

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

На правах рукописи

Швецов Сергей Александрович

СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ОРИЕНТАЦИОННЫЕ
ЭФФЕКТЫ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРАХ И
КОМПОЗИТНЫХ СИСТЕМАХ

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2016

Работа выполнена в отделе Оптики низкотемпературной плазмы Отделения оптики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Золотько Александр Степанович, ФИАН, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Беляков Владимир Алексеевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская область;

доктор физико-математических наук Палто Сергей Петрович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской академии наук, г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Защита диссертации состоится 03 октября 2016 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН и на сайте www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.023.03,

доктор физико-математических наук,

профессор

М.А. Казарян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Жидкие кристаллы представляют собой промежуточное состояние вещества между жидкостью и кристаллической средой. Обладая большой подвижностью и анизотропией физических свойств, они чрезвычайно чувствительны к внешним воздействиям, что обуславливает их практическую значимость. Жидкие кристаллы широко применяются в электрооптических устройствах, в частности, в устройствах отображения информации; могут использоваться в качестве активных сред с распределенной обратной связью, а также для создания фотонных кристаллов.

В последние десятилетия активно изучаются нелинейно-оптические свойства нематических жидких кристаллов (НЖК) [1]. Такой интерес обусловлен большими значениями оптической нелинейности, достигаемыми в различных жидкокристаллических системах. Значение коэффициента ориентационной нелинейности n_2 для прозрачных (нелегированных) НЖК составляет 10^{-4} см²/Вт.

В композитных системах, состоящих из нематической матрицы и поглощающей добавки (~ 0.1 %), ориентационная оптическая нелинейность превосходит на 1-2 порядка нелинейность нелегированных НЖК [2]. Ориентационный оптический момент, проявляющийся в таких системах, обусловлен изменением межмолекулярного взаимодействия при селективном по направлению возбуждении молекул красителя.

Высокомолекулярные добавки с поглощающими азобензольными фрагментами приводят к большему (на порядок) усилению нелинейно-оптического отклика НЖК, чем мономеры, аналогичные по строению поглощающим фрагментам [3]. Для НЖК, легированных поглощающими полимерами, обычно проявляется отрицательная нелинейность: директор поворачивается от светового поля, уменьшая показатель преломления необыкновенной волны. Благодаря дополнительной обратной связи между углом поворота директора и величиной вращающего момента, в таких системах был реализован чисто оптический переход первого рода, сопровождающийся широкой областью бистабильности [4].

Изучение НЖК с полимерными поглощающими добавками необходимо для установления основных факторов, определяющих нелинейно-оптический отклик композитных систем, а также возможностей его увеличения.

Представляет интерес изучение композитных систем на основе не только низкомолекулярных НЖК, но и нематических жидкокристаллических полимеров (НЖКП). В НЖКП, как и в НЖК, имеет место упругая деформация поля директора под действием электрического и магнитного полей, в пороговой геометрии наблюдается переход Фредерикса. Однако, насколько нам известно, эффект, аналогичный переориентации директора НЖК в световом поле, для НЖКП не наблюдался. НЖКП, легированные красителями, могут быть более восприимчивыми к ориентационному воздействию света, чем композитные системы с низкомолекулярной матрицей, за счет замедления вращательного движения хромофоров в более вязкой полимерной среде.

Большие значения оптической нелинейности НЖК привлекательны для создания опто-оптических переключателей, а также для фильтрации изображений.

Цели и задачи диссертационной работы

Общей целью диссертации является поиск и выяснение свойств жидкокристаллических полимеров и композитных систем, обладающих большим нелинейно-оптическим откликом. Достижение этой цели предполагает решение ряда задач:

1. Установление закономерностей влияния молекулярной массы и строения высокомолекулярных поглощающих добавок на ориентационную нелинейность НЖК. Сравнительное изучение фотоизомеризации низко- и высокомолекулярных поглощающих добавок в нематической матрице и ориентационной нелинейности этих жидкокристаллических систем.

2. Поиск светоиндуцированных ориентационных эффектов в прозрачных НЖКП и НЖКП, легированных красителями.

3. Выяснение характера влияния поляризации светового поля на ориентационные переходы первого и второго рода в НЖК с примесью дендримеров.

4. Построение фазовых диаграмм состояния НЖК с примесью высокомолекулярных соединений в низкочастотном и световом электрических полях.

5. Выяснение возможности применения ориентационной оптической нелинейности НЖК и НЖКП для создания фильтров Цернике, а также возможности опто-оптической модуляции в нематической твист-ячейке.

Научная новизна

1. Обнаружена и исследована светоиндуцированная переориентация директора НЖКП и НЖКП с поглощающими добавками. При нормальном падении света на НЖКП с добавкой азокрасителя проявляется пороговая переориентация, аналогичная переходу Фредерикса в низкочастотных полях.

2. Установлено влияние молекулярной массы поглощающих высокомолекулярных добавок на нелинейно-оптический отклик НЖК. Измерены концентрации транс- и цис-изомеров в световом поле и определен вклад каждого из изомеров в формирование вращающего момента в НЖК.

3. Установлено влияние поляризации света на ориентационную нелинейность НЖК с высокомолекулярной добавкой.

4. Построена модель ориентационных переходов, использующая разложение вращающих моментов, действующих на директор НЖК, по углу поворота директора. Построены фазовые диаграммы состояний НЖК в зависимости от интенсивности и поляризации света, а также от напряжения приложенного низкочастотного поля.

5. Реализован обратимый ориентационный переход первого рода при одновременном воздействии светового и низкочастотного электрического полей, обусловленный преднаклоном директора на подложках НЖК. Построена теоретическая модель этого эффекта, согласующаяся с экспериментом.

6. Реализовано светоиндуцированное изменение пропускания нематической твист-ячейки, обусловленное переориентацией директора НЖК.

7. Осуществлена визуализация фазового объекта в фазоконтрастной схеме с нелинейным фильтром Цернике, в качестве которого использовались НЖК или НЖКП, обладающие ориентационной нелинейностью. Реализована перестройка контраста изображения при изменении угла падения светового пучка на ячейку НЖК.

Практическая значимость

Оптические нелинейности жидкокристаллических систем позволяют получать и исследовать различные нелинейно-оптические явления, такие как самофокусировка и самодефокусировка светового пучка, формирование оптических солитонов, обращение волнового фронта в поле маломощных (непрерывных) лазеров. Жидкокристаллические системы представляют несомненный интерес для создания опто-оптических модуляторов, переключателей, ограничите-

лей мощности. Достигнутые в рамках диссертации нелинейности ($n_2 \sim 0.1 \text{ см}^2/\text{Вт}$) позволяют воздействовать на нематические среды слабыми световыми полями некогерентных источников.

Светоиндуцированные эффекты в нематических жидких кристаллах и жидкокристаллических полимерах могут служить моделью для изучения взаимодействия света с более сложными, в том числе биологическими, мезофазными объектами.

Защищаемые положения

1. Эффективность ориентирующего действия света на НЖК возрастает при увеличении молекулярной массы поглощающих добавок (при одинаковой концентрации хромофоров в среде). При переходе от мономера к дендимеру увеличиваются факторы усиления вращающего момента (по сравнению с нелегированной матрицей), связанные с транс- и цис-изомерами хромофоров. Это возрастание более существенно (в 4 раза) для транс-изомера, что соответствует переходу от знакопеременной оптической нелинейности НЖК к отрицательной.

2. В НЖКП с примесью азокрасителя проявляется светоиндуцированный ориентационный переход второго рода, являющийся аналогом перехода Фредерикса в низкочастотных полях. Коэффициент ориентационной оптической нелинейности НЖКП на порядок превышает максимально достигнутое значение для низкомолекулярных композитных систем, обладающих тем же поглощением, и составляет $n_2 \sim 0.1 \text{ см}^2/\text{Вт}$.

3. Разработана модель ориентационных переходов первого и второго рода в поглощающих НЖК под действием электрического и светового полей, основанная на разложении вращающих моментов, действующих на директор НЖК, по углу поворота директора.

4. При одновременном действии светового и низкочастотного электрического полей на НЖК с отрицательной ориентационной нелинейностью реализуется светоиндуцированный ориентационный переход первого рода с гистерезисом поля директора НЖК, обусловленный преднаклоном директора на границах жидкокристаллического слоя.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 40 работ, включая 9 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, 31 публикацию

в материалах конференций. Список публикаций приводится в конце автореферата.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на 3-м Международном семинаре по жидким кристаллам для фотоники (Эльче, Испания, 2010), XIII, XIV и XV Школах молодых ученых «Актуальные проблемы физики» (Звенигород, 2010 и 2012) и (Москва 2014), 53-й, 55-й и 57-й Научных конференциях МФТИ (Москва-Долгопрудный, 2010, 2012 и 2014), XIV Национальной конференции по росту кристаллов (Москва, 2010), 14-ом и 15-ом Международных семинарах по оптике жидких кристаллов (Ереван, Армения, 2011) и (Гонолулу, США, 2013), V-ой Всероссийской молодежной конференции «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики» (Москва, 2011), Первой всероссийской конференции по жидким кристаллам (Иваново, 2012), Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Москва, 2013), XX-й конференции по жидким кристаллам (Миколайки, Польша, 2013), 12-й Европейской конференции по жидким кристаллам (Родос, Греция, 2013), V-ой и VI-ой Всероссийских молодежных конференциях по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, 2013 и 2015), 6-й Всероссийской Каргинской конференции "Полимеры - 2014" (Москва, 2014), Международной конференции по передовым лазерным технологиям (Кассис, Франция, 2014), VIII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 2014), IV Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2015), 13-ой Международной научно-технической конференции «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2015), Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015» (Санкт-Петербург, 2015), XXIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам (МГУ, Москва, 2016).

Материал диссертации докладывался и обсуждался на семинарах Отдела оптики низкотемпературной плазмы и аспирантских семинарах ФИАН.

Личный вклад автора

Автор участвовал в постановке задач исследований, приготовлении экспериментальных образцов, проведении экспериментов, разработке теоретических

моделей, производил численные расчеты. Все материалы, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 115 наименований. Общий объем работы составляет 117 страниц, включающих 45 рисунков и 2 таблицы.

Все результаты исследовательской работы, представленной в диссертации, получены в Отделе оптики низкотемпературной плазмы ФИАН. Работа выполнялась в рамках планов ФИАН и поддерживалась грантами Президента РФ (№ МК-699.2009.2, МК-970.2013.2), Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проект № 8620), Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 09-02-12216, 11-02-01315, 12-02-31348, 14-02-00791) и Российским научным фондом (грант № 14-12-00784).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность диссертации, сформулированы цели работы, показаны её новизна и практическая значимость и приведены положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 представлен литературный обзор, посвященный строению и свойствам жидких кристаллов и жидкокристаллических полимеров. В параграфах 1.1 и 1.2 приводятся общие сведения о структуре термотропных жидких кристаллов и жидкокристаллических полимеров, способах получения однородно ориентированных образцов. В параграфе 1.3 рассматривается переориентация директора низкомолекулярных НЖК и НЖКП в низкочастотных полях. Показана общность эффектов, происходящих в этих средах: при взаимно перпендикулярной ориентации директора и электрического поля происходит ориентационный переход второго рода (переход Фредерикса). Параграф 1.4 посвящен ориентационному действию света на НЖК. Рассмотрены эффекты воздействия света на композитные НЖК. Показаны основные закономерности влияния структуры поглощающих добавок на нелинейно-оптический отклик НЖК. В параграфе 1.5 рассматривается электрооптическая модуляция пропускания света, проходящего через нематическую твист-ячейку в скрещенных поляризаторах. Описана воз-

возможность модуляции за счет теплового воздействия света на НЖК. Параграф 1.6 посвящен оптической ориентации аморфных и жидкокристаллических полимеров, содержащих азобензольные фрагменты. Описаны отличия воздействия света на азобензольные НЖКП от ориентационного действия света на низкомолекулярные нематики. В параграфе 1.7 приведены методы регистрации нелинейно-оптического отклика, используемые в диссертационной работе. В параграфе 1.8 рассмотрен метод Цернике визуализации фазового контраста с использованием нелинейных фильтров, в том числе на основе тепловой нелинейности НЖК.

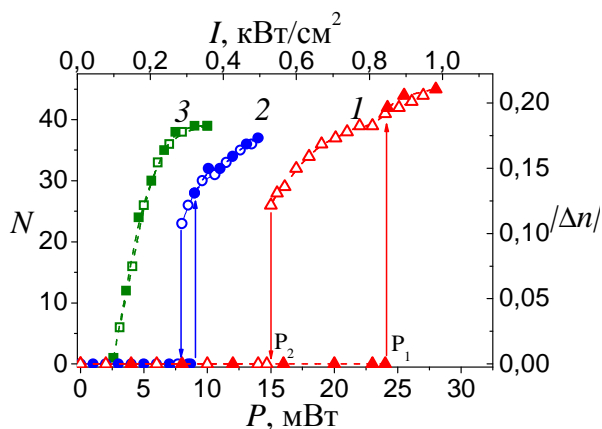


Рис. 1. Зависимости числа абберационных колец N и среднего по толщине изменения показателя преломления $|\Delta n|$ от мощности P (и интенсивности I) при нормальном падении ($\alpha = 0^\circ$) светового пучка необыкновенной поляризации ($\lambda = 473$ нм) на планарные НЖК ЖКМ-1277 + 0.15% дендримера (1) G2, (2) G3, (3) G4 (заштрихованные символы соответствуют увеличению P , незаштрихованные – уменьшению P).

разцов наблюдалась отрицательная нелинейность (уменьшение показателя преломления необыкновенной волны за счет поворота директора НЖК в направлении от светового поля). Показано, что при увеличении номера генерации азобензольного дендримера (при одинаковой концентрации хромофоров в нематической матрице) происходит монотонное уменьшение порогов переориентации и подавление области бистабильности (рис. 1). Так, при переходе от дендримера второй генерации G2 к дендримеру четвертой генерации G4 пороговая мощность уменьшается на порядок. При этом ориентационный переход первого рода

Глава 2 посвящена изучению ориентационного действия света на НЖК с добавками высокомолекулярных соединений. В параграфе 2.1 приведены результаты исследования ориентационной оптической нелинейности НЖК с высокомолекулярными поглощающими азобензольными добавками (~ 0.1 %) различной молекулярной массы и строения. В качестве нематической матрицы использовалась смесь ЖКМ-1277, состоящая из бифенилов и сложных эфиров. При взаимодействии сфокусированного светового пучка от непрерывного твердотельного лазера ($\lambda = 473$ нм) с НЖК на экране, расположенном за образцом, происходило формирование абберационной картины в виде системы концентрических колец. Для всех исследуемых об-

сменяются переходом второго рода. Схожая тенденция прослеживается при увеличении молекулярной массы азобензольных гребнеобразных полимеров, используемых в качестве поглощающих добавок.

В параграфе 2.2 для выяснения причин возрастания нелинейно-оптического отклика НЖК при увеличении молекулярной массы поглощающей добавки проведены спектроскопические исследования конформационного состава в световом поле для мономера и высокомолекулярного соединения, а также определен вклад каждого из изомеров в ориентационную нелинейность НЖК.

В качестве экспериментальных образцов использовались смеси нематической матрицы, прозрачной в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, с дендримером пятой генерации и мономером, аналогичным по структуре поглощающим терминальным фрагментам дендримера. Было показано, что переориентация директора исследуемых образцов в световом поле является типичной для НЖК с добавками низко- и высокомолекулярного азобензольных соединений. НЖК с добавкой мономера М обладал знакопеременной нелинейностью, в то время как НЖК с добавкой дендримера - отрицательной нелинейностью. При этом характерное значение коэффициента нелинейности $n_2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{Вт}$ ($|\Delta n| = n_2 I$) для системы НЖК+G5 было на порядок больше, чем для НЖК+М ($n_2 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{Вт}$).

По спектрам поглощения, полученным до и непосредственно после облучения образцов УФ и видимым светом были определены концентрации цис- и транс-изомеров в состоянии насыщения фотоизомеризации. Было показано, что относительные концентрации цис-изомеров хромофоров мономера и дендримера в световом поле отличаются незначительно.

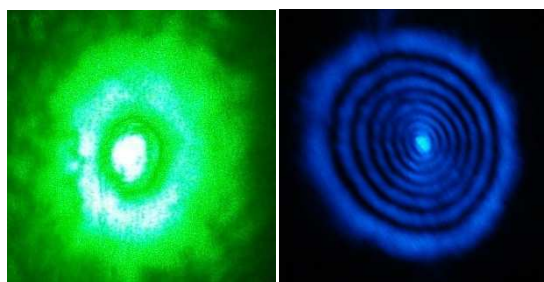
Сравнение величины нелинейно-оптического отклика исследуемых образцов и концентраций изомеров позволило оценить факторы усиления (по отношению к нелегированной матрице) оптического вращающего момента, соответствующие каждому из изомеров. Для транс-изомеров дендримера фактор усиления оптического вращающего момента по модулю в 13 раз больше, а для цис-изомеров - в 3 раза в сравнении с мономером. Более существенное возрастание фактора усиления транс-изомера дендримера соответствует переходу от знакопеременной нелинейности к отрицательной.

Возрастание эффективности ориентирующего действия света на НЖК, легированные высокомолекулярными поглощающими добавками, может быть свя-

зано с увеличением времени вращательной диффузии хромофоров при их включении в полимерную цепь.

В Главе 3 приведены результаты исследования светоиндуцированной переориентации директора и соответствующей оптической нелинейности нелегированного и легированного поглощающими добавками НЖКП.

В параграфе 3.1 приведено описание образцов и условий эксперимента. В качестве НЖКП использовался гребнеобразный полимер полиакрилат РАА, обладающий нематической фазой в диапазоне $26^{\circ}\text{C} < T < 123^{\circ}\text{C}$. Для получения однородной ориентации использовались стеклянные ячейки толщиной $L = 50$ мкм, внутренняя поверхность которых была обработана слоем полиимида. Исследовались нелегированный НЖКП, НЖКП с добавкой азобензольного красителя КД-1 (0.05%) и НЖКП с добавкой антрахинонового (конформационно стабильного) красителя D-16 (0.5%). Нелинейно-оптический отклик НЖКП изучался методом абберационного самовоздействия светового пучка. Исследования проводились в диапазоне $T = 90\text{-}115^{\circ}\text{C}$ для уменьшения вязкости полимера и, таким образом, уменьшения времени ориентационного отклика.



(а)

(б)

Рис. 2. Типичные абберационные картины, формирующиеся при освещении световым пучком (а) полимера РАА ($\lambda = 532$ нм, $I \sim 1$ кВт/см²) и (б) полимера РАА +0,05% КД-1 ($\lambda = 473$ нм, $I \sim 1$ Вт/см²).

В параграфе 3.2 определены отношения коэффициента вращательной вязкости γ_K упругой постоянной K при различных температурах T исследуемого НЖКП: $\gamma_K = 4.9, 2.4, 1.4$ (с/мкм²) при $T = 100^{\circ}\text{C}, 110^{\circ}\text{C}, 115^{\circ}\text{C}$, соответственно. Полученные данные свидетельствуют, что ориентационные процессы в НЖКП протекают на два порядка медленнее, чем в низкомолекулярных нематиках. При этом величина вращательной вязкости существенным образом зависит от температуры образца.

В параграфах 3.3 и 3.4 приведены результаты изучения ориентационного воздействия света на НЖКП. Под действием сфокусированного светового пучка, наклонно падающего на планарные НЖКП и НЖКП с добавкой КД-1 на экране, расположенном за образцом, развивалась абберационная картина (рис. 2), характерная для оптической нелинейности низкомолекулярных нематиков. Время установления стационарной абберационной картины существенно зависит от

мощности светового пучка и температуры образца и составляет от нескольких до десятков минут.

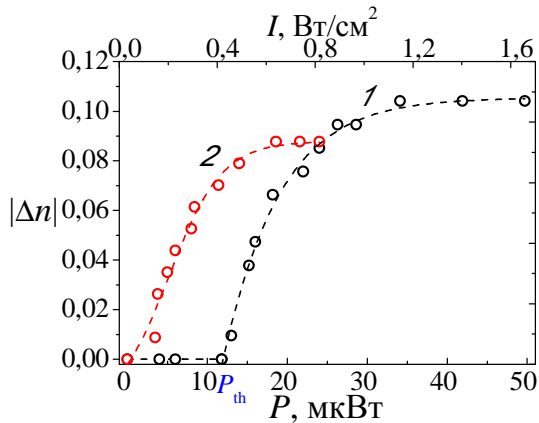


Рис. 3. Зависимость стационарного значения модуля светоиндуцированного показателя преломления $|\Delta n|$ от мощности P (и интенсивности I) при (1) нормальном и (2) наклонном падении светового пучка ($\lambda_1 = 473$), на полимер РАА+0.05% КД-1; температура образца $T = 110^\circ\text{C}$.

Эффект обусловлен анизотропией диэлектрической проницаемости на световой частоте и аналогичен воздействию низкочастотных электрических полей.

При нормальном падении света необыкновенной поляризации на планарный НЖКП с добавкой красителя КД-1 была получена пороговая зависимость светоиндуцированного показателя преломления $|\Delta n|$ от мощности светового пучка P (рис. 3, кривая 1), обусловленная переориентацией директора НЖКП в направлении от светового поля. При наклонном падении светового пучка переориентация директора была беспороговой (рис. 3, кривая 2).

Порог переориентации при нормальном падении светового пучка на образец составил $P_{\text{th}} = 12$ мкВт ($I_{\text{th}} = 0.4$ Вт/см²), характерное значение коэффициента нелинейности $n_2 \sim 0.1$ см²/Вт. Значение n_2 на порядок превышает максимально достигнутый коэффициент нелинейности для низкомолекулярной композитной системы, обладающей схожим поглощением. Столь существенное возрастание коэффициента нелинейности обусловлено двумя факторами. Первый фактор связан с увеличением времени вращательной диффузии азокрасителя в полимерной матрице, второй обусловлен малой концентрацией цис-изомеров по сравнению к концентрации транс-изомеров в световом поле. Последнее обстоя-

Для нелегированного НЖКП, поддерживаемого при температуре $T = 110^\circ\text{C}$, при наклонном падении светового пучка необыкновенной поляризации мощностью $P = 60$ мВт за время ~ 20 мин на экране формировалась картина из двух абберационных колец самофокусировки (рис. 3а), что соответствует нелинейному набегу фазы $\sim 4\pi$ и светоиндуцированному показателю преломления $\Delta n \sim 0.02$ ($n_2 \sim 10^{-5}$ см²/Вт). В поле пробного светового пучка наблюдалась релаксация абберационной картины. Полученные данные свидетельствуют о том, что в НЖКП происходит поворот директора к световому полю.

тельство объясняет также тот факт, что, в отличие от низкомолекулярных НЖК, легированных азобензольными красителями, добавление обыкновенной волны не влияет на оптическую нелинейность НЖКП.

Воздействие света на НЖКП с добавкой D-16 приводило к быстрому (~ 0.1 с) формированию абберационных колец, обусловленных тепловым нагревом среды, а также более медленному (~ 10 мин) развитию абберационных колец, связанных с переориентацией директора НЖКП. Коэффициент нелинейности, индуцируемой добавкой D-16, совпадает по порядку величины с соответствующей величиной для низкомолекулярного НЖК с той же добавкой. В данном случае, ориентационное действие света определяется не временем вращательной диффузии хромофора, а временем жизни возбужденного электронного состояния, которое существенно меньше.

В Главе 4 рассмотрен ряд нелинейно-оптических эффектов, проявляющихся в легированных красителями НЖК и НЖКП.

В параграфе 4.1 изучен ориентационный переход первого рода в НЖК с добавкой высокомолекулярного поглощающего соединения (азобензольного дендримера второй генерации) под действием суперпозиции необыкновенной и обыкновенной волн. Показано, что добавление обыкновенной волны приводит к понижению порога перехода, уменьшению области бистабильности и подавлению перехода первого рода. При постоянной мощности светового пучка и повороте плоскости поляризации происходит необратимый ориентационный переход первого рода. Эти эффекты связаны с изменением равновесных концентраций изомеров в световом поле при изменении направления его поляризации.

Построена модель ориентационных переходов первого и второго рода в НЖК с поглощающей добавкой при изменении интенсивности и поляризации света, а также приложенного низкочастотного электрического поля, использующая разложение вращающих моментов по углу поворота директора. Из уравнения баланса моментов было получено выражение, определяющее угол поворота директора ψ_m в центральном слое НЖК, аналогичное уравнению, описывающему динамику параметра порядка в теории фазовых переходов. Эта аналогия позволила использовать результаты теории Ландау фазовых переходов для определения условий и рода ориентационных переходов в НЖК. На основании модели построены фазовые диаграммы ориентационных переходов.

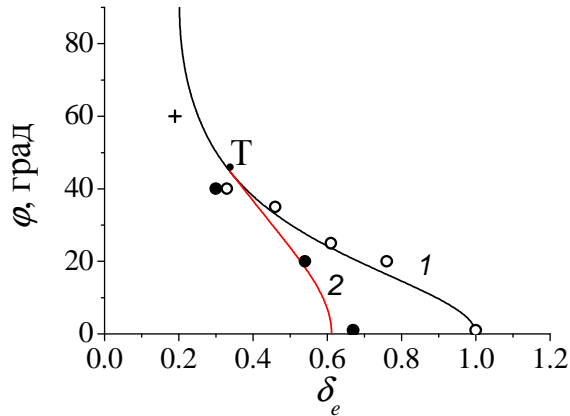


Рис. 4. Фазовая диаграмма ориентационных переходов в координатах (δ_e, φ) . Линии (1) и (2) соответствуют прямому и обратному переходам. Т – трикритическая точка. Экспериментальные значения порогов для прямого (○) и обратного (●) переходов первого рода, а также перехода второго рода (+).

В отличие от ориентационных переходов первого рода, рассмотренных ранее, скачкообразная переориентация директора достигается за счет геометрии взаимодействия этих полей с НЖК. Для реализации рассматриваемого перехода был использован НЖК, обладающий отрицательной ориентационной нелинейностью. Получены различные режимы переориентации в зависимости от величины допорогового электрического поля.

Построена модель, описывающая наблюдаемые ориентационные переходы. Показано, что переход первого рода обусловлен преднаклоном директора на подложках жидкокристаллической ячейки. При этом упругие силы, связанные с ограниченностью светового пучка, приводят к подавлению скачкообразной переориентации директора НЖК, что отличает этот эффект от переходов первого рода, описанных в [5], где эти силы способствуют обратному переходу.

В параграфе 4.4 приведены результаты изучения чисто оптической модуляции света в нематической твист-ячейке. В качестве образца использовался НЖК с добавкой азобензольного гребнеобразного полимера, индуцирующего отрицательную нелинейность. Было показано, что при увеличении мощности светового пучка происходит нарушение режима Могена, обусловленное свето-

На рис. 4 показаны линии ориентационных переходов в деформированное (кривая 1) состояние и обратный переход (кривая 2) в координатах (δ_e, φ) , где δ_e – интенсивность компоненты светового пучка необыкновенной поляризации, φ – угол поворота плоскости поляризации. Точка Т $(\delta_{e,T}, \varphi_T)$ соответствует положению смены рода перехода. Так, например, при $\varphi < \varphi_T$ происходит светоиндуцированный переход первого рода, а при $\varphi > \varphi_T$ – переход второго рода.

Ориентационный переход первого рода с гистерезисом поля директора можно получить при совместном действии светового и низкочастотного электрического полей (параграф 4.2). В отличие от ориентационных переходов первого рода, рассмотренных ранее, скачкообразная переориентация директора достигается за счет геометрии взаимодействия этих полей с НЖК. Для реализации рассматриваемого перехода был использован НЖК, обладающий отрицательной ориентационной нелинейностью. Получены различные режимы переориентации в зависимости от величины допорогового электрического поля.

индуцированной переориентацией директора НЖК. Приложенное допороговое низкочастотное напряжение существенно усиливает эффект.



Рис. 5. Изображения фазового объекта: (а) при пробной мощности светового пучка, (б) при мощности 1 мВт и угле падения на НЖК $\alpha = 55^\circ$, (в) при мощности 3 мВт и угле падения на НЖК $\alpha = 25^\circ$.

Для визуализации фазового объекта применен метод Цернике с использованием жидкокристаллического фильтра, обладающего ориентационной оптической нелинейностью (параграф 4.5). В качестве фильтров использовались НЖК и НЖКП с добавкой 0.05% КД-1. В случае НЖК визуализация фазового объекта происходила при мощности светового пучка ~ 3 мВт. Благодаря знакопеременной нелинейности среды осуществлена перестройка контраста изображения при изменении угла падения светового пучка на жидкокристаллическую ячейку (рис. 5). Показана возможность применения НЖКП для визуализации фазового объекта световым пучком малой (~ 10 мкВт) мощности.

В Заключение сформулированы основные выводы диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследована ориентационная оптическая нелинейность НЖК с добавками высокомолекулярных азобензольных соединений различной молекулярной массы и строения. Показано, что при увеличении молекулярной массы добавки (при одинаковой концентрации хромофоров в объеме НЖК) происходит монотонное увеличение фактора усиления оптического вращающего момента по отношению к нелегированному НЖК. Так, при увеличении молекулярной массы дендримера в 5 раз, величина вращающего момента возрастает в 10 раз.

2. Проведено исследование ориентационной нелинейности НЖК и конформационного состава хромофоров в световом поле для мономера и дендримера, использовавшихся в качестве индуцирующих ориентационную нелинейность добавок. Установлено, что эти добавки в нематической матрице обладают практически одинаковой фотоконформационной активностью. Для транс-

изомеров фактор усиления оптического вращающего момента возрастает (по модулю) в 13 раз, для цис-изомеров – в 3 раза. Это возрастание может быть связано с увеличением времен вращательной диффузии хромофоров. Более существенное возрастание фактора усиления транс-изомера обуславливает переход от знакопеременной нелинейности к отрицательной.

3. Под действием света на однородно ориентированный планарный НЖКП возникает абберационное искажение светового пучка, обусловленное самофокусировкой. При мощности $P = 60$ мВт ($I \sim 1$ кВт/см²), светоиндуцированный показатель преломления составляет $\Delta n = 0.02$ (коэффициент нелинейности $n_2 \sim 10^{-5}$ см²/Вт). Изменение показателя преломления необыкновенной волны обусловлено поворотом директора к световому полю благодаря анизотропии диэлектрической проницаемости на световой частоте.

4. В НЖКП с добавкой азокрасителя (0.05% по массе) обнаружена и исследована оптическая нелинейность, обусловленная изменением межмолекулярных сил при возбуждении молекул красителя. Характерное значение коэффициента нелинейности на порядок превышает максимально достигнутое значение для низкомолекулярной композитной системы и составляет $n_2 \sim 0.1$ см²/Вт. При нормальном падении светового пучка на планарный НЖКП наблюдалась пороговая переориентация директора, аналогичная переходу Фредерикса в низкочастотных полях.

5. Экспериментально и теоретически исследовано влияние поляризации на светоиндуцированные ориентационные переходы в НЖК с примесью высокомолекулярного азосоединения. Установлено, что добавление световой волны обыкновенной поляризации приводит к уменьшению порогов переориентации (по отношению к необыкновенной волне), при этом ориентационный переход первого рода сменяется переходом второго рода. При фиксированной мощности светового пучка и изменении угла поворота плоскости поляризации наблюдались необратимые ориентационные переходы первого рода.

6. Для описания ориентационных переходов первого и второго рода в НЖК с добавками высокомолекулярных соединений развита модель, основанная на разложении вращающих моментов по углу поворота директора. Построены фазовые диаграммы ориентационных переходов, происходящих под действием света произвольной поляризации и приложенного к НЖК низкочастотного электрического поля. Предложенная модель описывает различные экспериментально наблюдаемые режимы переориентации директора НЖК.

7. Обнаружен и исследован ориентационный переход первого рода в НЖК, обладающем отрицательной оптической нелинейностью, под действием наклонно падающей световой волны в присутствии низкочастотного электрического поля. Показано, что этот эффект обусловлен преднаклоном директора вблизи подложек НЖК.

8. Реализована модуляция пропускания твист-ячейки в параллельных поляризаторах, обусловленная светоиндуцированной переориентацией директора. Приложение допорогового напряжения U приводит к существенному усилению эффекта: при интенсивности света $0,4 \text{ кВт/см}^2$ коэффициент пропускания составляет $\sim 10\%$ при $U = 0 \text{ В}$ и $\sim 60\%$ при $U = 2.6 \text{ В}$.

9. Получена визуализация фазового объекта методом Цернике при использовании в качестве фильтров НЖК и НЖКП, обладающих ориентационной оптической нелинейностью. При использовании НЖКП визуализация объекта наблюдается при мощности светового пучка $\sim 10 \text{ мкВт}$.

Литература, цитированная в автореферате

1. I. C. Khoo, "Nonlinear optics of liquid crystalline materials," *Phys. Reports-Review Sect. Phys. Lett.* **471**, 221–267 (2009).
2. I. Janossy, L. Csillag, and A. D. Lloyd, "Temperature-Dependence of the Optical Freedericksz Transition in Dyed Nematic Liquid-Crystals," *Phys. Rev. A* **44**, 8410–8413 (1991).
3. И. А. Будаговский, А. С. Золотько, В. Н. Очкин, М. П. Смаев, А. Ю. Бобровский, В. П. Шибяев, М. И. Барник, "Ориентационная оптическая нелинейность, индуцированная гребнеобразными полимерами в нематическом жидком кристалле," *ЖЭТФ* **133**, 204–214 (2008).
4. Э. А. Бабаян, И. А. Будаговский, А. С. Золотько, М. П. Смаев, С. А. Швецов, Н. И. Бойко, М. И. Барник, "Оптическая бистабильность поля директора нематического жидкого кристалла, легированного дендримерами," *Кратк. сообщ. по физике ФИАН* 46–54 (2010).
5. А. С. Золотько, М. П. Смаев, В. Ф. Китаева, М. И. Барник, "Обратимые ориентационные переходы первого рода, индуцированные в нематическом жидком кристалле пространственно ограниченным световым пучком и низкочастотным электрическим полем," *Квантовая электроника* **34**, 1151–1156 (2004).

Публикации по теме диссертации в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science

1. I.A. Budagovsky, V.N. Ochkin, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, D.A. Brazhnikov, N.I. Boiko, and M.I. Barnik, "Optical director reorientation in NLCs doped with light-absorbing codendrimers of different generations", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **544**, pp. 112-118 (2011).
2. I.A. Budagovsky, D.S. Pavlov, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "Light interaction with NLCs doped with comb-shaped azopolymers with different degrees of polymerization", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **561**, pp. 89-96 (2012).
3. I.A. Budagovsky, D.S. Pavlov, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "First-order light-induced orientation transition in nematic liquid crystal in the presence of low-frequency electric field", *Appl. Phys. Lett.*, **101**, no. 2, 021112 (2012).
4. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, Т.Е. Ковальская, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.И. Барник, "Исследование светоиндуцированной переро- ориентации директора нематических жидких кристаллов по динамике двулучепреломления", *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 1, с. 10-19 (2013).
5. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, Т.Е. Ковальская, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.А. Бугаков, М.И. Барник, "Светоиндуцированная ориентация молекул нематического жидкого кристалла с примесью гребнеобразных полимеров с различным пространственным распределением хромофоров", *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 5, с. 29-36 (2014).
6. А.С. Золотько, В.Н. Очкин, М.П. Смаев, С.А. Швецов, "Фазовые диаграммы ориентационных переходов в поглощающих НЖК", *ЖЭТФ*, **147**, № 5, с. 1045-1052 (2015)
7. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, А.Ю. Бобровский, "Ориентирующее воздействие света на жидкокристаллический полимер с добавкой азокрасителя", *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 8, с. 3-9 (2015).
8. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, В.Н. Очкин, С.А. Швецов, А.Ю. Бобровский, Н.И. Бойко, В.П. Шibaев, "Светоиндуцированный ориентационный переход в нематическом жидкокристаллическом полимере", *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 4, с. 22-27 (2016).

9. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, "Ориентационный оптический момент в нематическом жидком кристалле, обусловленный транс- и цис-изомерами низко- и высокомолекулярных соединений", Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, с. 45-53 (2016).

Публикации по теме диссертации в материалах конференций

1. M.P. Smayev, I.A. Budagovsky, S.A. Shvetsov, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, and M.I. Barnik, "Orientational optical nonlinearity and optical bistability of nematic liquid crystals containing light-absorbing dendrimers of different generations", 3rd International Workshop on Liquid Crystals for Photonics, Elche, Spain, Book of Abstracts, pp. 33-34 (2010).
2. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, "Взаимодействие света с нематическими жидкими кристаллами с примесью дендримеров различных генераций", XIII Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» и IV Школа-семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований», Звенигород-Москва, Сборник трудов, с. 252-253 (2010).
3. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, "Светоиндуцированные ориентационные переходы в нематических жидких кристаллах с примесью дендримеров различных генераций", 53-я Научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный, Труды, часть II: Общая и прикладная физика, с. 228-229 (2010).
4. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.И. Барник, "Ориентационное воздействие световых пучков на нематические жидкие кристаллы, содержащие примеси содендримеров", XIV Национальная конференция по росту кристаллов (НКРК-2010), Москва, Тезисы докладов, 2, с. 260 (2010).
5. I.A. Budagovsky, D.S. Pavlov, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolotko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "Optical orientational effect in NLCs with azodopants of various structures", 14th International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals, Yerevan, Armenia, Book of Abstracts, p. P17 (2011).
6. S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "Effect of light polarization on the optical first-order orientation transition in dendrimer-doped NLC", 14th International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals, Yerevan, Armenia, Book of Abstracts, p. P52 (2011).

7. С.А. Швецов, М.П. Смаев, А.С. Золотько, Н.И. Бойко, М.И. Барник, "Оптические ориентационные переходы первого рода в нематическом жидком кристалле при различной поляризации светового пучка", V Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», Москва, Сборник трудов, с. 92 (2011).
8. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.И. Барник, "Оптическая ориентация в нематических жидких кристаллах, содержащих примеси азодобавок различной молекулярной архитектуры", Первая всероссийская конференция по жидким кристаллам, Иваново, Сборник тезисов докладов, с. 43 (2012).
9. И.А. Будаговский, Д.С. Павлов, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.И. Барник, "Оптический переход первого рода в НЖК с отрицательной ориентационной нелинейностью в присутствии низкочастотного электрического поля", Первая всероссийская конференция по жидким кристаллам, Иваново, Сборник тезисов докладов, с. 143 (2012).
10. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, Д.С. Павлов, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.И. Барник, "Ориентационные переходы первого рода в нематическом жидком кристалле с отрицательной нелинейностью под действием светового и низкочастотного электрического полей", XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Звенигород, Сборник трудов, с. 229-230 (2012).
11. А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.И. Барник, "Переходы первого рода в НЖК под действием света различной поляризации", 55-я Научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный-Жуковский, Труды, Общая и прикладная физика, с. 70-71 (2012).
12. I.A. Budagovsky, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "Orientational optical nonlinearity and photoisomerisation in doped nematic liquid crystals", in ICONO/LAT 2013 Technical Digest on CD-ROM (Moscow, Russia, 2013) IWP2.
13. I.A. Budagovsky, D.S. Pavlov, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "First-order orientation transitions in polymer-doped NLC caused by low-frequency electric and light fields", XXth Conference on Liquid Crystals (Chemistry, Physics and Applications), Mikolajki, Poland, Programme & Abstracts, p. O-06 (2013).

14. M.P. Smayev, I.A. Budagovsky, S.A. Shvetsov, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "Light-induced director reorientation and photoisomerization in nematic liquid crystals doped with azobenzene dopants", 12th European Conference on Liquid Crystals, Rhodes, Greece, Abstracts, p. O27 (2013).
15. M.P. Smayev, I.A. Budagovsky, V.N. Ochkin, S.A. Shvetsov, and A.S. Zolot'ko, "Phase diagrams of orientation transitions in polymer-doped nematic liquid crystals", 12th European Conference on Liquid Crystals, Rhodes, Greece, Abstracts, p. PIII.43 (2013).
16. I.A. Budagovsky, D.S. Pavlov, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "First-order orientation transitions in NLC with negative nonlinearity induced by obliquely incident light beam and electric field", 15th Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals, Honolulu, Hawaii, USA, Abstracts, p. 74 (2013).
17. I.A. Budagovsky, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, N.I. Boiko, M.I. Barnik, "Photoisomerization of low- and high-molar mass azodopants inducing orientational optical nonlinearity in nematic host", 15th Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals, Honolulu, Hawaii, USA, Abstracts, p. 77 (2013).
18. С.А. Швецов, "Фотоизомеризация азобензольных соединений и ориентационная нелинейность нематического жидкого кристалла", V Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, Россия, Сборник трудов, с. 68 (2013).
19. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.А. Бугаков, М.И. Барник, "Оптическая ориентация в нематическом жидком кристалле, легированном гребнеобразными полимерами", Шестая Всероссийская Каргинская конференция "Полимеры - 2014", Москва, Том II. Сборник тезисов стендовых докладов. В 2 частях. Часть первая, с. 592 (2014).
20. I.A. Budagovsky, V.N. Ochkin, S.A. Shvetsov, M.P. Smayev, A.S. Zolot'ko, "Purely optical orientational phase transitions in nematic liquid crystals", International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'14), Cassis, France, Book of Abstracts, p. P72 (2014).
21. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, В.Н. Очкин, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.А. Бугаков, М.И. Барник, "Ориентационная опти-

- ческая нелинейность нематических жидких кристаллов, легированных полимерами с различным пространственным распределением поглощающих фрагментов", VIII Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики", Санкт-Петербург, Сборник трудов, с. 422-425 (2014).
22. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, "Ориентационная оптическая нелинейность нематического жидкого кристалла и конформационный состав низко- и высокомолекулярных добавок", VIII Международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики", Санкт-Петербург, Сборник трудов, с. 425-427 (2014).
23. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, Н.И. Бойко, М.А. Бугаков, "Оптическая ориентация нематических жидких кристаллов, легированных полимерами с различной локализацией поглощающих групп", XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Москва, Сборник трудов, с. 224-225 (2014).
24. М.П. Смаев, С.А. Швецов, "Ориентационные фазовые переходы в поглощающих НЖК", XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Москва, Сборник трудов, с. 255-256 (2014).
25. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, А.Ю. Бобровский, "Оптическая ориентация жидкокристаллического полимера", XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Москва, Сборник трудов, с. 255-256 (2014).
26. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, А. Ю. Бобровский, "Светоиндуцированная переориентация директора в жидкокристаллическом полимере", 57-я Научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный-Жуковский, Труды, Общая и прикладная физика, с. 60-62 (2014).
27. Е.Л. Бубис, И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, "Переключение знака контраста изображения при использовании нелинейного жидкокристаллического фильтра", IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, Сборник научных трудов, с. 358-359 (2015).
28. Е.Л. Бубис, И.А. Будаговский, А.С. Золотько, М.П. Смаев, С.А. Швецов, А.Ю. Бобровский, "Визуализация фазового объекта при помощи жидкокристаллического нелинейного фильтра", Тринадцатая Междуна-

родная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», Москва, Сборник трудов, с. 141-142 (2015).

29. Будаговский И.А., Золотько А.С., Смаев М.П., Швецов С.А., Бобровский А.Ю., "Ориентационное воздействие света на жидкокристаллический полимер, легированный красителем", IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2015», Санкт-Петербург, Сборник трудов, с. 219-220 (2015).
30. И.А. Будаговский, А.С. Золотько, С.А. Швецов, А.Ю. Бобровский, Н.И. Бойко "Светоиндуцированная переориентация директора в нематическом жидкокристаллическом полимере с добавкой азокрасителя", VI Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, Россия, Сборник трудов, с. 76 (2015).
31. С.А. Швецов "Модуляция пропускания света в твист-ячейке, обусловленная ориентационной оптической нелинейностью нематического жидкого кристалла", XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам, Москва, Сборник тезисов, с. 26-27.