшей степени) на катоде. Первый случай можно соотнести с фоторефрактивным эффектом в чистой матрице ЖКМ-1277, второй – с эффектом в этой же матрице с примесью красителя МК.

В диссертации также рассчитаны каустики абберационной картины. Получены простые аналитические выражения для фазового набег в точках поперечного сечения выходящего из НЖК светового пучка, отвечающих излому абберационной картины в дальней зоне (оптической катастрофе “гиперболическая омбилика”).

Полученные результаты важны для выяснения конкретных механизмов фоторефрактивного эффекта в различных жидкокристаллических системах и демонстрируют возможности самовоздействия света, как инструмента исследования ЖК.

В *третьей главе* представлены результаты исследования взаимодействия света с холестерической и смектической фазами, а также с ЖК в области фазовых переходов смектик–нематик и нематик–изотропная фаза.

В параграфе 3.1 описаны результаты исследования впервые наблюдавшихся нами двумерных фотоиндуцированных периодических структур в толстых (толщина кристалла значительно больше шага спирали) образцах планарно ориентированных фотоконформационно активного и фотоконформационно стабильного примесных холестериков.

Возникновение решеток связано с неустойчивостью Хельфриха жидких кристаллов, ранее наблюдавшейся при различных неоптических воздействиях. В световом поле эта неустойчивость проявляется благодаря изменению шага холестерической спирали из-за фотоконформационных переходов молекул ХЖК или нагрева.

Изучены динамика образования и разрушения решеток (характерные времена $\sim 1\text{--}10$ мин), а также зависимость их периода от шага спирали и толщины ЖК.

Интересной особенностью решеток, обусловленных фотоконформационными переходами, является возможность записи на одной длине волны (647 нм) и быстрого (за время ~ 1 с) стирания светом другой длины волны (515 нм).

Дифракционные картины на фотоиндуцированных решетках характеризуются чередованием интенсивности дифракционных максимумов, обусловленным различием их структурного периода (периода

деформации поля директора) и оптического периода (периода изменения показателей преломления нормальных волн, распространяющихся вдоль оси ХЖК).

Двумерные светоиндуцированные решетки в ХЖК, содержащих конформационно активные азомолекулы, наблюдались впоследствии под действием излучения светодиода и солнечного света [11].

В параграфе 3.2 представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия светового пучка с НЖК ОЦБФ в смектической фазе и в области перехода смектик–нематик.

Установлено, что световая волна не приводит к переориентации директора смектической фазы, связанной с анизотропией диэлектрической проницаемости. Воздействие света обусловлено нагревом до нематической и изотропной фаз. При плотности мощности света $\sim 10^3 - 10^4$ Вт/см² (кристалл нагревается до нематической фазы) после прекращения облучения в области непосредственного воздействия светового пучка возникает запоминаемая аксиально симметричная структура в виде узкого кольца. Их формирование может быть связано с термомеханическим эффектом.

При плотности мощности света $\sim 10^5$ Вт/см² происходит рост поглощения (из-за деструкции ЖК в освещаемой области), а после прекращения облучения в жидком кристалле возникает аксиально симметричная система деформированных областей размерами до ~ 1 см, значительно превышающим освещаемую область ($\leq 10^{-4}$ см²).

В параграфе 3.3 описаны результаты исследования взаимодействия светового пучка с НЖК вблизи фазового перехода нематик–изотропная жидкость, полученные с гомеотропно ориентированными кристаллами ОЦБФ, МБА и ЖКМ-1277 с примесью красителей.

Во всех случаях воздействие светового пучка на ЖК приводит к локальному переходу в изотропную фазу и формированию аксиально-

симметричных анизотропных структур за счет переориентации директора на границе раздела фаз. Эти структуры проявляются в виде характерных “крестов” в дальней зоне дифракции в скрещенных поляризаторах.

Индикатором фазового перехода является также система эквидистантных колец, отвечающих дифракции на прожигаемом в НЖК изотропном канале. Диаметр канала по порядку величины равен диаметру светового пучка и возрастает с увеличением мощности.

Четвертая глава посвящена ориентационным эффектам в поглощающих нематических жидких кристаллах.

В параграфе 4.1 представлен обзор предшествующих работ по исследованию ориентационного взаимодействия света с поглощающими жидкими кристаллами. Вращающий момент, действующий на директор НЖК в этом случае, описывается соотношением

$$\Gamma_{\text{полг}} = \eta \Gamma_{\text{проз}}, \quad (6)$$

где η – фактор усиления вращающего момента, $\Gamma_{\text{проз}}$ – вращающий момент, действующий на прозрачный НЖК.

В диссертации описаны эксперименты с НЖК с примесью азокрасителей (соединений, содержащих азомостик $N=N$) КД-1 и ДЭАНАБ. Особенностью этих соединений является фотоконформационная активность (молекулы азокрасителей существуют в виде транс- и цис- изомеров, переходящих друг в друга при поглощении световых квантов),

Было обнаружено, что направление светоиндуцированной переориентации в НЖК зависит от взаимной ориентации светового поля $\mathbf{E}$ и директора $\mathbf{n}$ (рис. 9). Так, при углах падения α необыкновенной волны на гомеотропно ориентированный кристалл (см. рис. 1а), меньших некоторого критического значения ($\alpha < \alpha_{\text{кр}}$), директор НЖК $\mathbf{n}$ поворачивается перпендикулярно световому полю $\mathbf{E}$ (при этом наблюдается дефокусировка светового пучка); при $\alpha > \alpha_{\text{кр}}$ директор $\mathbf{n}$ поворачивается параллельно световому полю $\mathbf{E}$ (происходит

самофокусировка светового пучка). Направление светоиндуцированной перерентации директора изменяется также при повороте плоскости поляризации светового пучка (рис. 10).

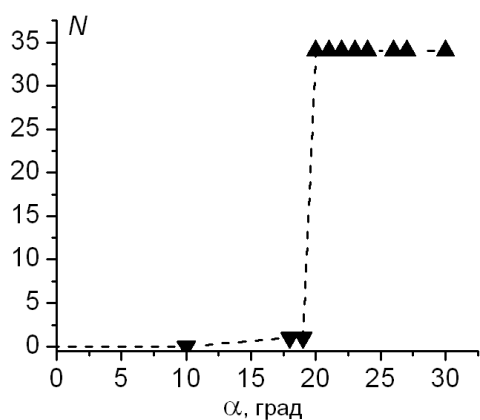


Рис. 9. (а) Зависимости стационарного числа абберационных колец N от угла α падения светового пучка ($\lambda = 515$ нм) для гомеотропно ориентированного НЖК ЖКМ-1282 + 0.025% КД-1 ($P = 1$ мВт): ($\blacktriangle$) – самофокусировка, ($\blacktriangledown$) – самодефокусировка.

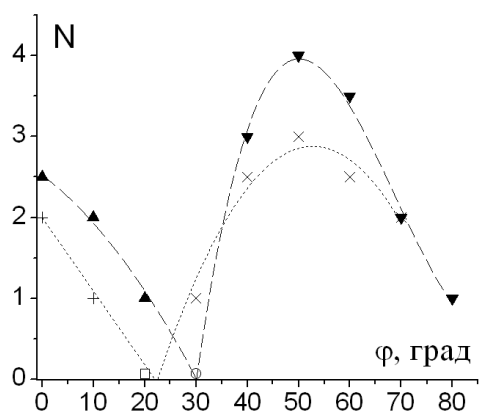


Рис. 10. Зависимость числа колец N ($\blacktriangle, +$ – самофокусировка, $\blacktriangledown, \times$ – самодефокусировка) для светового пучка ($\lambda = 515$ нм, $P = 1-2$ мВт, $\alpha = 50^\circ$ ($\blacktriangle, \blacktriangledown$), 60° ($+, \times$)), прошедшего через планарный образец ЖКМ-1282 + 0.1%, ДЭАНАБ

Таким образом, фактор усиления η для НЖК, содержащих примеси азокрасителей, зависит от геометрии взаимодействия светового поля и директора НЖК. Подобная зависимость для красителей других классов не наблюдалась.

Обнаружение знакопеременной светоиндуцированной переориентации директора в НЖК в нашей работе [12] инициировало исследования [13, 14], в которых, с помощью абсорбционной спектроскопии, было показано влияние геометрии взаимодействия светового поля и НЖК на конформационный состав молекул красителя. Изменение конформационного состава молекул азокрасителя, в свою очередь, влияет на оптический вращающий момент и приводит к изменению его знака (т.е., знака ориентационной оптической нелинейности).

В параграфе 4.2 представлены результаты исследования оптической ориентации для ЖК систем с примесью высокомолекулярных соединений. В качестве таких соединений использовались гребнеобразный полимер и дендримеры, содержащие боковые азофрагменты. Для сравнения также исследовались ЖК системы с примесями низкомолекулярных красителей, аналогичных по строению азофрагментам полимера и дендримеров.

Установлено, что фактор усиления вращающего момента для ЖК систем с полимером и дендримером пятой генерации существенно превышает фактор усиления для ЖК систем с низкомолекулярными красителями. При этом добавка 0.5% (по весу) гребнеобразного полимера повышает коэффициент нелинейности нематической матрицы в 60 раз. Для этой ЖК системы получено наибольшее известное нам значение отношения фактора усиления к поглощению $\eta_\alpha = \eta / (\alpha_{\parallel} + 2\alpha_{\perp}) = - 2.3 \text{ см.}$

Увеличение оптического вращательного момента с усложнением молекулярной структуры наблюдалось для соединений совершенно различной архитектуры. Это обстоятельство указывает на общность эффекта и важную роль возрастания молекулярного веса в увеличении нелинейнооптического отклика.

Основной причиной различия оптической ориентации в ЖК системах с примесью высокомолекулярных соединений и низкомолекулярных красителей является, на наш взгляд, более медленная вращательная диффузия хромофоров высокомолекулярных соединений, что способствует формированию асимметричного (относительно директора НЖК) ориентационного распределения хромофоров, необходимого для поворота директора НЖК.

В параграфе 4.3 приведен обзор работ по ориентационным переходам первого и второго рода в НЖК, находящихся под воздействием низкочастотных и световых полей.

Представлены результаты первого наблюдения и подробного экспериментального и теоретического исследования СПФ первого рода в НЖК под действием линейно поляризованной световой волны.

В качестве исследуемых образцов использовались планарные ячейки толщиной $L = 100$ мкм, заполненные НЖК ЖКМ-1277 с примесью 0.15% дендримера G2 (карбосилановый дендример второй генерации со статистически распределенными терминальными алифатическими и азобензольными фрагментами).

При нормальном падении светового пучка на кристалл и ступенчатом увеличении его мощности абберационная картина не наблюдалась вплоть до порогового значения $P_{\text{пор},1} = 37$ мВт, при котором начинался резкий рост числа колец дефокусировки (до $N = 34$ за время порядка 1 минуты) (рис. 11). При последующем уменьшении интенсивности света картина плавно уменьшалась, а затем, при $P_{\text{пор},2} = 21.5$ мВт, схлопывалась. Относительная ширина области бистабильности $\Delta_P = (P_{\text{пор},1} - P_{\text{пор},2})/P_{\text{пор},1} = 0.42$ на порядок превышает значения, полученные ранее при оптических ориентационных переходах первого рода в прозрачных НЖК, находящихся под воздействием низкочастотных полей [15, 16]. Экспериментально показано, что внешнее низкочастотное поле, изменение угла падения и поворот плоскости поляризации света подавляют бистабильность и изменяют род перехода с первого на второй.

Обратимый переход первого рода наблюдался также при изменении напряжения, приложенного к НЖК при одновременном воздействии света.

Возникновение перехода первого рода связано с зависимостью фактора усиления вращающего момента η от угла Ψ между световым полем и директором. Последняя вызвана изменением конформационного состава азосоединений. Зависимость $\eta(\Psi)$ создает дополнительную обратную связь между поворотом директора и вращающим моментом, которая изменяет род перехода со второго на первый.

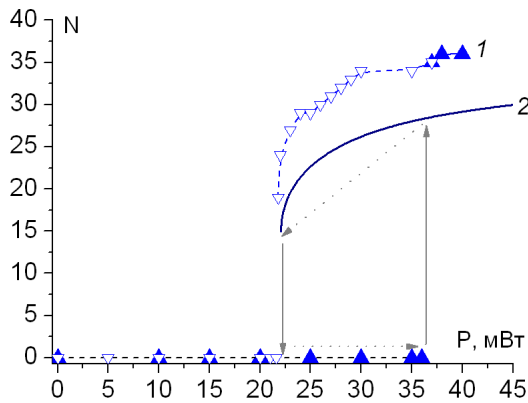


Рис. 11. (1) Число колец самодиффузии N при увеличении ($\blacktriangle$) и уменьшении (∇) мощности P светового пучка ($\lambda = 473$ нм), нормально падающего на планарный НЖК ЖКМ-1277 + 0.15% G2. (2) Теоретическая зависимость.

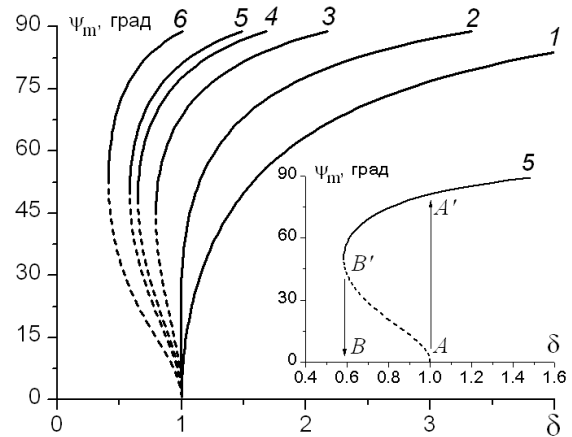


Рис. 12. Теоретические зависимости угла поворота директора ψ_m от безразмерной интенсивности световой волны δ при различных значениях параметра $m = (1) 0, (2) 0.8, (3) 2, (4) 3, (5) 3.6, (6) 6$. Кривая 5 также показана на вставке вместе со стрелками AA' и B'B, обозначающими переключение состояний поля директора.

С использованием аппроксимации

$$\Delta\epsilon_{\text{эфф}} = \Delta\epsilon^{(0)}(1 + m\sin^2\Psi) \quad (7)$$

($\Delta\epsilon^{(0)}$ и m – постоянные параметры) построена теория ориентационных переходов первого рода в НЖК. Рассчитанная зависимость угла поворота директора ψ_m от безразмерной плотности мощности δ , демонстрирующая возникновение бистабильности, показана на рис. 12; зависимость $N(P)$ – на рис. 11.

В параграфе 4.4 предложен механизм светоиндуцированной переориентации директора поглощающих НЖК, основанный на нецентральности потенциала межмолекулярного взаимодействия и анизотропии ориентационной корреляционной функции.

Потенциал межмолекулярного взаимодействия молекулы красителя и молекулы нематической матрицы $U_s^{(\kappa, \text{н})}$ зависит от вектора $\mathbf{R} = \mathbf{r}_\text{н} - \mathbf{r}_\text{к}$ ($\mathbf{r}_\text{к}$ и $\mathbf{r}_\text{н}$ есть

радиус-векторы центров молекул красителя и нематической матрицы), единичных векторов, параллельных длинным осям этих молекул, и квантового состояния s молекулы красителя. При возбуждении молекулы красителя потенциал изменяется на величину $\Delta U_s^{(к,н)}$. Нецентральность потенциала (зависимость от направления вектора $\mathbf{R}$) приводит к возникновению ненулевого вращающего момента

$$\mathbf{M}_{вр}^{(к,н)} = [\mathbf{R} \times \frac{\partial \Delta U_s^{(к,н)}}{\partial \mathbf{R}}], \quad (8)$$

поворачивающего молекулы красителя и нематической матрицы.

Проведено усреднение момента (8) по ансамблю молекул красителя. При этом полагалось, что изменение межмолекулярного взаимодействия при поглощении молекулой красителя светового кванта вызвано изменением Ван-дер-Ваальсовых сил. Были учтены ориентационная селективность возбуждения молекулы красителя и анизотропия ориентационной корреляционной функции (зависимость вероятности локализации соседних молекул от направления вектора $\mathbf{R}$). В результате получено выражение для момента, действующего на директор НЖК

$$\mathbf{\Gamma}_{погл} = \frac{\Delta \epsilon_{эфф}}{4\pi} (\mathbf{nE}) [\mathbf{n} \times \mathbf{E}], \quad (9)$$

где величина $\Delta \epsilon_{эфф}$ (эффективная анизотропия диэлектрической проницаемости, связанная с $\Delta \epsilon$ и фактором усиления η соотношением $\Delta \epsilon_{эфф} = \eta \Delta \epsilon$) зависит от параметров, характеризующих Ван-дер-Ваальсово взаимодействие, ориентационную корреляционную функцию, ориентационную упорядоченность молекул красителя и коэффициенты поглощения жидкокристаллической системы.

Оценки величины $\Delta \epsilon_{эфф} \sim 10^2$ (при коэффициенте поглощения 10^2 см^{-1}) соответствуют экспериментальным данным.

В параграфе 4.5 представлены экспериментальные и теоретические результаты исследования ориентационных переходов первого рода в НЖК (“геометрических переходов”) под действием наклонно падающего пространственно ограниченного светового пучка и низкочастотного электрического поля. В качестве объекта исследования использовался НЖК с примесью диазокрасителя КД-1. Большая ориентационная оптическая нелинейность этой системы позволила провести эксперименты по изучению влияния ширины светового пучка.

Установлено, что переходы наблюдаются как при изменении мощности светового пучка P (при постоянном низкочастотном напряжении $U = \text{const}$), так и при изменении U ($P = \text{const}$). Соответствующие области бистабильности расширяются при увеличении напряжения, мощности и поперечного размера светового пучка.

Развита простая теория “геометрических” ориентационных переходов, которая объясняет основные экспериментальные закономерности. Показано, что обратимое переключение между различными состояниями поля директора обусловлено неперпендикулярной взаимной ориентацией светового и низкочастотного полей, а также пространственной ограниченностью светового пучка.

В параграфе 4.6 представлен краткий обзор предшествующих работ о фотоиндуцированном изменении свойств поверхностей, приводящем к запоминаемой переориентации директора НЖК.

Изложены результаты исследования запоминаемой переориентации директора для ранее не изучавшегося случая гомеотропно ориентированных НЖК. Исследовались чистые (нелегированные) матрицы ЖКМ-1277, ЖКМ-1282, Е63, а также матрицы с примесью красителей разной структуры.

Установлено, что длительное (минуты и десятки минут) воздействие видимого излучения приводит к запоминаемому изменению ориентирующих

свойств границы раздела ориентант–ЖК для матриц ЖКМ-1282, Е63 и для НЖК с примесью красителей (азокрасителей, антрахиноновых красителей и стильбенового красителя).

Поворот оси легкого ориентирования происходит в плоскости падения световой волны. Для нематических матриц поворот происходит по направлению от светового поля, а для НЖК с примесью красителей направление поворота зависит от вида красителя и длины световой волны. Наблюдение эффекта памяти в гомеотропно ориентированных НЖК самого разного состава свидетельствует о его общности.

В НЖК с примесью антрахинового и азокрасителей впервые наблюдался эффект переориентации директора, обусловленной изменением ориентирующих свойств поверхности, после прекращения облучения.

Эффект памяти наблюдался также в гомеотропно ориентированном жидком кристалле ОЦБФ с примесью азокрасителя МК в смектической фазе.

Поверхностная оптическая переориентация директора может быть связана со светоиндуцированными адсорбцией и десорбцией поглощающих свет молекул. Продолжение переориентации после прекращения облучения свидетельствует о темновой трансформации слоя адсорбированных молекул.

В *Заключении* сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

1. Впервые наблюдался светоиндуцированный фазовый переход в жидких кристаллах, аналогичный переходу Фредерикса в низкочастотных электрических и магнитных полях и отвечающий изменению преимущественного направления молекул (директора). Переход происходит в нематической фазе и имеет пороговый характер при невозмущенной ориентации директора кристалла,

перпендикулярной вектору светового поля. Деформации структуры кристалла могут быть весьма глубокими, вплоть до переориентации директора на угол 90° .

2. Эффект светоиндуцированного перехода является нелинейно-оптическим, сопровождается изменением поляризации светового пучка. При этом возникает эффективное самовоздействие света уже в условиях малой его интенсивности $\sim 10^3$ Вт/см² на оси гауссова пучка с перетяжкой $\sim 10^{-6}$ см².

3. В силу самовоздействия и малости длины волны света по сравнению с толщиной кристалла светоиндуцированный переход качественно отличается от ориентационных фазовых переходов в низкочастотных полях, в том числе:

- генерируются колебания поля директора в обыкновенной световой волне;
- появляется зависимость порога перехода от ширины светового пучка;
- скорости переориентации и релаксации директора нелинейно зависят от мощности светового пучка;
- возникает абберрационная самофокусировка светового пучка с большими значениями расходимости (до $\sim 25^\circ$), светоиндуцированного показателя преломления (до ~ 0.2) и его нелинейности (до $n_2 = 0.3 \cdot 10^{-2}$ см²/Вт, что на одиннадцать порядков больше нелинейного коэффициента классического для поляризационной оптики материала - сероуглерода);
- обнаруживается высокая нелинейная оптическая активность с величиной удельной константы до $\sim 1 \cdot \text{град} \cdot \text{см} / \text{Вт}$.

4. Изучено комбинированное воздействие на кристалл света и постоянного электрического поля с напряжением ниже порогового. Оно оказывается не аддитивным. Световое поле снимает экранировку кристалла наведенными зарядами и порог перехода по напряженности постоянного поле становится близким к порогу в низкочастотном поле. При этом самовоздействие света сохраняется, но трансформация светового пучка принципиально отличается от таковой в отсутствие постоянного поля, расходимость теряет симметрию.

5. Обнаружено, что, в отличие от НЖК, в холестерических жидких кристаллах (ХЖК) при сопоставимых плотностях мощности $\sim 10^3$ Вт/см² и условиях освещения самовоздействие света приводит не к слабо асимметричной абберационной расходимости, а к дифракционной картине. Эта картина обусловлена появлением наведенных светом двумерных периодических структур из-за изменения шага холестерической спирали при фото-конформационных внутримолекулярных переходах вещества ХЖК.

6. Исследован класс НЖК, легированных поглощающими свет частицами в виде как высокомолекулярных соединений разной структуры, содержащих азофрагменты, так и низкомолекулярных красителей с аналогичными азофрагментами. Установлено, что оптический вращающий момент, индуцируемый высокомолекулярными соединениями, в несколько раз превышает момент, индуцируемый низкомолекулярными красителями. Добавка 0.5% гребнеобразного полимера повышает коэффициент нелинейности нематической матрицы в 60 раз.

7. В НЖК с фотоконформационными поглощающими добавками возникает дополнительная обратная связь между поворотом директора и оптическим вращающим моментом. Она использована для управления типом фазового перехода в НЖК. Впервые реализован светоиндуцированный переход первого рода в НЖК с примесью дендримера в отсутствие иных внешних воздействий. Для него характерна рекордно широкая область (до 0.4) бистабильности поля директора. Род оптического перехода может переключаться при изменении поляризации света или добавлении низкочастотного поля.

Воздействие света превращает переход, индуцированный низкочастотным полем, из перехода второго рода в переход первого рода.

8. Для указанных выше наблюдаемых новых явлений построены физические модели, позволяющие в большинстве случаев описывать их количественно.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Кроо Н., Соболев Н.Н., Чиллаг Л., *Влияние поля световой волны на нематическую фазу жидкого кристалла ОЦБФ* // Письма в ЖЭТФ. – 1980. – Т. 32, № 2. – С. 170-174.
2. Csillag L., Janossy I., Kitaeva V.F., Kroo N., Sobolev N.N., and Zolot'ko A.S., *Laser Induced Reorientation of Nematic Liquid Crystals* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 1981. – Vol. 78, – P. 173-181.
3. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П., *Самофокусировка лазерного излучения при переходе Фредерикса в нематической фазе жидкого кристалла* // ЖЭТФ. – 1981. – Т. 81, № 3. – С. 933-941.
4. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Кроо Н., Соболев Н.Н., Чиллаг Л., *Переход Фредерикса в кристалле МББА, вызванный полем световой волны* // Письма в ЖЭТФ. – 1981. – Т. 34, № 5. – С. 263-267.
5. Китаева В.Ф., Золотько А.С., Соболев Н.Н., *Самофокусировка лазерного излучения при переходе Фредерикса* // Успехи физических наук. – 1982. – Т. 138, № 2. – С. 324-328.
6. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П., *Нестационарные и поляризационные эффекты при ориентационной самофокусировке в нематических жидких кристаллах* // Известия АН СССР, сер. физ. – 1982. – Т. 46, № 10. – С. 2005-2011.
7. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Кроо Н., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П., Чиллаг Л., *Характер абберрационной картины при самофокусировке светового пучка,*

- вызванной переориентацией директора в жидких кристаллах // ЖЭТФ. – 1982. – Т. 83, № 4. – С. 1368–1375.
8. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Куюмчян В.А., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П., *Светоиндуцированный фазовый переход второго рода в пространственно-ограниченной области НЖК* // Письма в ЖЭТФ. – 1982. – Т. 36, № 3. – С. 66–69.
9. Kitaeva V.F., Sobolev N.N., Zolot'ko A.S., Csillag L., and Kroo N., *Light Diffraction by Laser Beam Created "Channels" in Nematic Liquid Crystals* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 1983. – Vol. 91, № 1. – P. 137–143.
10. Кроо Н., Чиллаг Л., Яноши И., Золотько А.С., Китаева В.Ф., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П., *Ориентационная нелинейность в нематических жидких кристаллах* // Известия АН СССР. – 1983. – Т. 36. – С. 2027–2033.
11. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Кроо Н., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П., Трошкин В.А., Чиллаг Л., *Незатухающие осцилляции директора НЖК в поле световой волны обыкновенного типа* // ЖЭТФ. – 1984. – Т. 87, № 3. – С. 859–864.
12. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Соболев Н.Н., Сухоруков А.П., *К теории ориентационной самофокусировки световой волны обыкновенного типа* // Вестник МГУ, серия 3, физика, астрономия. – 1985. – Т. 26, № 5. – С. 43–49.
13. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Криндач Н.И., Соболев Н.Н., *Асимметрия поляризации абберационной картины при ориентационной самофокусировке* // Краткие сообщения по физике. – 1985. № 8. – С. 51–54.
14. Золотько А.С., Китаева В.Ф., *Поляризационные эффекты при ориентационной абберационной самофокусировке в нематических жидких кристаллах* // ЖЭТФ. – 1986. – Т. 91, №. 1(7). – С. 131–139.
15. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Соболев Н.Н., Федорович В.Ю., Штыков Н.М., *Светоиндуцированная периодическая решетка в ХЖК* // Письма в ЖЭТФ. – 1986. – Т. 43, № 10. – С. 477–479.
16. Золотько А.С., Китаева В.Ф., Федорович В.Ю., Штыков Н.М., *Периодическая структура, возникающая в холестерическом жидком кристалле в широком*

- температурном интервале вблизи фазового перехода // Краткие сообщения по физике. – 1987. № 3. – С. 34–36.
- 17.Золотько А.С., Сухоруков А.П., *Переход Фредерикса в НЖК под действием циркулярно поляризованной световой волны* // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 52, № 1. – С. 707-710.
- 18.Золотько А.С., Китаева В.Ф., Терсков Д.Б., *Рассеяние света на структурах, созданных лазерным пучком в жидком кристалле ОЦБФ вблизи фазового перехода смектик-нематик. Эффект памяти* // ЖЭТФ. – 1992. – Т. 101, № 6. – С. 1827–1835.
- 19.Золотько А.С., Китаева В.Ф., Кроо Н., Чиллаг Л., *О светоиндуцированных структурах в смектических жидких кристаллах* // Краткие сообщения по физике. – 1992. № 11. – С. 58–62.
- 20.Zolot'ko A.S., Kitaeva V.F., Sobolev N.N., Fedorovich V.Yu., Sukhorukov A.P., Kroo N., and Csillag L., *Polarization dynamics of an ordinary light wave interacting with a nematic liquid crystal* // Liq. Cryst. – 1993. – Vol. 15, No. 6. – P. 787–797.
- 21.Золотько А.С., Китаева В.Ф., Кроо Н., Чиллаг Л., *Особенности воздействия узкого светового пучка на смектический жидкий кристалл* // ЖЭТФ. – 1993. – Т. 103, № 5. – С. 1609–1618.
- 22.Золотько А.С., Китаева В.Ф., Терсков Д.Б., *Тепловая, ориентационная и фотоориентационная нелинейности жидкого кристалла из азоксимолекул* // ЖЭТФ. – 1994. – Т. 106, №. 6(12). – С. 1722-1739.
- 23.Kitaeva V.F., Zolot'ko A.S., *Features of Interaction of a Narrow Light Beam with a Smectic OCBP. Memory effect* // J. Russ, Laser Res. – 1994. – Vol. 15, No. 2. – P. 164–175.
- 24.Золотько А.С., Китаева В.Ф., *Светоиндуцированная переориентация смектического жидкого кристалла с эффектом памяти* // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т. 59, № 1. – С. 34–39.

25. Барник М.И., Золот'ко А.С., Румянцев В.Г., Терсков Д.Б., *Светоиндуцированная переориентация директора в нематическом жидком кристалле, легированном азокрасителями* // Кристаллография. – 1995. – Т. 40, № 4. – С. 746–750.
26. Terskov D.B., Zolot'ko A.S., Barnik M.I., and Rumyantsev V.G., *Optical Bistability of the Director in an absorbing nematic liquid crystal* // Mol. Materials. – 1996. – Vol. 6, No. 3. – P. 151–162.
27. Barnik M.I., Kitaeva V.F., Rumyantsev V.G., Zolot'ko A.S., *Thermomechanical effect in liquid crystals* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 1997. – Vol. 299, – P. 91–95.
28. Барник М.И., Золот'ко А.С., Китаева В.Ф., Особенности взаимодействия светового излучения с нематическим жидким кристаллом, легированным красителями // ЖЭТФ. – 1997. – Т. 111, № 6. – С. 2059–2073.
29. Золот'ко А.С., *О механизме светоиндуцированной ориентации молекул в поглощающих нематических жидких кристаллах* // Письма в ЖЭТФ. – 1998. – Т. 68, № 5. – С. 410–414.
30. Kitaeva V.F., Zolot'ko A.S., and Barnik M.I., *Orientational optical nonlinearity of absorbing nematic liquid crystals* // Mol. Materials. – 2000. – Vol. 12, No. 4. – P. 271–293.
31. Барник М.И., Золот'ко А.С., Китаева В.Ф., *Светоиндуцированная память в нематическом жидком кристалле, легированном красителем* // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2001. – № 1. – С. 36–44.
32. Barnik M.I., Kharchenko S.A., Kitaeva V.F., and Zolot'ko A.S., *Reorientation of Director of Nematic Liquid Crystals, Doped with Azodyes, under Light and Low-Frequency Fields* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2002. – Vol. 375. – P. 363–372.
33. Barnik M.I., Kitaeva V.F., and Zolot'ko A.S., *Peculiarities of Light-induced Memory in NLCs* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2003. – Vol. 391, No.1. – P. 111–122.
34. Будаговский И.А., Золот'ко А.С., Китаева В.Ф., Смаев М.П., *Взаимодействие света с нематическими жидкими кристаллами, содержащими азокси- и азолекулы*, // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2004. № 10. – С. 26–38.

- 35.Золотько А.С., Смаев М.П., Китаева В.Ф., Барник М.И., *Обратимые ориентационные переходы первого рода, индуцированные в нематическом жидком кристалле пространственно ограниченным световым пучком и низкочастотным электрическим полем* // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 12. – С. 1151–1156.
- 36.Золотько А.С., Смаев М.П., Китаева В.Ф., Барник М.И., *Бистабильность поля директора нематического жидкого кристалла в низкочастотном электрическом и пространственно ограниченном световом полях* // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2004. – № 3. – С. 7–15.
- 37.Budagovsky I.A., Zolot'ko A.S., Kitaeva V.F., and Smayev M.P., *Light Self-Action in NLCs with Orientational and Thermal Nonlinearities* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2006. – Vol. 453, – P. 71–82.
- 38.Будаговский И.А., Золотько А.С., Китаева В.Ф., Очкин В.Н., Смаев М.П., Барник М.И., *Самовоздействие светового пучка в нематических жидких кристаллах в постоянном электрическом поле* // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2006. – № 3. – С. 24 – 34.
- 39.Zolot'ko A.S., Budagovsky I.A., Kitaeva V.F., Ochkin V.N., Shakun A.V., Smayev M.P., and Barnik M.I., *Orientational Interaction of a Light Beam and NLCs Subjected to External DC Field* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2006. – Vol. 454, – P. 407–414.
- 40.Будаговский И.А., Золотько А.С., Очкин В.Н., Смаев М.П., Бобровский А.Ю., Шибаев В.П., Барник М.И., *Ориентационная оптическая нелинейность, индуцированная гребнеобразными полимерами в нематическом жидком кристалле* // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 133, № 1. – С. 204–214.
- 41.Zolot'ko A.S., Budagovsky I.A., Smayev M.P., and M.I Barnik, *Asymmetric Aberration Pattern at Light-Beam Self-Action in NLC Doped with Stilbene Dye* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2008. – Vol. 488, No.1. – P. 11–22.
- 42.Zolot'ko A.S., Budagovsky I.A., Ochkin V.N., Smayev M.P., Bobrovsky A.Yu., Shibaev V.P., Boiko N.I., Lysachkov A.I., and Barnik M.I., *Light-induced director*

- reorientation in nematic liquid crystals doped with azobenzene-containing macromolecules of different architecture* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 2008. – Vol. 488, – P. 265-278.
43. Budagovsky I.A., Ochkin V.N., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Bobrovsky A.Yu., Boiko N.I., Lysachkov A.I., Shibaev V.P., and Barnik M.I., *Light interaction with the NLC–dendrimer system* // Liq. Cryst. – 2009. – Vol. 36, No. 1. – P. 101-107.
44. Будаговский И.А., Золот'ко А.С., Смаев М.П., Барник М.И., *Самовоздействие светового пучка в нематических жидких кристаллах в присутствии постоянного электрического поля* // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138, № 1(7). – С. 150–161.
45. Бабаян Э.А., Будаговский И.А., Золот'ко А.С., Смаев М.П., Швецов С.А., Бойко Н.И., Барник М.И., *Оптическая бистабильность поля директора нематического жидкого кристалла, легированного дендримерами* // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2010. – № 8. – С. 46–54.
46. Babayan E.A., Budagovsky I.A., Shvetsov S.A., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Boiko N.I., and Barnik M.I., *Light- and electric-field induced first-order orientation transition in a dendrimer-doped liquid crystal*, // Phys. Rev. E. – 2010. – Vol. 82, – P. 061705.
47. Будаговский И.А., Золот'ко А.С., Очкин В.Н., Смаев М.П., Швецов С.А., Бобровский А.Ю., Бойко Н.И., Шibaев В.П., Барник М.И., *Ориентационная оптическая нелинейность нематических жидких кристаллов, индуцированная высокомолекулярными азосодержащими азосоединениями* // Высокомолекулярные соединения, серия А. – 2011. – Т. 53, № 8. – С. 1337–1348.
48. Золот'ко А.С., Смаев М.П., Швецов С.А., Бойко Н.И., Барник М.И., *Светоиндуцированные ориентационные переходы первого рода в нематическом жидком кристалле в присутствии обыкновенной волны* // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 4. – С. 327–331.

Литература, цитированная в автореферате

1. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Сухов А.В., Табирян Н.В., *Гигантская оптическая нелинейность в мезофазе НЖК* // Письма в ЖЭТФ. – 1980. – Т. 31, № 5. – С. 287–292.
2. Золотко А.С., Китаева В.Ф., Кроо Н., Соболев Н.Н., Чиллаг Л., *Влияние поля световой волны на нематическую фазу жидкого кристалла ОЦБФ* // Письма в ЖЭТФ. – 1980. – Т. 32, № 2. – С. 170–174.
3. Csillag L., Janossy I., Kitaeva V. F., Kroo N., Sobolev N.N., *The influence of the finite size of the light spot on the laser induced reorientation of liquid crystals* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. – 1982. – Т. 84, № 1–4. – С. 125–135.
4. Guyon E., *Second order phase transitions: models and analogies*, Am. J. Phys., // Am. J. Phys. – 1975. – Vol. 43, N 10. – P. 877–881.
5. Пикин С.А., *Структурные превращения в жидких кристаллах*. – М.: Наука, 1981, – 344 с.
6. Zolot'ko A.S., Kitaeva V.F., Sobolev N.N., Fedorovich V.Yu., Sukhorukov A.P., Kroo N., and Csillag L., *Polarization dynamics of an ordinary light wave interacting with a nematic liquid crystal* // Liq. Cryst. – 1993. – Vol. 15, N 6. – P. 787–797.
7. Demeter G., Krimer D.O., *Light-induced dynamics in nematic liquid crystals—a fascinating world of complex nonlinear phenomena* // Phys. Rep. – 2007. – Vol. 448, N 5. – P. 133–162.
8. Santamato E., Daino B., Romagnoli M., Settembre M., and Shen Y.R., *Collective Rotation of Molecules Driven by the Angular Momentum of Light in a Nematic Film* // Phys. Rev. Lett. – 1986. – Vol. 57, N 19. – P. 2423–2426.
9. Руденко Е.В., Сухов А.В., *Фотоиндуцированная электропроводность и фоторефракция в нематике* // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т. 59, № 2. – С. 133–136.
10. Khoo I.C., Li H., Liang Y., *Observation of orientational photorefractive effects in nematic liquid crystals* // Opt. Lett. – 1994. – Vol. 19, N 21. – P. 1723–1725.

11. Hrozhyk U.A., Serak S.V., Tabiryan N.V., and Bunning T.J., *Periodic structures generated by light in chiral liquid crystals* // Opt. Exp. – 2007. – Vol. 15, N 5. – P. 9273–9280.
12. Барник М.И., Золотько А.С., Румянцев В.Г., Терсков Д.Б., *Светоиндуцированная переориентация директора в нематическом жидком кристалле, легированном азокрасителями* // Кристаллография. – 1995. – Т. 40, № 4. – С. 746–750.
13. Janossy I. and Szabados L., *Photoisomerization of azo-dyes in nematic liquid crystals* // J. Nonlinear Opt. Phys. Mater. – 1998. – Vol. 7, N 4. – P. 539–551.
14. Janossy I. and Szabados L., *Optical reorientation of nematic liquid crystals in the presence of photoisomerization* // Phys. Rev. E. – 1998. – Vol. 58, N 4. – P. 4598–4604.
15. Karn A.J., Arakelian S.M., Shen Y.R., Ong H.L., *Observation of Magnetic-Field-Induced First-Order Optical Freedericksz Transition in a Nematic Film* // Phys. Rev. Lett. – 1986. – Vol. 57, N 4. – P. 448–451.
16. Wu J.J., Chen Shu-Hsia, *Electric-controlled intrinsic optical bistability in nematic liquid crystals* // J. Appl. Phys. – 1989. – Vol. 66, N 3. – P. 1065–1070.