

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

На правах рукописи
УДК [535:530.182]:532.783

Будаговский Иван Андреевич

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С НЕМАТИЧЕСКИМИ
ЖИДКИМИ КРИСТАЛЛАМИ В ПРИСУТСТВИИ
ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Специальность 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Золотко Александр Степанович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Палто Сергей Петрович
кандидат физико-математических наук
Чайков Леонид Леонидович

Ведущая организация: Физический факультет Московского
Государственного Университета
им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится «_14_» __февраля__ 2011 года в __12__ часов на заседании Диссертационного совета Д 002.023.03 в Учреждении Российской академии наук Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Автореферат разослан «_____» _____ 2010 года

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.023.03,
доктор физико-математических наук

А.С. Шиканов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Предметом диссертации являются ориентационные нелинейно-оптические эффекты в нематических жидких кристаллах (НЖК), находящихся под действием электрических полей.

Жидкие кристаллы представляют собой промежуточную фазу между твёрдыми телами и изотропными жидкостями. Они совмещают в себе определённую структурную упорядоченность и высокую подвижность молекул, что обуславливает их высокую восприимчивость к внешним воздействиям, в частности, к действию электромагнитных полей, и значительную оптическую анизотропию. Переориентация директора НЖК (единичного вектора, задающего преимущественную ориентацию молекул) в низкочастотных полях лежит в основе применения НЖК в устройствах отображения информации. Взаимодействие НЖК со световым полем характеризуется “гигантской” ориентационной нелинейностью, на 9 порядков превышающей керровскую нелинейность жидкостей. Добавление к жидким кристаллам малых количеств поглощающих примесей (порядка 0.1%) может ещё на 2 порядка увеличить ориентационную нелинейность.

В НЖК может наблюдаться целый ряд нелинейно-оптических эффектов, проявляющихся в относительно слабых полях непрерывных лазеров (самофокусировка и самодефокусировка световых пучков, обращение волнового фронта, формирование и взаимодействие солитонов, запоминаемая переориентация директора, наведённое полное внутреннее отражение, периодические и стохастические колебания поля директора и т.д.). При этом абберрационное самовоздействие светового пучка (самофокусировка и самодефокусировка) является чрезвычайно удобным и информативным методом исследования взаимодействия света с НЖК.

Ряд нелинейно-оптических эффектов наблюдался при дополнительном воздействии постоянного или низкочастотного электрического поля. К ним от-

носится фоторефрактивный эффект – изменение показателя преломления НЖК вследствие вращения директора в поле фотоиндуцированных зарядов.

Фоторефрактивный эффект в НЖК был обнаружен в 1994¹ году в образце нематика с примесью красителя родамин 6Ж (при действии постоянного внешнего поля) и объяснялся генерацией зарядов при поглощении света красителем в объёме НЖК (объёмный фоторефрактивный эффект). Далее, этот эффект наблюдался и в других жидкокристаллических системах, содержащих разнообразные добавки. В 2002² году проявление эффекта фоторефракции наблюдалось и в прозрачных НЖК под действием постоянного внешнего поля, и объяснялось на основе фотоиндуцированного снятия экранирования (поверхностный фоторефрактивный эффект). Несмотря на значительный интерес к фоторефрактивным эффектам в НЖК, ряд важных вопросов остаётся не выясненным. В частности, не установлен окончательно механизм фоторефракции в НЖК с поглощающими добавками, необходимость внешнего постоянного поля, влияние ориентантов.

Другим нелинейно-оптическим эффектом, наблюдавшимся в присутствии дополнительного поля (низкочастотного электрического или магнитного), является эффект бистабильности поля директора в линейно поляризованном световом пучке. Это явление связано с превращением перехода Фредерикса (обычно являющийся переходом второго рода) в переход первого рода. Эффекты трансформации рода перехода Фредерикса и бистабильности изучались ранее в прозрачных НЖК. В то же время, представляет несомненный интерес изучение этих явлений в легированных жидкокристаллических системах. Присутствие красителя усиливает вращающий момент, при этом фактор усиления может зависеть от угла между световым полем и директором. Эта зависимость создаёт дополнительный канал обратной связи, способствующий проявлению бистабильности.

¹ Е.В. Руденко, А.В. Сухов, Письма в ЖЭТФ, **59**(2), 133-136 (1994).

² Р. Pagliusi and G. Cipparrone, Appl. Phys. Lett. **80**, 168 (2002).

Цель диссертационной работы

Экспериментальное и теоретическое исследование ориентационных нелинейно-оптических эффектов, проявляющихся при одновременном воздействии светового и электрического полей на нематические жидкие кристаллы.

Научная новизна

Впервые исследовано взаимодействие светового пучка с нематическими жидкими кристаллами в присутствии постоянного внешнего поля. Дано объяснение наблюдаемого эффекта самовоздействия на основе механизма поверхностного фоторефрактивного эффекта и построена теоретическая модель этого явления. Показано, что самовоздействие света приводит к оптической катастрофе "гиперболическая омбилика".

Экспериментально исследован новый эффект самовоздействия света в НЖК с примесью стильбенового красителя ДЕАНС.

Впервые экспериментально наблюдался чисто оптический ориентационный переход первого рода для линейно поляризованного света. Построена теория этого явления.

Практическая значимость

Нелинейность, реализуемая при поверхностном фоторефрактивном эффекте, может быть усилена путём легирования матрицы и ориентантов ячейки, и достигает значений $10^{-2} \text{ см}^2/\text{Вт}$ (что на два порядка превосходит ориентационную нелинейность НЖК, связанную с воздействием света на индуцированные диполи).

Полученные результаты могут быть полезны для фундаментальных исследований воздействия света на вещество и создания систем модуляции и оптического переключения.

Метод абберационного самовоздействия позволяет определять тип (объёмный или поверхностный) и свойства фоторефрактивной нелинейности. Анализ абберационной картины отражённых пучков позволяет проводить исследование нелинейности в сильно поглощающих НЖК.

Защищаемые результаты и положения

1. Самовоздействие света в нематических жидких кристаллах (НЖК), находящихся под действием постоянного электрического поля, приводит к асимметричной абберационной картине и обусловлено поверхностным фоторефрактивным эффектом (деформацией директора в поле, проникающем в объём НЖК при светоиндуцированном снятии экранирования).
2. Построена теория взаимодействия светового пучка с НЖК в постоянном электрическом поле, описывающая деформацию поля директора, трансформацию волнового фронта, распределение интенсивности в дальней зоне дифракции. Самовоздействие света приводит к оптической катастрофе гиперболическая омбилика.
3. Обнаружен светоиндуцированный переход Фредерикса первого рода в поле линейно поляризованной световой волны. Этот переход наблюдается в НЖК с примесью наноразмерного дендримера. Он сопровождается значительной областью бистабильности, положением которой можно управлять внешним переменным полем. Переход Фредерикса в переменном электрическом поле под действием светового пучка превращается из перехода второго в переход первого рода.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, из которых 9 в изданиях, рекомендованных ВАК. Список публикаций приводится в конце автореферата.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на Международных конференциях по когерентной и нелинейной оптике (Санкт-Петербург, Россия, 2005 г.; Минск, Республика Беларусь, 2007 г.; Казань, Россия, 2010 г.), 11-й, 12-й и 13-й Международных конференциях по оптике жидких кристаллов (Клеарвотер, США, 2005 г.; Пуэбла, Мексика, 2007 г.; Эриче, Италия, 2009 г.), 6-й Международной конференции “Лазерная физика и оптические технологии” (Гродно, Республика Беларусь, 2006 г.), 22-й и 23-й Международных конференциях по жидким кристаллам (Джеджу, Корея, 2008 г.; Краков, Польша, 2010), 2-й Международной конференции по фотонике жидких кристаллов (Кэмбридж, Великобритания, 2008 г.), 3-й Высшей лазерной школе “Современные проблемы лазерной физики” (Московская область, Россия, 2009 г.), 5-й Всероссийской каргинской конференции "Полимеры - 2010" (Москва, Россия, 2010).

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

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 98 наименований (70 работ на иностранных языках). Общий объем работы составляет 128 страниц, включающих 67 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, изложены цели и новизна диссертации, выносимые на защиту положения, а также структура работы.

В **первой главе** диссертации представлен обзор работ, посвящённых оптическим свойствам нематических жидких кристаллов, методам их исследований и влиянию внешних электрических полей, обосновываются задачи исследований.

В *первом параграфе* даётся краткий обзор типов жидких кристаллов. Рассматриваются свойства нематических жидких кристаллов, ориентационная упорядоченность НЖК и влияние внешних полей на ориентацию директора НЖК (направление преимущественной ориентации молекул). Высокая подвижность молекул в совокупности с их ориентационной упорядоченностью приводит к проявлению в НЖК ярко выраженных нелинейно-оптических эффектов и к высокой чувствительности к внешним воздействиям, в частности, к электрическим полям.

Во *втором параграфе* рассмотрены основные нелинейно-оптические эффекты в НЖК: тепловая и ориентационная нелинейности, нелинейность, обусловленная поглощением света легирующей добавкой, эффекты запоминаемой переориентации. Описывается метод аберрационного самовоздействия, позволяющий простым образом разделять и исследовать эти эффекты.

Третий параграф посвящён фоторефрактивными эффектами в НЖК, т.е., явлениям изменения показателя преломления при переориентации директора в поле фотоиндуцированных зарядов. Перераспределение зарядов может происходить как в объёме кристалла (объёмный фоторефрактивный эффект), так и при изменении проводимости ограничивающих слой НЖК подложек (поверхностный фоторефрактивный эффект). Описан метод многоволнового смещения, используемый для исследований фоторефракции НЖК, а также основные работы, предлагающие объяснение механизма фоторефракции.

В *четвёртом параграфе* первой главы рассматриваются ориентационные переходы первого рода в НЖК, сопровождающиеся бистабильностью поля директора. Светоиндуцированные переходы Фредерикса первого рода наблюдались ранее только в присутствии дополнительных полей. Влияние легирующих добавок на возможность трансформации типа перехода не изучалось.

Основное содержание **второй главы** составляют результаты исследований самовоздействия света в ячейках находящихся под действием постоянного внешнего поля. Эффект комбинированного действия на НЖК света и внешнего

поля изучался с помощью метода абберационного самовоздействия и непосредственных измерений фототоков.

В *первом* и *втором параграфах* приведены свойства материалов и описание экспериментальной установки. Исследование взаимодействия света с НЖК при приложении внешних электрических полей проводились для ячеек с прозрачным жидкокристаллическим материалом ЖКМ-1277, а также для образцов с добавлением красителей: родамина 6Ж, метилового красного, азокрасителя КД-1, стильбенового красителя ДЭАНС, и наноразмерных дендримеров второй генерации. Кроме того, исследовалось влияние различных ориентирующих поверхностей: полиимида (использовавшийся в большинстве экспериментов), поливинилиденфторида (ПВДФ) и полиимида с добавлением красителя протравной чисто-жёлтый (ПЧЖ).

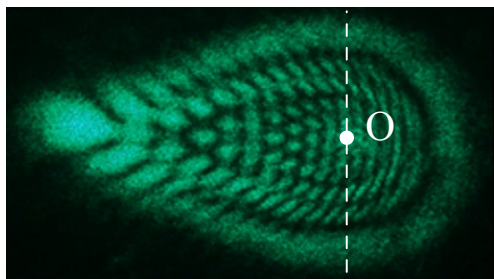


Рис. 1. Абберационная картина для наклонно падающего светового пучка при приложении постоянного напряжения. Точкой О отмечено положение пучка до развития самовоздействия.

В *третьем параграфе* рассматриваются свойства абберационного самовоздействия света в НЖК в присутствии внешнего постоянного поля. Абберационная картина в этом случае характеризуется особыми свойствами, которые отличают данный вид самовоздействия от обычного ориентационного. Деформация поля директора при приложении поля начинается при малой интенсивности света (на

два порядка меньшей, чем необходимо для возникновения самовоздействия без поля). Картина при наклонном падении света (рис. 1) сильно асимметрична и отличается от стандартной системы абберационных колец.

Порог перехода Фредерикса при постоянном напряжении составляет 3.5 – 4.2 В, что в несколько раз превышает порог при переменном напряжении (0.95 В). Это свидетельствует об экранировании внешнего поля перераспределяющимися зарядами. Появление картины при освещении НЖК при приложении допорогового поля говорит о светоиндуцированном снятии экранировки. Таким об-

разом, наблюдаемое явление является следствием изменения показателя преломления в поле перераспределяемых светом зарядов, т.е., фоторефрактивным эффектом.

Основным свойством самовоздействия света при дополнительном внешнем постоянном напряжении является независимость формы и размеров картины от поляризации излучения, что говорит о поверхностном типе явления (поскольку для объёмного эффекта должен сказываться дихроизм поглощения).

Асимметрия картины (направление вытянутости по горизонтали) меняется при изменении знака угла падения света или полярности прикладываемого напряжения. Подобное поведение является следствием асимметричной деформации поля директора относительно оси пучка и связано с асимметрией светоиндуцированного снятия экранирования, которое происходит главным образом на анодной подложке.

При нормальном падении света картина имеет вид деформированных, но хорошо идентифицируемых колец, число которых позволяет оценить изменение показателя преломления и коэффициент нелинейности n_2 . Нелинейность зависит от длины волны излучения и от наличия легирующих НЖК или ориентант добавок. Для прозрачной, нелегированной матрицы нелинейность возрастала при уменьшении длины волны от $n_2 = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{Вт}$ для $\lambda = 515 \text{ нм}$ до $n_2 = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{Вт}$ для $\lambda = 458 \text{ нм}$. Последнее значение более чем на порядок превышает ориентационную нелинейность керровского типа в этом же образце.

При нанесении ориентанта, легированного фоточувствительным красителем ПЧЖ, на одну из подложек происходит увеличение нелинейности в 3-10 раз (если легированная подложка является анодом). Для образца, где вместо одного ориентанта нанесён полимер ПВДФ, при такой же полярности (ПВДФ на анодной подложке) происходит подавление нелинейности. Изменение полярности (полиимид – анод) в обоих образцах приводит к нелинейности, схожей со случаем стандартной ячейки. Подобное поведение указывает на основную роль анод-

ной подложки; нелинейность ячейки можно дополнительно модифицировать путём изменения ориентантов.

Легирование жидкокристаллической системы также приводит к изменению нелинейности ячейки. Добавление красителя родамин 6Ж, с которым впервые наблюдали фоторефрактивный эффект в НЖК, изменяет спектральную зависимость нелинейности (усиление значительнее в длинноволновой области, в соответствии со спектром поглощения красителя). Добавление красителя метилового красного, который часто используется в работах по фоторефракции НЖК, увеличивало нелинейность до $n_2 = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{Вт}$. Во всех образцах, включая легированные, эффект не зависел от поляризации света, то есть, был поверхностным. Усиление нелинейности в этом случае может быть следствием изменения эффективности светоиндуцированного снятия экранирования, например, вследствие осаждения красителя на стенках ячейки.

В *четвёртом параграфе* второй главы описаны результаты исследований фоточувствительности компонент ячеек с помощью измерений тока. Изучены образцы различной структуры: (1) стандартная ячейка с прозрачным НЖК и полиимидом на обеих подложках, (2) ячейка с полиимидом на одной подложке, (3) ячейка без полиимида (планарная ориентация в этом случае достигалась методом скрабирования), и (4) слой полиимида, заключённый между электродами из ИТО и алюминия.

Проводимость ячейки 1 при освещении лазерным пучком изменялась как при напряжении, достаточном для развития абберационной картины, так и при меньшем, допороговом напряжении (то есть, деформация поля директора не является причиной изменения проводимости). Поскольку для ячейки 3 силы поверхностного сцепления были значительно ослаблены отсутствием ориентанта, в экспериментах использовалось малое внешнее напряжение (0.3 В), не вызывающее переориентации директора, а для увеличения чувствительности измерений освещалась вся поверхность ячейки с помощью мощного светодиода.

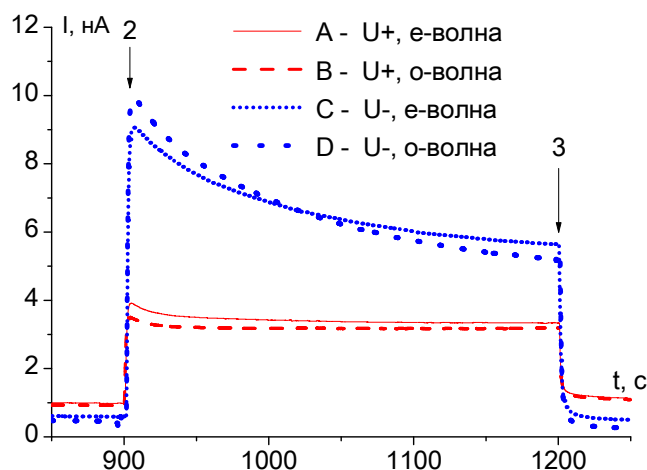


Рис. 2. Динамика фототока в образце 2 (с ориентантом на одной подложке). А, С – необыкновенная поляризация, В, D – обыкновенная поляризация света. А, В – подложка с полиимидом является катодом, С, D – подложка с полиимидом является анодом.

ячейки 2 наблюдалась зависимость от полярности напряжения: если подложка с полиимидом являлась анодом, фототок был сравним с наблюдаемым для ячейки 1, а при противоположной полярности – в два раза меньше (рис. 2). Такое же малое значение стационарного фототока наблюдалось для ячейки без полиимида 3, однако, с несколько иной динамикой. Эти результаты согласуются с выводами, сделанными на основании оптических измерений. Сравнение фототоков позволяет сделать вывод, что основной вклад в фоточувствительность дают поверхности, граничащие с полиимидом (либо сам полиимид), вблизи анода.

Фототок в образце со слоем полиимида имел более сложную динамику, обусловленную, по-видимому, различными вкладами: фотопроводимостью слоя полиимида и фотовольтаическими токами на границах ИТО-полиимид и алюминий-полиимид. Эта динамика приводит к разному поведению фототоков в ячейке с полиимидом (1, 2) и без него (3).

Возможной причиной снятия экранирования могло быть изменение проводимости при нагреве полиимида или электродов при поглощении света. Однако простой расчёт и исследованная зависимость проводимости от температуры показывают, что нагрев под действием лазерного пучка не достаточен для наблюдаемого изменения проводимости. Кроме того, поглощение ИТО электрода (ко-

При включении напряжения происходит быстрый скачок тока, соответствующий формированию экранирующего слоя. Величина темнового тока составляет порядка 1 нА. При освещении ячейки возникает фототок, величина и динамика которого зависят от типа ячейки. Для образца 1 стационарный фототок составлял порядка 6 нА и не зависел от поляризации света и полярности внешнего напряжения. Для асимметричной

торый поглощает основную часть света и, следовательно, больше нагревается) увеличивается с увеличением длины волны света. Это противоречит спектральной зависимости нелинейности фоторефрактивного эффекта, которая уменьшается с ростом длины волны.

В третьей главе строится теория самовоздействия света в НЖК во внешнем постоянном поле, проводится численное моделирование и сравнение расчётов с экспериментом. Рассматривается экспериментальная геометрия отражённых пучков, позволяющая наблюдать сходные абберационные картины без приложения внешнего поля.

Деформация директора в проникающем электрическом поле определялась вариационным методом. Для этого минимизировалось выражение для плотности свободной энергии F в электрическом поле $\mathbf{G}$:

$$F = \frac{K}{2} (\text{div}^2 \mathbf{n} + \text{rot}^2 \mathbf{n}) - \frac{\Delta \varepsilon_{dc} (\mathbf{n} \mathbf{G})^2}{8\pi}, \quad (1)$$

где K – упругая постоянная Франка, $\mathbf{n}$ – директор, $\Delta \varepsilon_{dc}$ – анизотропия диэлектрической проницаемости.

При решении уравнения (1) использовался ряд упрощений: действие света сводится только к снятию экранирования, деформации директора малы, не учитываются поперечные упругие силы, деформация директора определяется постоянным полем в центральном слое НЖК, упругие постоянные одинаковы. В рамках этих приближений выражение для деформации директора имеет вид

$$\delta \mathbf{n}_m = \frac{\Delta \varepsilon_{dc} L^2}{\pi^4 K} (\mathbf{G}_\Sigma \mathbf{n}_0) [[\mathbf{G}_\Sigma \times \mathbf{n}_0] \times \mathbf{n}_0], \quad (2)$$

где $\mathbf{n}_0$ – невозмущённое поле директора, $\mathbf{G}_\Sigma$ – электрическое поле в центре НЖК, L – толщина НЖК. Эффективное электрическое поле, проникающее в объём НЖК, моделировалось полем двух точечных зарядов разных знаков, расположенных вблизи точек входа и выхода светового пучка (рис. 3).

С помощью (2) можно найти коэффициент преломления для необыкновенной волны $n_e = \frac{\sqrt{\varepsilon_\perp \varepsilon_\parallel}}{\sqrt{\varepsilon_\perp + \Delta \varepsilon (\mathbf{n} \mathbf{n})^2}}$, где $\Delta \varepsilon$ – оптическая анизотропия, $\mathbf{n}$ – единичный

[illegible]

Зная набег фазы можно определить распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (то есть, абберационную картину) с помощью интеграла Кирхгофа:

где Θ_x, Θ_z – углы отклонения лучей, k – волновой вектор, I_0 – профиль интенсивности падающего гауссовского пучка.

14

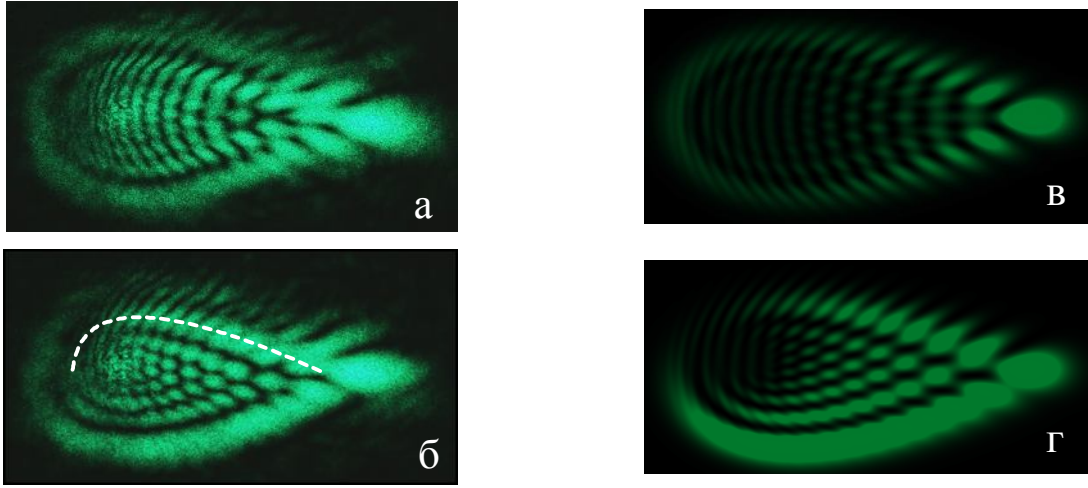


Рис. 4. (а, б) Экспериментально наблюдаемые абберационные картины в НЖК ЖКМ-1277 при наклонном падении ($\alpha = +40^\circ$) светового пучка ($\lambda = 515$ нм, $P = 10$ мВт) при внешнем постоянном напряжении $U = +2$ В. (в, г) Результаты численного расчёта при $L = 100$ мкм, $w_0 = 70$ мкм, $\gamma_A^2 = 0.6$, $\gamma_C = 0$, $\eta = 0$, $\Delta n = 0.2$, $\beta = +30^\circ$, $l_A = 150$ мкм. (б, г) – сдвиг кристалла относительно пучка вверх. Пунктир отмечает внутреннюю верхнюю каустику.

Численно положение каустик вычисляется с помощью выражений $\Theta_x = \frac{1}{k} \frac{\partial S_{NL}}{\partial x}$, $\Theta_z = \frac{1}{k} \frac{\partial S_{NL}}{\partial z}$ для тех углов отклонения лучей, для которых обращается в ноль гессиан нелинейного набега фазы S_{NL} : $\frac{\partial^2 S_{NL}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 S_{NL}}{\partial z^2} - \left(\frac{\partial^2 S_{NL}}{\partial x \partial z} \right)^2 = 0$. Критические точки отображения плоскости (x, z) на плоскость углов (Θ_x, Θ_z) соответствуют областям самофокусировки (справа) и самодефокусировки (слева) фазового профиля пучка (рис. 5а, б). Эти области определяют две каустики (рис. 5в) абберационной картины (рис. 5г), которые визуализируются при сдвиге НЖК (рис. 4г).

Аналитически положение каустик можно определить разложив фазовый набег S_{NL} в ряд Тейлора в окрестности особых точек. Разложение вблизи точки $u = v = 0$ (рис. 5б), где формируется излом абберационной картины, даёт выражение для набега фазы

$$S_{NL} = S_0 \{ P[u_A - 3u_A(u_A^2 + v_A^2)] - Qu_A^2 \}, \quad (5)$$

где $P = 2\gamma_A^2 \sin \beta$, $Q = \frac{\cos 2\beta}{\cos \beta} \gamma_A^4$. Согласно теории катастроф, выражение (5) соответствует элементарной катастрофе типа “гиперболическая омбилика”.

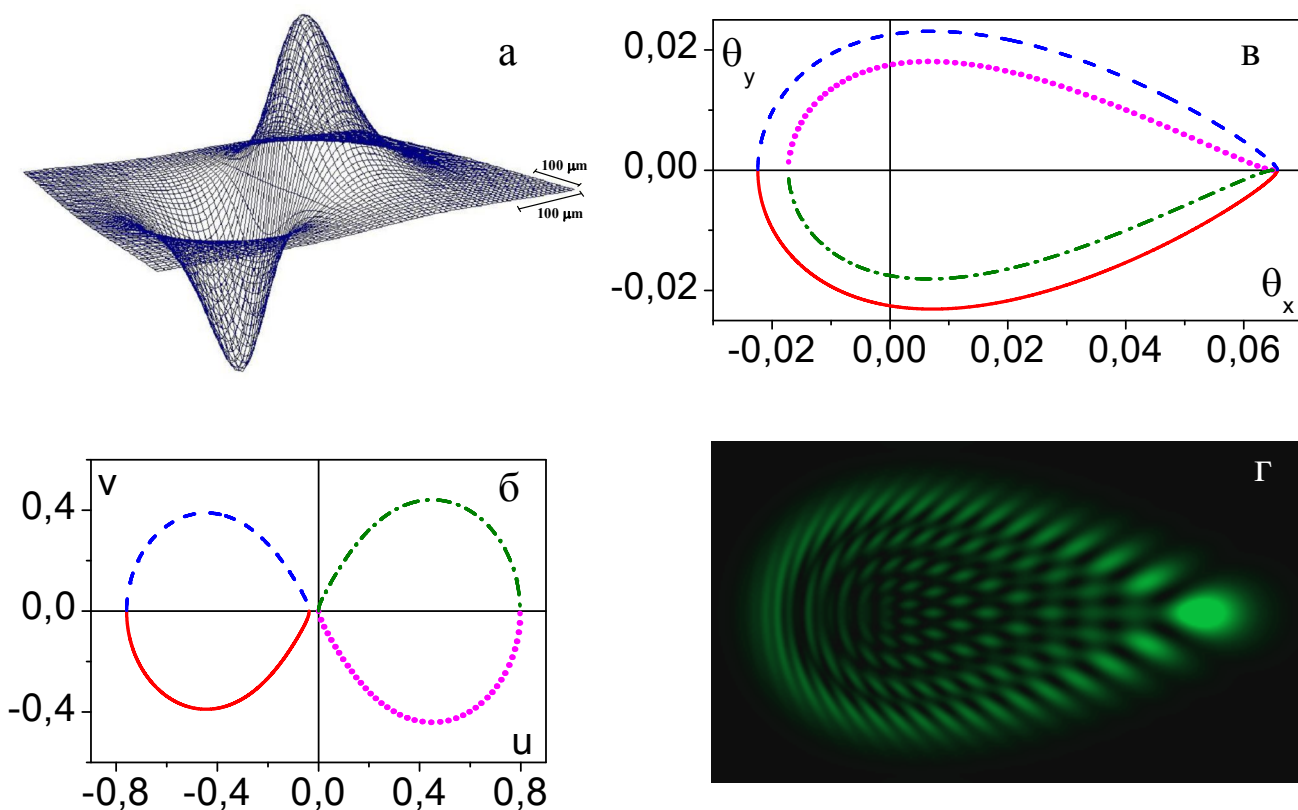


Рис. 5. Рассчитанные (а) фазовый набег, (б) критические точки отображения плоскости (x, z) на плоскость углов (θ_x, θ_z) и (в) соответствующие им каустики, (г) абберационная картина, для параметров, указанных на рис. 4. u, v – нормированные координаты в поперечном сечении пучка (x, z)

Результаты численных расчётов, приведённые на рис. 5, получены в предположении полностью ассиметричного снятия экранирования (только на аноде), и хорошо описывают ситуацию в нелегированном образце. Учёт снятия экранирования на обеих подложках приводит к абберационным картинам, которые экспериментально соответствуют картинам, наблюдаемым в НЖК с примесью метилового красного. Это позволяет предположить, что краситель модифицирует эффективность снятия экранирования на катодной подложке.

Второй параграф третьей главы посвящён изучению самовоздействия света с помощью картин отражённого пучка. Пучок, отражённый от границы НЖК-стекло, при обратном распространении через объём кристалла будет частично захватывать область с деформированным полем директора и приобретать дополнительный набег фазы, несимметрично относительно оси пучка. В результате может проявляться катастрофа типа гиперболической омбилики (без прило-

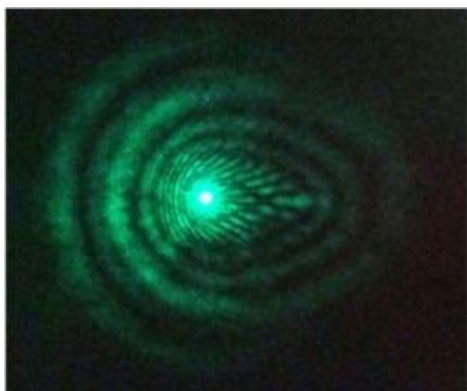


Рис. 6. Картина отражённого пучка при наклонном падении ($\alpha = 40^\circ$) света ($P = 2$ мВт, $\lambda = 515$ нм) в гомеотропном кристалле ЖКМ-1277+0.025% КД-1.

жения внешнего поля) и характерная асимметричная картина (рис. 6). Направление асимметрии определяется ориентацией НЖК и знаком нелинейности.

Размер абберационных картин отражённого и проходящего пучков определяется вкладом тепловой нелинейности, который зависит от типа НЖК, и от вкладом ориентационной нелинейности, которая зависит от типа НЖК и направления пучка. Сравнение этих

картин позволяет получать дополнительную информацию о свойствах образца. Это особенно важно в сильно поглощающих образцах, где ориентационные эффекты зачастую неразличимы на фоне значительной тепловой нелинейности.

В четвёртой главе описываются результаты исследования НЖК с примесью стильбенового красителя ДЭАНС.

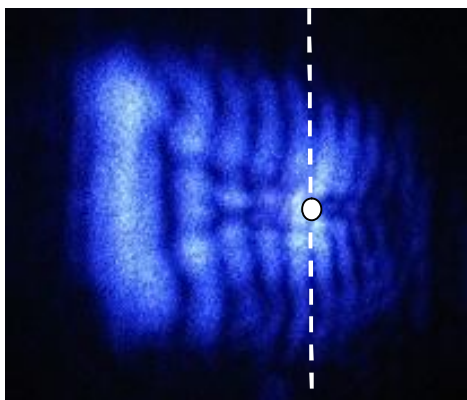


Рис. 7. Абберационная картина в планарном ЖКМ-1277 + 0.1% ДЭАНС при наклонном падении ($\alpha = 50^\circ$) света ($P = 2$ мВт, $\lambda = 473$ нм). Точкой отмечено положение оси пучка до самовоздействия.

Самовоздействие света в планарном НЖК, легированном ДЭАНС, отличается как от обычных ориентационных эффектов, так и от поверхностной фоторефрактивности. Абберационная картина в этом образце имела сложное асимметричное распределение интенсивности (рис. 7) и наблюдалась без приложения внешнего поля. Картина уменьшалась при вращении плоскости поляризации от необыкновенной к обыкновенной волне. В то же время, она формировалась и в о-волне, что

не характерно для ориентационного самовоздействия.

Вид картины значительно менялся в зависимости от полярности внешнего постоянного поля (величина поля при используемой интенсивности света не

достаточна для проявления поверхностной фоторефракции, и этот процесс не мешал наблюдениям). Увеличение постоянного поля одной полярности приводило к плавному увеличению горизонтальной расходимости картины и её растягиванию (влево относительно оси на рис. 7). При противоположной полярности увеличение поля смещало картину вправо, проводя через положение симметрии, и далее меняя её вид на зеркальное отображение (относительно вертикальной оси) первоначально наблюдаемой.

На основании этих свойств сделан вывод, что наблюдаемое явление обусловлено светоиндуцированным перераспределением зарядов в объёме НЖК, то есть, объёмным фоторефрактивным эффектом. Качественный анализ, проведённый в предположении механизма объёмной фоторефракции с учётом затухания интенсивности пучка, объясняет некоторые важные характеристики самовоздействия и позволяет заключить, что более подвижными являются носители положительного заряда.

В **пятой главе** изучаются эффекты бистабильности поля директора и светоиндуцированный переход Фредерикса первого рода. Использование жидкокристаллической системы с содержанием наноразмерного карбосиланового дендримера второй генерации позволило осуществить необходимую для бистабильности обратную связь между фактором усиления нелинейности и деформацией директора даже без дополнительных внешних воздействий.

Первый параграф пятой главы посвящён экспериментальному исследованию оптического перехода Фредерикса первого рода. Подобный переход впервые наблюдается для линейно-поляризованной световой волны. Он может превращаться в переход второго рода при изменении геометрии эксперимента или приложении внешнего переменного поля.

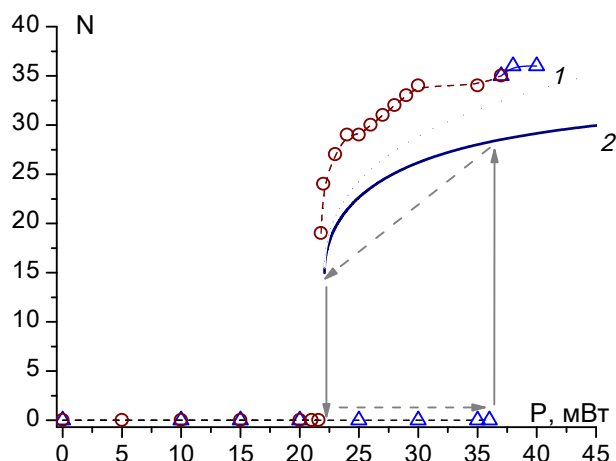


Рис. 8. (1) Число абберационных колец N при увеличении (треугольники) и уменьшении (круги) мощности P светового пучка ($\lambda = 473$ нм), нормально падающего на планарный НЖК ЖКМ-1277 + 0.15% G2. (2) Теоретическая зависимость.

Зависимость числа абберационных колец от мощности излучения при нормальном падении света имеет петлю гистерезиса, то есть, область с двумя стационарными положениями деформации директора (рис. 8). Ширина этой области бистабильности составляет $\Delta P = 0.4$, что значительно превышает значения, известные из литературы для переходов Фредерикса (и полученные в различных геометриях, в том числе с приложением

внешнего поля). Область бистабильности сужается с ростом угла падения световой волны и пропадает при $\alpha > 30^\circ$. Схожим образом действует и внешнее переменное поле: величины порогов перехода и ширина области бистабильности уменьшаются при увеличении напряжения. При $U = 0.7$ В переход становится переходом второго рода.

Помимо чисто оптической бистабильности, гистерезис проявляется в зависимости деформации директора от величины внешнего переменного напряжения. Ширина области бистабильности зависит от мощности светового пучка. Переход Фредерикса становится переходом первого рода при $P > 10$ мВт и увеличивается с ростом P вплоть до необратимого перехода при $P = 32.5$ мВт.

Теоретическое описание переходов Фредерикса первого рода приводится во **втором параграфе** пятой главы. Влияния угла поворота директора Ψ на эффективную диэлектрическую анизотропию $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ задавалось простым выражением $\Delta\epsilon_{\text{eff}} = -\Delta\epsilon_{\text{eff}}^{(0)} - \Delta\epsilon_{\text{eff}}^{(1)} \sin^2 \psi$. Деформированное поле директора рассчитывалось из уравнения баланса моментов сил (вязкоупругих и действующих со стороны светового и электрического полей):

$$\gamma_1 \frac{\partial \psi}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ac} U_0^2}{8\pi L^2} \sin \psi \cos \psi - \frac{\Delta \varepsilon^{(0)} (1 + m \sin^2(\Psi + \beta)) |A|^2}{8\pi} \sin(\psi + \beta) \cos(\psi + \beta), \quad (6)$$

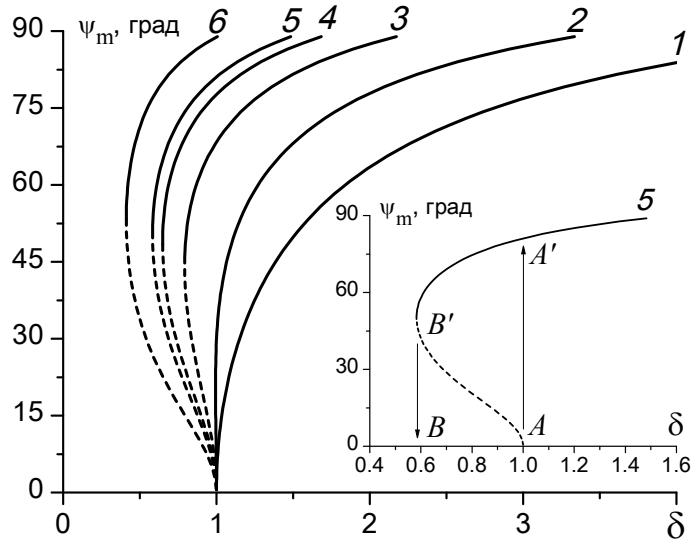


Рис. 9. Рассчитанные зависимости угла поворота директора ψ_m от безразмерной интенсивности световой волны δ при различных значениях параметра m : (1) 0, (2) 0.8, (3) 2, (4) 3, (5) 3.6, (6) 6. Кривая (5) построена для параметра m , полученного из эксперимента (приведена отдельно на вставке). AA' – переключение поля директора при увеличении мощности, $B'B$ – при уменьшении мощности.

где γ_1 – коэффициент вязкости, ψ – угол поворота директора, t – время, K – постоянная Франка, y – продольная координата, $\Delta \varepsilon_{ac}$ – низкочастотная диэлектрическая анизотропия, U_0 – амплитуда поля, L – толщина кристалла, $\Delta \varepsilon^{(0)} = \Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{eff}^{(0)}$, $m = -\Delta \varepsilon_{eff}^{(1)} / \Delta \varepsilon^{(0)}$ – параметр, характеризующий обратную связь, A – амплитуда световой волны, β – угол преломления. Стационарное решение этого уравнения при наличии обратной связи ($m \neq 0$) может

иметь область, где возможны два стационарных положения директора (то есть, бистабильность, рис. 9). Расчёт бистабильных переходов правильно описывает результаты экспериментов, некоторые количественные разногласия могут быть связаны с упрощениями модели (например, приближением первой моды при описании продольной деформации поля директора).

В **Заключении** сформулированы выводы диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что при самовоздействии светового пучка в нематических жидких кристаллах в присутствии постоянного электрического поля в дальней зоне дифракции формируется абберационная картина, отличающаяся от обычно наблюдаемой аксиально-симметричной системы колец. Картина сильно асим-

метрична и вытянута в направлении, параллельном плоскости падения света; форма картины не зависит от поляризации света.

На основании свойств самовоздействия можно заключить, что оно обусловлено поверхностным фоторефрактивным эффектом, то есть деформацией директора в поле зарядов, перераспределяемых светом на границах НЖК. В прозрачных НЖК величина оптической нелинейности при фоторефрактивном эффекте более чем на порядок превосходит ориентационную нелинейность. Соответствующий коэффициент нелинейности составляет $n_2 \approx 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{Вт}$ (для $\lambda = 458 \text{ нм}$).

2. Исследования фототока в ячейках НЖК различной структуры подтверждают воздействие света на поверхностный электрический заряд. При приложении постоянного поля происходит формирование экранирующего слоя зарядов, препятствующего проникновению поля в объём НЖК. Под действием света происходит снятие экранирования, преимущественно на аноде. Поляризация света не влияет на эффективность снятия экранирования.

3. Изучено самовоздействие света в НЖК, находящихся под действием постоянного электрического поля, для различных легирующих красителей и ориентирующих поверхностей. Во всех исследованных образцах проявлялся поверхностный фоторефрактивный эффект. Действие легирующих НЖК добавок, а также тип ориентанта, изменяют эффективность самовоздействия, позволяя усиливать нелинейность более чем на порядок.

4. Построена теоретическая модель абберационного самовоздействия светового пучка в НЖК при поверхностном фоторефрактивном эффекте. Рассчитаны деформация поля директора, трансформация волнового фронта, каустики и распределение интенсивности в дальней зоне дифракции. Результаты расчётов согласуются с экспериментом. Вид абберационной картины соответствует генерации оптической катастрофы "гиперболическая омбилика".

5. Самовоздействие светового пучка в планарном НЖК, легированном стильбеновым красителем, приводит к формированию асимметричной абберационной картины в виде системы полос, имеющей ориентационную природу. Деформация директора зависит от поляризации света, но наблюдается и для обыкновенно поляризованной волны. Свойства самовоздействия позволяют

предположить, что оно связано с объёмным фоторефрактивным эффектом, то есть поворотом директора в поле зарядов, индуцированных в объёме НЖК под действием света.

6. Исследована оптическая ориентация в нематическом жидком кристалле с примесью дендримера, находящемся под воздействием светового и низкочастотного электрического полей. Переход Фредерикса второго рода в низкочастотном электрическом поле превращается в переход первого рода под действием достаточно сильного светового поля. Переход сопровождается бистабильностью поля директора. Ширина области бистабильности возрастает с увеличением интенсивности световой волны, вплоть до деформации поля директора, сохраняющейся при отключении низкочастотного поля.

Впервые наблюдался переход Фредерикса первого рода в поле линейно поляризованной световой волны без дополнительных внешних полей. При этом относительная ширина области бистабильности составляет 0.4, что на порядок превышает соответствующие значения для светоиндуцированных переходов, наблюдавшихся в прозрачных НЖК в присутствии дополнительных полей. Положение и ширина области бистабильности могут перестраиваться внешним низкочастотным полем.

Проведены расчёты ориентационных переходов в НЖК с примесью дендримера, основанные на учете зависимости фактора усиления нелинейности от угла между директором и световым полем. Результаты расчётов согласуются с экспериментом.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Будаговский И.А., Золотко А.С., Китаева В.Ф., Смаев М.П. “Взаимодействие света с нематическими жидкими кристаллами, содержащих азокси- и азомолекулы”. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, с. 26-38 (2004).
2. Будаговский И.А., Золотко 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, № 3, с. 24 – 34 (2006).

3. 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.* v. 453, pp. 71-82 (2006).
4. 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.* v. 454, pp. 407/[809] - 414/[816] (2006).
5. Budagovsky I.A., Ochkin V.N., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., and Barnik M.I. "Asymmetric aberrational patterns at light beam self-action in nematic liquid crystals", *Proceedings of SPIE*, v. 6729, 67293E (2007).
6. Zolot'ko A.S., Budagovsky I.A., Smayev M.P., and Barnik M.I. "Asymmetric aberration pattern at light-beam self-action in NLC doped with stilbene dye", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, v. 488, pp. 11-22 (2008).
7. Будаговский И.А., Золотько А.С., Лобанов А.Н., Смаев М.П., Цховребов А.М., Аверюшкин А.С., Барник М.И. "Исследование фототока в жидкокристаллических ячейках, обнаруживающих фоторефрактивный эффект", *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 2, с. 31-41 (2010).
8. Будаговский И.А., Золотько А.С., Смаев М.П., Барник М.И., "Самовоздействие светового пучка в нематических жидких кристаллах в присутствии постоянного электрического поля", *ЖЭТФ*, т. 138, вып. 1(7) с. 150-161 (2010).
9. Бабаян Э.А., Будаговский И.А., Золотько 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*, № 8, с. 8-13 (2010).
10. Будаговский И.А., Золотько А.С., Смаев М.П., Барник М.И. "Нелинейнооптические эффекты, индуцированные стильбеновым красителем в нематическом жидком кристалле", *препринт ФИАН № 20*, 26 с., М., (2006).
11. Будаговский И.А., Золотько А.С., Смаев М.П., Барник М.И. "Аберрационная картина самовоздействия светового пучка, обусловленного фоторефрактивным эффектом в НЖК", *препринт ФИАН № 17*, М., 38 с. (2009).
12. Бабаян Э.А., Будаговский И.А., Золотько А.С., Смаев М.П., Швецов С.А., Бойко Н.И., Барник М.И., "Ориентационные переходы первого рода в НЖК с примесью дендримера", *препринт ФИАН № 11*, М., 35 с. (2010).
13. Budagovsky I.A., Zolot'ko A.S., Kitaeva V.F., Smayev M.P. "Self-action of light in nematic liquid crystals containing azo- and azoxymolecules", in *ICONO/LAT 2005 Technical Digest on CD-ROM* (St.Peterburg, Russia, 2005) IThS46.
14. Budagovsky I.A., Zolot'ko A.S., Ochkin V.N., Smayev M.P., and Barnik M.I. "Influence of dc electric field on light beam self-action in nematic liquid crystals", *VI-ая Международная конференция Лазерная физика и оптические технологии*, Гродно, Республика Беларусь, Материалы, Часть 2, с. 110 – 111 (2006).

15. Budagovsky I.A., Smayev M.P., Zolot'ko A.S. "Simulation of the light beam self-action in NLCs under DC electric field", The 22nd International Liquid Crystal Conference, Jeju, Korea, Abstracts I, p. 163 (2008).
16. Zolot'ko A.S., Budagovsky I.A., Ochkin V.N., Smayev M.P., Barnik M.I. "Characteristic features of a light beam self-action in NLCs under DC field", 2nd International Workshop on Liquid Crystals for Photonics, Cambridge, UK, Abstracts, pp. 213-214 (2008).
17. Budagovsky I.A., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Barnik M.I. "Calculation of the far-field diffraction pattern for a light beam passed through NLCs under dc electric field", 13th International Topical Meeting on the Optics of Liquid Crystals (OLC'09), Erice, Italy, Book of Abstracts, p. P69 (2009).
18. Будаговский И.А., Золотко А.С., Смаев М.П., Барник М.И. "Влияние постоянного внешнего поля на абберационное самовоздействие света в прозрачных НЖК", 3-я Высшая лазерная школа "Современные проблемы лазерной физики", Программа и аннотации докладов, с. 9 (2009).
19. Будаговский И.А., Золотко А.С., Лобанов А.Н., Смаев М.П., Цховребов А.М., Аверюшкин А.С., Барник М.И. "Исследование фототока в жидкокристаллических ячейках", 3-я Высшая лазерная школа "Современные проблемы лазерной физики", Программа и аннотации докладов, с. 25 (2009).
20. Бабаян Э.А., Будаговский И.А., Золотко А.С., Смаев М.П., Швецов С.А., Бойко Н.И., Барник М.И. "Оптическая нелинейность, индуцированная карбосилановыми содендимерами в нематической матрице", 5-ая Всероссийская Каргинская конференция "Полимеры - 2010", Сборник тезисов, с. 828-1 (2010).
21. Budagovsky I.A., Ochkin V.N., Shvetsov S.A., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Boiko N.I., and Barnik M.I. "Orientational interaction of light beam with NLC doped with absorbing dendrimers of different generations", The 23rd International Liquid Crystal Conference, Krakow, Poland, Abstract Book, p. 813 (2010).
22. Budagovsky I.A., Lobanov A.N., Ochkin V.N., Smayev M.P., Tskhovrebov A.M., Zolot'ko A.S., Averyushkin A.S., and Barnik M.I. "Photocurrent studies of NLC exhibiting photorefractive effect in a light beam", The 23rd International Liquid Crystal Conference, Krakow, Poland, Abstract Book, p. 814 (2010).
23. Budagovsky I.A., Shvetsov S.A., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Boiko N.I., Barnik M.I. "Orientational optical nonlinearity induced by photochromic carbosilane codendrimers in nematic liquid crystals", in ICONO/LAT 2010 Technical Digest on CD-ROM (Kazan, Russia, 2010) IMA6.
24. Budagovsky I.A., Zolot'ko A.S., Lobanov A.N., Smayev M.P., Tskhovrebov A.M., Averyushkin A.S., and Barnik M.I. "Experimental study of photocurrent in transparent NLC under DC field", in ICONO/LAT 2010 Technical Digest on CD-ROM (Kazan, Russia, 2010) ITuQ34.
25. Budagovsky I.A., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., "Hyperbolic umbilic catastrophe at light self-action in NLC subjected to DC field ", in ICONO/LAT 2010 Technical Digest on CD-ROM (Kazan, Russia, 2010) IThD3.