

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

---

На правах рукописи  
УДК [535:530.182]:532.783

Смаев Михаил Петрович

**ОРИЕНТАЦИОННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ,  
ИНДУЦИРОВАННАЯ ПОЛИМЕРАМИ И КРАСИТЕЛЯМИ В  
НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

Специальность 01.04.05 – оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Очкин Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
Яблонский Сергей Валерьевич  
кандидат физико-математических наук,  
Чайков Леонид Леонидович

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

Защита диссертации состоится «25» декабря 2006 года в \_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного совета К002.023.02 при 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 «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 года

Ученый секретарь  
Диссертационного совета К002.023.02,  
доктор физико-математических наук

В.А. Чуенков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Нематические жидкие кристаллы (НЖК) весьма восприимчивы к внешним воздействиям. Так, световая волна, проходя через НЖК, может вызывать переориентацию директора (единичного вектора, характеризующего направление оптической оси). Поворот директора изменяет показатель преломления необыкновенной волны. Проявляющиеся при этом нелинейности называются ориентационными.

Переориентация молекул в объеме прозрачных НЖК, вызвана прямым силовым воздействием светового поля на диполи, индуцированные этим же полем. Соответствующая “гигантская” ориентационная оптическая нелинейность на девять порядков превышает керровскую нелинейность обычных жидкостей. В прозрачных НЖК директор всегда поворачивается параллельно световому полю и, соответственно, показатель преломления возрастает.

Добавление в нематическую матрицу небольшого количества ( $\sim 1\%$  по весу) молекул красителей значительно повышает эффективность ориентационного воздействия света на НЖК (нелинейность может возрасти еще на два порядка). При этом директор может поворачиваться как параллельно световому полю, так и перпендикулярно к нему (в последнем случае показатель преломления уменьшается). Физические механизмы, ответственные за переориентацию директора поглощающих НЖК являются в настоящее время предметом исследований.

Ориентационные нелинейности позволяют наблюдать и исследовать разнообразные эффекты (например, абберационное самовоздействие световых пучков, обращение волнового фронта, формирование и взаимодействие оптических солитонов, возникновение периодических и стохастических колебаний поля директора, оптические бистабильности и т.д.) при весьма малых значениях плотности мощности световой волны.

В настоящее время неясно, насколько большой может быть ориентационная оптическая нелинейность поглощающих жидкокристаллических систем. В связи с этим представляется актуальным поиск и исследование ориентационных нелинейностей новых поглощающих жидкокристаллических систем.

До сих пор эта нелинейность исследовалась только для нематических матриц, легированных молекулами низкомолекулярных красителей. Весьма интересными объектами для исследования ориентационной нелинейности являются смеси НЖК с высокомолекулярными соединениями. Молекулы полимеров по ряду свойств (коэффициенты вращательной диффузии, пространственная локализация поглощающих фрагментов), существенно отличаются от молекул низкомолекулярных красителей, что может существенно повлиять на величину момента вращающего директора.

Большие нелинейности поглощающих НЖК позволяют, в частности, исследовать нелинейнооптические явления в широких пучках (этого сложно добиться в прозрачных матрицах, так как требуются слишком большие плотности мощности). Данное обстоятельство является существенным, поскольку пространственная ограниченность светового пучка сильно влияет на его взаимодействие с полем директора НЖК (например, поперечный размер светового пучка изменяет пороговое электрическое поле светоиндуцированного перехода Фредерикса и характер деформации поля директора).

### **Цели диссертационной работы**

- Поиск и изучение новых композитных поглощающих жидкокристаллических систем, обнаруживающих ориентационную оптическую нелинейность.
- Исследование ориентационного взаимодействия широких световых пучков с НЖК в присутствии внешнего электрического поля.

## **Научная новизна работы**

- Впервые исследовано ориентационное взаимодействие света с поглощающими жидкокристаллическими системами с примесью поглощающих полимеров и обнаружена индуцированная ими ориентационная нелинейность.
- Обнаружен и исследован новый тип ориентационных фазовых переходов первого рода, возникающих при изменении мощности светового пучка, проходящего через планарно ориентированный НЖК, находящийся под воздействием пространственно однородного низкочастотного поля. Разработана теоретическая модель, описывающая взаимодействие светового пучка с НЖК, в присутствии низкочастотного электрического поля

## **Практическая ценность работы**

Обнаруженная и исследованная в настоящей работе светоиндуцированная переориентация директора в нематических жидких кристаллах с примесью полимеров приводит к чрезвычайно высоким оптическим нелинейностям (нелинейная восприимчивость  $\chi^{(3)} \sim 1 \text{ см}^3/\text{эрг}$ ). Полученные результаты могут быть полезны для фундаментальных исследований воздействия света на вещество и, в частности, на биологические ткани. Результаты работы могут быть использованы в схемах оптической модуляции и для исследования нелинейных волновых явлений.

## **Защищаемые положения:**

1. Наблюдение и исследование ориентационной оптической нелинейности, индуцированной в нематической фазе жидких кристаллов примесями полимеров.
2. Величина ориентационной нелинейности, индуцируемой в нематической матрице гребнеобразным полимером, содержащим поглощающие азофрагменты, существенно больше, чем величина нелинейности, индуцируемой азокрасителем, являющимся аналогом азофрагмента полимера. При определенных геомет-

риях взаимодействия светового поля и директора НЖК знаки светоиндуцированного изменения показателя преломления для этих жидкокристаллических систем различны.

3. В планарно ориентированном нематическом жидком кристалле, находящемся под воздействием однородного низкочастотного поля наблюдаются ориентационным фазовые переходы первого рода при изменении мощности наклонно падающего светового пучка.

4. Теоретическая модель взаимодействия планарно ориентированного нематического жидкого кристалла с наклонно падающим световым пучком и однородным низкочастотным полем.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, список которых приводится в конце автореферата.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на Научной сессии МИФИ-2003 (Москва, 2003 г.), Высшей лазерной школе “Современные проблемы лазерной физики” (Московская область, 2004 г.), 10-й Международной конференции по нелинейной оптике жидких и фоторефрактивных кристаллов (Алушта, Украина, 2004 г.), Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Санкт-Петербург, 2005 г.), 11-й Международной конференции по оптике жидких кристаллов (Клеарвотер, Флорида, США, 2005 г.), 6-й Международной конференции “Лазерная физика и оптические технологии” (Гродно, Республика Беларусь, 2006 г.).

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

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 139 наименований. Общий объем работы составляет 114 страниц, включающих 39 рисунков и 2 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели, научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения, которые выносятся на защиту, описана структура работы.

В **первой главе диссертации** представлен обзор работ о взаимодействии НЖК со световыми и низкочастотными полями. Глава состоит из четырех параграфов и резюме.

В **первом параграфе** описываются основные типы жидких кристаллов, их свойства, а также особенности взаимодействия с низкочастотными электрическим и магнитным полями.

Во **втором параграфе** представлены свойства ориентационной оптической нелинейности прозрачных НЖК при облучении их поляризованным светом. Эта нелинейность обусловлена вращающим моментом, действующим со стороны электрического поля световой волны

$$\Gamma_{\text{light}} = \frac{\Delta\varepsilon |A|^2}{8\pi} (\mathbf{ne})[\mathbf{n} \times \mathbf{e}],$$

где  $\Delta\varepsilon$  – анизотропия диэлектрической проницаемости на световой частоте ( $\Delta\varepsilon > 0$ ),  $A$  и  $\mathbf{e}$  – комплексная амплитуда и вектор поляризации световой волны, соответственно,  $\mathbf{n}$  – директор НЖК.

В **третьем параграфе** рассматривается светоиндуцированная ориентационная нелинейность нематических жидких кристаллов, возникающая при добавлении к ним поглощающих свет добавок. Приведен обзор работ посвященных ме-

ханизмам переориентации директора в поглощающих жидкокристаллических системах.

Момент сил  $\Gamma_{\text{abs}}$ , поворачивающий директор поглощающих жидкокристаллических систем, определяется выражением

$$\Gamma_{\text{abs}} = \frac{\Delta\epsilon_{\text{eff}} |A|^2}{8\pi} (\mathbf{ne})[\mathbf{n} \times \mathbf{e}],$$

отличающемся от выражения для прозрачного НЖК только заменой истинной оптической анизотропии  $\Delta\epsilon$  на параметр  $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$ . Параметр  $\Delta\epsilon_{\text{eff}}$  может быть как положительным (это соответствует увеличению показателя преломления необыкновенной волны (положительная нелинейность)), так и отрицательным (при этом показатель преломления уменьшается (отрицательная нелинейность)).

**Четвертый параграф** посвящен обзору нелинейнооптических эффектов, которые можно наблюдать благодаря ориентационной нелинейности НЖК, в частности, описаны явления оптической бистабильности поля директора. Кроме того, описываются возможные применения ориентационной нелинейности.

Во **второй главе диссертации** описываются используемые экспериментальные методы исследования ориентационной нелинейности НЖК и свойства жидкокристаллических образцов. Глава состоит из четырех параграфов и резюме.

В **первом параграфе** представлена экспериментальная методика исследования взаимодействия света с НЖК, основанная на абберационном самовоздействии световых пучков. Она предполагает изучение свойств кольцевой абберационной картины, возникающей при прохождении светового пучка через объём нематика. По временам развития и релаксации кольцевой картины можно отличить ориентационную нелинейность НЖК от тепловой, по числу колец – определить угол светоиндуцированного поворота директора, по характеру трансформации абберационной картины при поперечном сдвиге кюветы относительно пучка – определить направление поворота директора (знак нелинейности).

Во **втором параграфе** рассмотрены способы определения фактора увеличения нелинейности ( $\eta = \Delta\epsilon_{\text{eff}}/\Delta\epsilon$ ) в случаях положительной и отрицательной нелинейностей. В качестве критерия эффективности индуцирования ориентационной оптической нелинейности поглощающими добавками предлагается использовать параметр  $\eta_\alpha = \eta/(\alpha_{\parallel} + 2\alpha_{\perp})$ , где  $\alpha_{\parallel}$  и  $\alpha_{\perp}$  – коэффициенты поглощения необыкновенной и обыкновенной волн.

В **третьем параграфе** описана экспериментальная установка. Световой пучок лазера непрерывного излучения фокусировался в НЖК длиннофокусной линзой. Плоскость жидкокристаллического слоя была вертикальна, невозмущенный директор  $\mathbf{n}_0$  лежал в горизонтальной плоскости. На экране, помещенном за кристаллом, наблюдалась система абберационных колец, возникавшая вследствие светоиндуцированной переориентации директора. Для поворота плоскости поляризации светового пучка использовался двойной ромб Френеля. Угол падения света на кристалл  $\alpha$  мог изменяться вращением кюветы с НЖК вокруг вертикальной оси. Низкочастотное электрическое поле прикладывалось к электродам из ITO или  $\text{SnO}_2$ , нанесенным на внутренние стенки плоской кюветы, в которой находился жидкий кристалл.

В **четвертом параграфе** содержится характеристика исследованных в настоящей работе нематических жидких кристаллов ЖКМ – 1277, ЖКМ – 1282, 5ЦБ. Приводятся свойства используемых поглощающих добавок:

- $\pi$ -сопряженного полимера МЕН-PPV;
- гребнеобразного полимера П11, содержащего в качестве боковых фрагментов мезогенные молекулы и молекулы азосоединений;
- азосоединения CAZO, аналогичного по строению азофрагментам гребнеобразного полимера П11;
- азокрасителя КД-1.

**Третья глава диссертации** посвящена исследованиям взаимодействия света с нематической матрицей, содержащей примесь полимера МЕН-PPV. Глава состоит из двух параграфов и резюме.

В первом параграфе описаны результаты экспериментального исследования ориентационной оптической нелинейности кристаллов, легированных молекулами МЕН-PPV.

Времена развития и релаксации абберационной картины, наблюдавшейся при облучении как гомеотропного, так и планарного образцов, характерны для ориентационных процессов. Поведение абберационной картины при повороте плоскости поляризации (схлопывание колец при переходе от необыкновенной волны к обыкновенной) и во внешнем низкочастотном поле (подавление нелинейности в случае гомеотропного кристалла и немонотонная зависимость  $N$  от  $U$  для планарного) также доказывают ориентационную природу нелинейности. Зависимость стационарного числа абберационных колец  $N$  от мощности светового пучка  $P$  представлена на рис. 1.

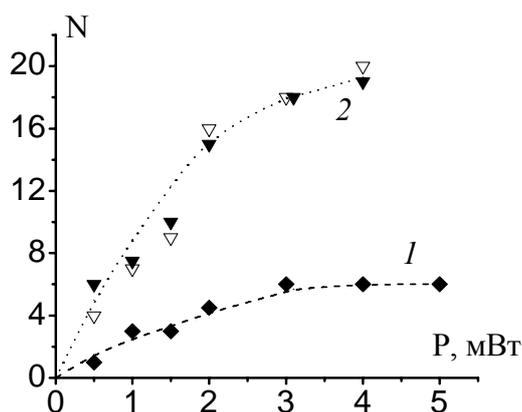


Рис. 1. Экспериментальные зависимости числа абберационных колец самодифракции  $N$  от мощности светового пучка  $P$  для гомеотропного (кривая 1) и планарного (кривая 2,  $\alpha = + 50^\circ$  ( $\nabla$ ) и  $- 50^\circ$  ( $\blacktriangledown$ )) образцов 5ЦБ + 0.16% МЕН-PPV ( $\lambda = 515$  нм).

Определение знака нелинейности (для обоих образцов) выявило отрицательную нелинейность в сине-зеленой области спектра и положительную нелинейность на красной линии  $\lambda = 647$  нм. Из сравнения результатов, полученных при наклонном падении света ( $\lambda = 515$  нм) на чистую гомеотропно ориентированную матрицу и планарную матрицу, легированную молекулами МЕН-PPV, была оценена эффективность ориентирующего воздействия света. Параметр  $\eta_\alpha$ ,

характеризующий эту эффективность, для НЖК 5ЦБ + 0.16% МЕН-PPV составляет  $\sim 0.5$ .

**Второй параграф** посвящен обсуждению экспериментальных результатов.

Отрицательная нелинейность в сине-зеленой области спектра доказывает вклад МЕН-PPV в процессы, приводящие к переориентации директора. На красной линии возбуждения полимера не происходило, и наблюдавшаяся положительная нелинейность соответствует переориентации директора по механизму, характерному для прозрачных НЖК.

Тот факт, что при облучении планарного НЖК наблюдается большее число колец, чем для гомеотропного (рис. 1) объясняется тем, что в первом случае (планарный кристалл) возможный угол переориентации директора больше, чем соответствующий угол переориентации в случае гомеотропного образца.

По данным, полученным из исследования дихроизма поглощения ( $\alpha_{\parallel} = 70 \text{ см}^{-1}$  и  $\alpha_{\perp} = 45 \text{ см}^{-1}$ ), проведена оценка упорядоченности полимерных сегментов нематической матрицей. Установлено, что параметр порядка поглощающих сегментов невелик ( $S_a \sim 0.15$ ), что благоприятно для образования ориентационно-несимметричного распределения возбуждения полимерных фрагментов и, следовательно, для проявления ориентационных эффектов.

В **четвертой главе диссертации** исследуются нелинейнооптические свойства НЖК, содержащих примеси гребнеобразного полимера или азосоединения, являющегося аналогом поглощающих азофрагментов полимера. Глава состоит из четырех параграфов и резюме.

В **первом параграфе** приводятся результаты исследований переориентации директора планарно ориентированной нематической матрицы ЖКМ-1277, легированной гребнеобразным полимером П11. Полимер содержал боковые фрагменты двух типов – цианобифенильные фрагменты и азофрагменты (содержащие двойную связь  $-N=N-$ ). Присутствие цианобифенильных фрагментов обеспечивало хорошую растворимость полимера в нематической матрице. Поглощающие свет азофрагменты должны были индуцировать ориентационные нелинейности.

Эксперимент показал что, как и в случае МЕН-PPV, добавление П11 к нематической матрице, приводит к возникновению отрицательной нелинейности, ориентационную природу которой доказывают времена формирования и релаксации абберационной картины, а также её поведение при повороте плоскости поляризации падающего излучения и при приложении внешнего низкочастотного электрического поля.

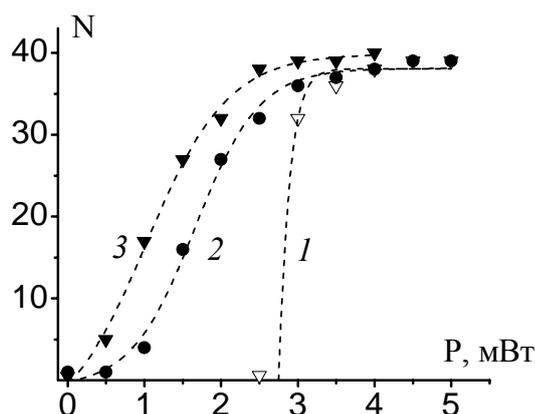


Рис. 2. Зависимость числа абберационных колец самодефокусировки  $N$  от мощности светового пучка  $P$ . Планарный образец ЖКМ – 1277 + 0.5% П11 ( $\lambda = 473$  нм; (1) –  $\alpha = 0^\circ$ , (2) –  $\alpha = 20^\circ$ , (3) –  $\alpha = 40^\circ$ ).

Зависимость числа абберационных колец от мощности светового пучка представлена на рис. 2. Наблюдаемые закономерности (пороговый характер переориентации директора при нормальном падении света и насыщение переориентации) характерны для светоиндуцированного перехода Фредерикса.

При повороте плоскости поляризации (от необыкновенной волны к обыкновенной) происходило схлопывание абберационной картины. Приложение внешнего низкочастотного электрического поля сначала увеличивало  $N$  до некоторого пикового значения  $N_{\max}$ , а потом схлопывало абберационную картину (рис. 3а).

Исследование спектральной зависимости пороговой мощности перехода Фредерикса  $P_{th}$  показало, что с увеличением длины волны излучения (от  $\lambda = 458$  нм до  $\lambda = 532$  нм) происходит уменьшение  $P_{th}$ . Этот результат хорошо согласуется со спектром поглощения полимера. Изменение концентрации молекул П11,

также приводило к изменению  $P_{th}$ . Например, уменьшение концентрации полимера с 0.5% до 0.1% приводит к увеличению пороговой мощности в 4 раза.

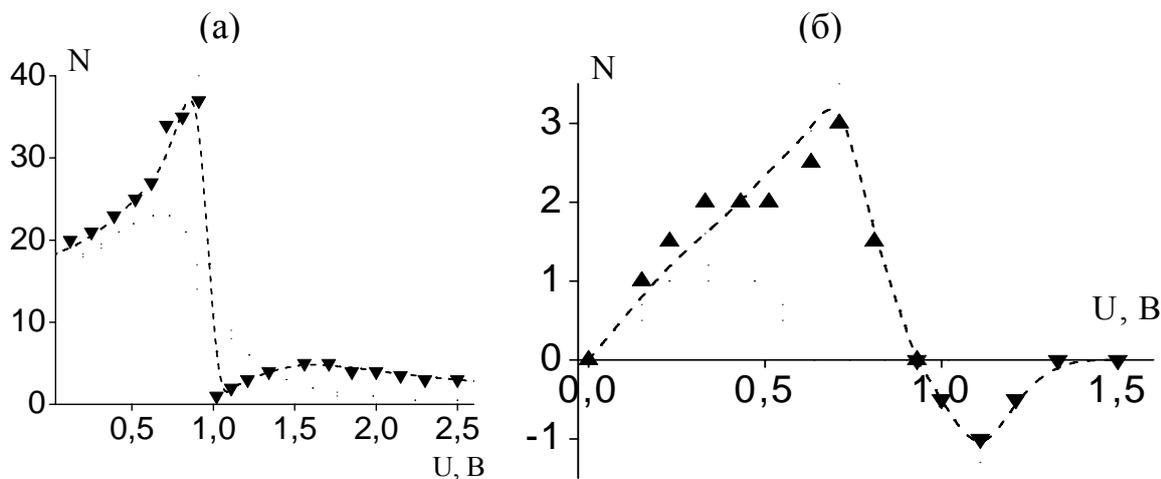


Рис. 3. Зависимости числа  $N$  абберационных колец самодефокусировки ( $\blacktriangledown$ ) и самофокусировки ( $\blacktriangle$ ) от низкочастотного ( $\nu = 3$  кГц) напряжения  $U$  для планарно ориентированных образцов (а) ЖКМ – 1277 + 0.5% П11 и (б) ЖКМ – 1277 + 0.3% CAZO ( $\lambda = 473$  нм,  $P = 1$  мВт,  $\alpha = -40^\circ$ ). На рис. (б) числу колец самодефокусировки приписан отрицательный знак.

Для измерения времен релаксации директора с помощью видеокамеры, подключенной к ПК, регистрировалась временная зависимость интенсивности  $I(t)$  зондирующего светового пучка, прошедшего через НЖК, помещенный между скрещенными поляризаторами (каждый из которых пропускал свет, поляризованный под углом  $45^\circ$  к плоскости переориентации директора). Было установлено, что добавление к чистому НЖК полимера П11 приводит к увеличению вращательной вязкости, однако, это увеличение незначительно, в 1.1 и 1.26 раз для концентраций полимера 0.1% и 0.5%, соответственно.

Исследования переориентации директора гомеотропных кристаллов, легированных гребнеобразным полимером показали, что, как и для планарных образцов, добавление П11 индуцирует отрицательную ориентационную нелинейность. Увеличение концентрации полимера и уменьшение длины волны падающего света приводит к увеличению нелинейности. Приложение низкочастотного поля подавляет ориентационную нелинейность (восстанавливается исходная гомеотропная ориентация образца).

В этом же параграфе проведено сравнение нелинейностей, обусловленных присутствием П11, с нелинейностями, полученными ранее для других композитных систем. Анализ показал, что эффективность ориентирующего воздействия полимера П11 отнесенная к поглощению (например, на длине волны  $\lambda = 473$  нм для кристалла ЖКМ-1277 + 0.1% П11 величина параметра  $\eta_\alpha = -2.3$ ), превышает известные из литературы значения для низкомолекулярных красителей.

Во **втором параграфе** исследована ориентационная нелинейность, индуцируемая азомолекулами CAZO, аналогичными по строению поглощающим азофрагментам полимера П11. Обнаружено, что в гомеотропном образце азомолекулы индуцируют отрицательную нелинейность, величина которой на порядок меньше чем величина нелинейности, обусловленная наличием молекул П11. Однако добавление CAZO в планарный кристалл приводит к возникновению положительной нелинейности (что принципиально отличается от результатов с полимером П11).

Зависимости самовоздействия света в планарном образце, содержащем CAZO, от его поляризации и внешнего напряжения также принципиально отличаются от зависимостей для нематической матрицы с добавкой полимера. В обоих случаях – и при изменении угла поворота плоскости поляризации и при изменении напряжения (рис. 3б) происходила смена знака самовоздействия с положительного на отрицательный.

В **третьем параграфе** анализируются экспериментальные результаты для НЖК с примесями полимера и с примесями свободных азомолекул.

Наблюдавшаяся знакопеременность нелинейности НЖК при добавлении молекул CAZO полностью аналогична знакопеременности жидкокристаллических систем, содержащих низкомолекулярные азокрасители, и объясняется фотоизомеризацией молекул CAZO.

Объяснение различия в величинах нелинейностей, индуцируемых присутствием П11 и CAZO, приведенное в настоящей работе, основано на различии в симметрии расположения молекул нематической матрицы по отношению к сво-

бодному и к связанному азофрагментам – в первом случае молекулы матрицы окружают азофрагмент со всех сторон, а во втором случае этому мешает развязка, соединяющая азофрагмент с алкильной цепью.

**В пятой главе диссертации** исследованы ориентационные фазовые переходы в планарном НЖК под действием наклонно падающего ограниченного светового пучка и низкочастотного электрического поля, перпендикулярного подложкам кристалла. Глава состоит из четырех параграфов и резюме.

**В первом параграфе** качественно обсуждается возникновение ориентационных фазовых переходов первого рода при одновременном воздействии на планарный кристалл светового и низкочастотного электрических полей. Причинами этих переходов являются пространственная ограниченность светового пучка и наклонное падение света на кристалл.

В планарном НЖК под действием внешнего низкочастотного электрического поля реализуется одно из двух возможных состояний поля директора (поворот директора к полю может происходить либо по, либо против часовой стрелки). Воздействие наклонно падающего светового пучка позволяет, при увеличении его мощности, осуществлять переключение между этими состояниями поля директора. Пространственная ограниченность светового пучка обуславливает обратное переключение, происходящее при уменьшении мощности пучка. При этом мощность, при которой происходит обратное переключение, зависит от ширины пучка. Соответственно, рассматриваемые светоиндуцированные переходы будут характеризоваться бистабильностью поля директора.

Аналогичные явления (переходы первого рода и бистабильность поля директора) можно наблюдать и при изменении низкочастотного напряжения (при постоянной мощности световой волны).

**Во втором параграфе** приведены результаты экспериментальных исследований нового типа ориентационных фазовых переходов, возникающих при изменении мощности светового пучка (при постоянной величине прикладываемого к кристаллу низкочастотного напряжения). В экспериментах использовалась

планарно ориентированная нематическая матрица ЖКМ-1282, легированная диазокрасителем КД-1 (0.025% по весу). Выбор легирующей добавки обусловлен тем, что положительная ориентационная нелинейность НЖК с КД-1 более чем на порядок превышает нелинейность нелегированной матрицы.

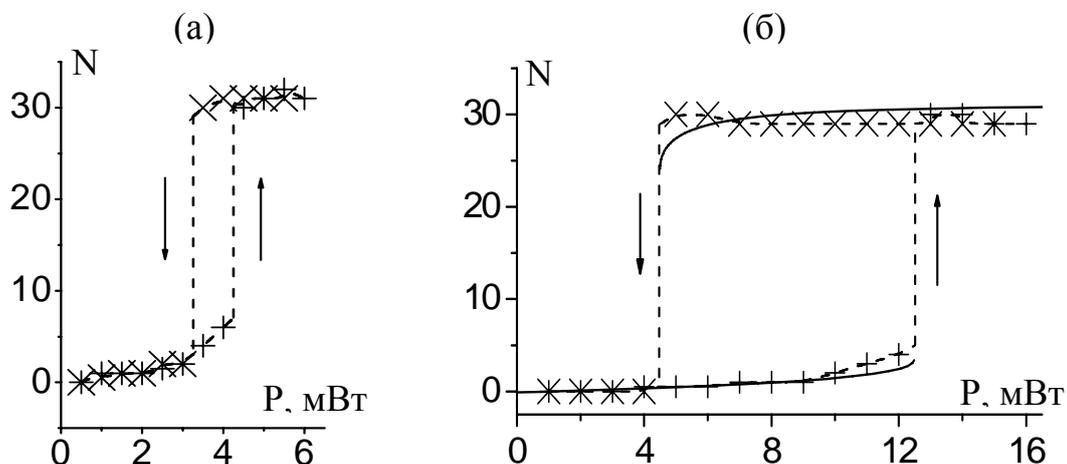


Рис. 4. Зависимость числа абберационных колец самофокусировки в световом пучке, прошедшем планарный образец ЖКМ-1282 + 0.025% КД-1 ( $\lambda = 532$  нм,  $\alpha = 52^\circ$ ), полученная при увеличении (+) и уменьшении ( $\times$ ) мощности пучка; а)  $\Delta = 0$  см,  $U = 1.45$  В; б)  $\Delta = 16$  см,  $U = 1.45$  В, сплошная линия – теоретический расчет.

На рис. 4 приведены характерные зависимости числа абберационных колец  $N$  от мощности световой волны  $P$ . Эксперименты показали, что ширина области бистабильности зависит от поперечных размеров светового пучка. Например, при напряжении  $U = 1.45$  В сдвиг кюветы из фокуса (рис. 4а) в расходящийся пучок на расстояние  $\Delta = 16$  см (рис. 4б) приводит к увеличению области бистабильности от 1 мВт до 8 мВт.

При постоянной ширине светового пучка величина области бистабильности возрастает при увеличении прикладываемого к кристаллу напряжения. Так, при  $\Delta = 16$  см увеличение напряжения от  $U = 1.2$  В до  $U = 1.45$  В ведет к увеличению области бистабильности с 1 мВт до 8 мВт. Уменьшение прикладываемого к кристаллу напряжения приводит к исчезновению бистабильности (при  $\Delta = 16$  см бистабильность исчезала при  $U = 1.1$  В).

**В третьем параграфе** описываются результаты экспериментальных исследований фазовых переходов, возникающих при изменении величины низкочастотного напряжения (при постоянной мощности световой волны).

Увеличение напряжения  $U$  ведет к росту числа абберационных колец  $N$ . При достижении некоторого значения  $U_H \sim 1.5$  В абберационная картина схлопывается (на экране наблюдается лишь пятно от прошедшего НЖК пучка). При уменьшении  $U$  кольцевая картина возникает вновь, и при некотором значении напряжения  $U_L$  ( $U_L \sim 1.3 - 1.4$  В) количество колец скачком возрастает до того значения, которое уже наблюдалось при данном  $U$ .

Исследования показали, что увеличение поперечных размеров пучка (сдвиг кюветы из фокуса в расходящийся пучок) и увеличение мощности световой волны приводят к увеличению области бистабильности.

**В четвертом параграфе** приведена теоретическая модель ориентационных фазовых переходов первого рода.

Из условия равновесия действующих на директор моментов сил, ограничиваясь первыми пространственными гармониками функций, описывающих поворот директора, и учитывая поперечную неоднородность поля директора, было получено уравнение для временного изменения угла  $\psi_m$  поворота директора на оси пучка:

$$\dot{\psi}_m = -\psi_m + \delta_{el} J_1(2\psi_m) - \eta \tilde{H} - g(\psi_m - \tilde{\psi}_m), \quad (1)$$

где 
$$\tilde{H} = \frac{1}{2} F - F \sin^2 \beta_c + \frac{1}{4} H, \quad F = J_1(2\psi_m) \cos 2\beta + E_1(2\psi_m) \sin 2\beta,$$

$H = J_1(4\psi_m) \cos 4\beta + E_1(4\psi_m) \sin 4\beta$ ,  $\delta_{el}$  - безразмерный квадрат приложенного к НЖК низкочастотного напряжения,  $\eta$  - безразмерная плотность мощности световой волны на оси светового пучка,  $g$  - параметр, характеризующий ширину пучка,  $J_1(x)$  и  $E_1(x)$  - функции Бесселя и Вебера первого порядка,  $\beta$  - угол преломления световой волны падающей на НЖК,  $\beta_c$  - критический угол,  $\tilde{\psi}_m$  - угол поворота директора на периферии пучка.

Был проведен анализ стационарных решений уравнения (1)  $\psi_m$  от параметров  $\eta$  и  $\delta_{el}$ . Показано, эти решения в зависимости от величины параметра  $g$  могут иметь бистабильные решения, причем  $g$ , соответствующему более широкому световому пучку соответствуют более широкие области бистабильности (в предельном случае плоской волны обратный переход отсутствовал вследствие отсутствия поперечной неоднородности поля директора). При изменении  $\eta$  (или  $\delta_{el}$ ) и постоянном значении  $\delta_{el}(\eta)$ , большему значению  $\delta_{el}(\eta)$  соответствовала более широкая область бистабильности, что согласуется с экспериментальными закономерностями.

Теоретическая зависимость числа абберационных колец от мощности светового пучка, полученная в рамках предложенной модели, представлена на рис. 4б сплошной линией. Видно, что теоретическая модель хорошо описывает основные экспериментальные закономерности.

**В заключении** сформулированы выводы диссертационной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Впервые наблюдалась ориентационная оптическая нелинейность, индуцированная в нематической фазе жидких кристаллов примесями полимеров. Установлено, что в нематических матрицах с примесью сопряженного полимера МЕН-PPV или гребнеобразного полимера П11 (содержащего боковые цианобифенильные и азофрагменты) под действием света директор  $\mathbf{n}$ , в отличие от прозрачных нематических матриц, поворачивается перпендикулярно световому полю.
2. Для нематического жидкого кристалла ЖКМ-1277 + 0.1% П11 величина ориентационной оптической нелинейности ( $\lambda = 473$  нм) в 30 раз больше, чем для чистой нематической матрицы. Величина фактора усиления ориентационной оптической нелинейности для нематического жидкого кристалла с примесью гребнеобразного полимера, отнесенная к сумме коэффициентов

поглощения ( $\alpha_{\parallel} + 2\alpha_{\perp}$ ), превышает известные из литературы значения для нематических матриц с примесью низкомолекулярных красителей.

3. Исследована ориентационная нелинейность нематических жидких кристаллов с примесью свободных (не присоединенных к полимерной цепочке) азомолекул, аналогичных по строению азофрагментам полимера. Её величина на порядок меньше, чем нелинейность, индуцированная полимером. При определенных геометриях взаимодействия светового поля и директора связывание азофрагментов с полимерной цепочкой изменяет знак нелинейности. Показано, что возрастание нелинейности при присоединении азомолекул к полимерной цепочке можно объяснить изменением геометрии расположения молекул матрицы относительно азофрагментов.
4. Исследован новый тип обратимых ориентационных переходов первого рода в планарно ориентированном нематическом жидком кристалле, находящемся под воздействием низкочастотного электрического поля, перпендикулярного поверхностям кристалла, и наклонно падающего ограниченного светового пучка. Показано, что такие переходы наблюдаются не только при изменении низкочастотного напряжения  $U$  (при постоянной мощности светового пучка  $P$ ), но и при изменении мощности светового пучка  $P$  ( $U = \text{const}$ ). Установлено, что ширины соответствующих областей бистабильности возрастают при увеличении напряжения  $U$ , мощности  $P$ , и ширины светового пучка. Полученные значения ширины области бистабильности значительно ( $\sim$  на порядок) превышают величины, характерные для ориентационных обратимых переходов при нормальном падении световой волны.
5. Разработана теоретическая модель ориентационных переходов, которая объясняет основные экспериментальные закономерности. Показано, что обратимое переключение между различными состояниями поля директора при ориентационных переходах обусловлено взаимной ориентацией светового и низкочастотного полей, а также пространственной ограниченностью светового пучка.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. 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.
2. 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.
3. Zolot'ko A.S., Averyushkin A.S., Kitaeva V.F., Lobanov A.N., Ochkin V.N., Smayev M.P., Vitukhnovsky A.G., Barnik M.I. *Light-induced director reorientation in NLC doped with high-molecular polymer* // 10th International Conference on Nonlinear Optics of Liquid and Photorefractive Crystals. Alushta. Ukraine. Abstracts, 2004, p. 32; Proc. SPIE, 2005, v. 6023, art. no. 602304.
4. Zolot'ko A.S., Averyushkin A.S., Kitaeva V.F., Lobanov A.N., Ochkin V.N., Smayev M.P., Vitukhnovsky A.G., Barnik M. I. *Orientational light interaction with nematic liquid crystal doped with МЕН-PPV polymer* // Mol. Cryst. Liq. Cryst., 2006, v. 451, pp. 41-52.
5. Будаговский И.А., Золотько А.С., Люханов Н.И., Очкин В.Н., Смаев М.П., Бобровский А.Ю., Шibaев В.П., Барник М.И. *Взаимодействие света с жидкокристаллической системой НЖК – гребнеобразный полимер.* – М., 2006. – 36 с. (препринт ФИАН № 22).
6. Будаговский И.А., Золотько А.С., Люханов Н.И., Очкин В.Н., Смаев М.П., Бобровский А.Ю., Шibaев В.П., Барник М.И. *Нелинейно-оптические свойства жидких кристаллов допированных гребнеобразным полимером с азобензольными мезогенными группами* // Жидкие кристаллы и их практическое использование, 2006, вып. 4 (18), с. 22-39.
7. Смаев М.П., Золотько А.С. *Нелинейно-оптические ориентационные эффекты в НЖК, легированных азокрасителями* // Труды Научной Сессии МИФИ-2003, 2003, т. 4, с. 50.
8. Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Kitaeva V.F., Barnik M.I. *Orientational first-order transitions in NLC under action of light beam and low-frequency electric field* // 10th International Conference on Nonlinear Optics of Liquid and Photorefractive Crystals. Alushta. Ukraine. Abstracts, 2004, p. 30.
9. Zolot'ko A.S., Averyushkin A.S., Kitaeva V.F., Lobanov A.N., Ochkin V.N., Smayev M.P., Vitukhnovsky A.G., Barnik M.I. *Orientational optical nonlinearities of nematic liquid crystals doped with high-molecular МЕН-PPV polymer* // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. St.Peterburg. Russia. Technical Digest on CD-ROM, 2005, IFM39.

10. Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Kitaeva V.F., Barnik M.I. *Orientalional bistability in nematic liquid crystal under low-frequency electric field and light beam* // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. St.Peterburg. Russia. Technical Digest on CD-ROM, 2005, IFM39.
11. Smayev M., Zolot'ko A., Kitaeva V., Barnik M. *Analysis of hysteresis phenomena in planar NLCs affected by light beam* // 11th International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals. Marriott Suites Clearwater Beach on Sand Key. Florida. USA. Book of Abstracts, 2005, p. 161.
12. Zolot'ko A., Averyushkin A., Kitaeva V., Lobanov A., Ochkin V., Smayev M., Vitukhnovsky A., Barnik M. *Nonlinear-optical properties of high-molecular-polymer-doped nematic* // 11th International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystals. Marriott Suites Clearwater Beach on Sand Key. Florida. USA. Book of Abstracts, 2005, p. 168.
13. Budagovsky I.A., Ochkin V.N., Smayev M.P., Zolot'ko A.S., Bobrovsky A.Yu., Shibaev V.P., Barnik M.I. *Nonlinear optical properties of nematic liquid crystals doped with comb-like polymer* // Лазерная физика и оптические технологии. Материалы VI Международной конференции. Гродно. Республика Беларусь, 2006, часть 2, с. 27-28.