

На правах рукописи

Заляпин Николай Васильевич

**МОДУЛЯЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМОГО ИЗМЕНЕНИЯ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ И
СВЕТОРАССЕЯНИЯ В НЕГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Автор:



Москва 2017

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ) и в Физическом институте им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель:

**Андреев Александр
Львович**

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФГБУН
«Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

**Савельев-Трофимов
Андрей Борисович**

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Пасечник Сергей
Вениаминович**

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий проблемной лабораторией
молекулярной акустики ФГБОУ ВПО
«Московский технологический университет»

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»**

Защита диссертации состоится «27» декабря 2017 года в 15 часов 00 минут на
заседании диссертационного совета Д 212.130.05 на базе Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ» по адресу: 115409, Москва,
Каширское ш., д. 31, тел. 8(495)788-56-99 доб. 95-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте:
<http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.130.05,

доктор физ.-мат. наук



Р. С. Стариков

Общая характеристика работы

Жидкие кристаллы используются в электронике как электрооптические материалы для создания устройств отображения и обработки информации благодаря низким управляющим напряжениям и технологичности создания приборов на их основе.

Наиболее широко используемые в настоящее время нематические жидкие кристаллы (НЖК) обеспечивают частоту модуляции света порядка 100 герц.

Время оптического отклика НЖК на приложенное электрическое напряжение составляет единицы миллисекунд и не зависит от знака электрического поля вследствие квадратичной зависимости от поля. После выключения напряжения электрооптическая ячейка возвращается (релаксирует) в исходное состояние под действием упругих сил. Время релаксации не зависит от ранее приложенного напряжения и может составлять до десяти и более миллисекунд. Именно это время ограничивает быстродействие НЖК дисплеев, и поэтому частота смены кадров не превышает 120 герц.

На порядок более быстрым является электрооптический отклик в сегнетоэлектрических жидких кристаллах (СЖК), впервые синтезированных в 1975 году. Тогда было теоретически предсказано новое свойство смектических (слоистых) ЖК, состоящих из хиральных (оптически активных) молекул, - спонтанная поляризация. Она возникает как следствие наклона молекул в смектических слоях в том случае, если молекулы обладают дипольными моментами, перпендикулярными к их длинным осям [1].

Открытие в 1980 году Кларком и Лагерволлом линейного электрооптического эффекта в СЖК позволило получить времена электрооптического отклика порядка нескольких микросекунд при управляющем напряжении порядка нескольких десятков вольт [2]. Кроме того, вследствие взаимодействия внешнего электрического поля со спонтанной поляризацией управляемое изменение направления главной оптической оси СЖК (директора) и

соответственно светопропускания электрооптической ячейки, происходит при каждой смене полярности электрического поля.

Причинами электрооптической модуляции света в СЖК, являются либо модуляция двулучепреломления, либо модуляция светорассеяния электрическим полем.

К настоящему времени разработаны новые типы СЖК - материалов, в частности:

- негеликоидальные низковольтные быстродействующие СЖК и светорассеивающие материалы на их основе [3, 4];
- светорассеивающие материалы на основе геликоидальных СЖК [5, 6, 7], в том числе с бистабильным характером электрооптического отклика [8].

Необходимо отметить, что каждому электрооптическому эффекту в СЖК, вне зависимости от того, проявляется ли эффект в модуляции двулучепреломления или светорассеяния, соответствует своя надмолекулярная структура – особый тип упаковки молекул с определенной симметрией.

Целью работы является поиск и исследование новых пространственно-неоднородных надмолекулярных структур в негеликоидальных СЖК с электроуправляемыми двулучепреломлением и светорассеянием, для управления оптическими свойствами СЖК в слабых электрических полях и эффективной пространственно-неоднородной фазовой модуляции лазерного излучения.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать процесс рассеяния лазерного излучения на динамической доменной структуре, возникающей при движении пространственно-локализованных волн стационарного профиля (солитонов) в переменном электрическом поле при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии в негеликоидальных СЖК.
2. Определить условия возникновения электрически управляемого рассеяния лазерного излучения в негеликоидальных СЖК, в том числе бистабильного светорассеяния.

3. Исследовать механизм пространственно-неоднородной фазовой модуляции лазерного излучения в электрооптической ячейке с негеликоидальным СЖК с целью подавления спекл-шума в формируемых лазером изображениях.

4. Исследовать динамику переориентации директора негеликоидального СЖК в переменном электрическом поле за счет движения солитонных волн.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Показано, что в пространственно-неоднородной структуре негеликоидального СЖК с периодическими деформациями смектических слоев появление структурно устойчивых волн стационарного профиля (динамических солитонов) связано с переходом к максвелловскому механизму диссипации энергии при нелинейном процессе переориентации директора в переменном электрическом поле.

2. Показано, что светорассеяние в негеликоидальных СЖК происходит на границах спонтанно упорядоченных областей, которые формируются в объеме слоя при возникновении волн стационарного профиля и приводят к образованию переходных доменов (рассеивающих центров), когда вдоль смектических слоев появляется неоднородное распределение электрической поляризации.

3. Экспериментально показано, что процесс рассеяния света на динамической доменной структуре, которая возникает при движении солитонных волн, при определенном соотношении между амплитудой и длительностью импульсов управляющего напряжения, энергией деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК имеет бистабильный характер, причём любое оптическое состояние (как с максимальным светопропусканием, так и с максимальной эффективностью светорассеяния) сохраняется в течение нескольких десятков секунд после выключения электрического поля или до прихода импульса управляющего напряжения обратной полярности.

4. Показано, что переходы между светорассеивающими модами, которым соответствуют различные максимумы эффективности светорассеяния, при одновременной подаче на электрооптическую ячейку импульсов напряжения, длительность которых соответствует различным максимумам, вызывают

хаотичное изменение положения индикатрисы рассеяния. Как следствие этого, в объеме СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, что является причиной пространственно-неоднородной фазовой модуляции света, проходящего через ячейку. Такая модуляция позволяет разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящего через ячейку, и подавить спекл-шум в формируемом лазером изображении.

5. Экспериментально показано, что частота модуляции светового излучения в солитонной моде, когда переориентация директора негеликоидального СЖК, происходит за счет движения волн стационарного профиля, не ограничена величиной отношения вращательной вязкости к спонтанной поляризации, что позволяет получить частоту модуляции порядка нескольких килогерц при амплитуде управляющего напряжения в единицы вольт.

Практическая ценность

Экспериментально показано, что:

1. Переход к максвелловскому механизму диссипации энергии в негеликоидальном СЖК при напряженности электрического поля $2\div 3$ В/мкм позволил получить максимальную эффективность светорассеяния (контрастное отношение свыше 200:1), светопропускание порядка 80% и достичь частоты модуляции светового излучения $3\div 5$ кГц.

2. Суммарное время включения-выключения светорассеяния для электрооптического модулятора толщиной 18 микрометров составляет около 50 микросекунд при напряженности поля 2,5 В/мкм.

3. Пространственно-неоднородная модуляция фазовой задержки в негеликоидальном СЖК позволила осуществить в электрическом поле напряженностью порядка 3 В/мкм эффективное подавление спекл-шума (с уменьшением его контраста на 10,7 dB) при частоте модуляции фазовой задержки порядка 2 кГц и отсутствии искажений в спектральном составе модулируемого лазерного излучения.

4. Переориентация директора СЖК в солитонной моде, возникающей вследствие преобладания сдвиговой вязкости при переходе к максвелловскому

механизму диссипации энергии, позволила обеспечить частоту модуляции света 7 кГц и время электрооптического отклика порядка $25 \div 30$ микросекунд при управляющем напряжении 1,5 вольта.

Полученные результаты служат практической базой для создания:

- нового поколения жидкокристаллических модуляторов светового излучения, характеризующихся высоким быстродействием и светопропусканием, интенсивным светорассеянием и простой технологией изготовления;
- эффективных электрооптических деспеклеров для подавления спекл-шума.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. В негеликоидальных СЖК переход к максвелловскому механизму диссипации энергии в пространственно-неоднородных структурах с периодическими деформациями смектических слоев приводит к появлению структурно устойчивых волн стационарного профиля – динамических солитонов.

2. Переориентация директора негеликоидального СЖК за счет движения волн стационарного профиля – солитонов позволяет уменьшить время электрооптического отклика в слабых полях (напряженность менее 1 В/мкм) практически на порядок по сравнению с режимом объемного переключения, когда время отклика определяется отношением вращательной вязкости к спонтанной поляризации СЖК.

3. В негеликоидальных СЖК рассеяние света происходит на границах спонтанно упорядоченных областей (переходных доменов), которые формируются в объеме СЖК при возникновении пространственно-локализованных волн стационарного профиля – солитонов; рассеяние появляется после изменения знака электрического поля и исчезает, когда обусловленная движением солитонов переориентация директора во всех смектических слоях заканчивается формированием однородной структуры.

4) Хаотичное изменение положения индикатрисы рассеяния в результате переходов между светорассеивающими модами, которым соответствуют различные максимумы эффективности светорассеяния, когда на

электрооптическую ячейку с негеликоидальным СЖК одновременно подаются импульсы напряжения, длительность которых соответствует различным максимумам, является причиной пространственно-неоднородной модуляции фазовой задержки, позволяющей разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящем через ячейку, и, как следствие подавить спекл-шум в изображении.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены соискателем лично либо при его непосредственном участии.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на II и III всероссийских конференциях по фотонике и информационной оптике (НИЯУ МИФИ, Москва, 2013 и 2014 гг.), на международном симпозиуме Общества информационных дисплеев (SID-2013, Ванкувер, Канада, 2013), на XI, XII и XIII международных конференциях «ГОЛОЭКСПО-2014, 2015, 2016», на V международной конференции по фотонике и информационной оптике (НИЯУ МИФИ, Москва, 2016), на 21-м международном симпозиуме «Передовые дисплейные и световые технологии» (ADLT-13, МГОУ, г. Мытищи, 2013), на международной конференции EuroDisplay-2015 (EuroDisplay-2015, Гент, Бельгия, 2015), на международной конференции «Физические свойства материалов и дисперсных сред для элементов информационных систем, наноэлектронных приборов и экологичных технологий» (Москва, 2015), на международной конференции по электротехнике и автоматизации (ICEEA2016, Сямынь, Китай).

По теме диссертации опубликовано печатных работ: 7 статей в рецензируемых журналах, указанных в перечне ВАК (из них 5 опубликованы в журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus), 9 докладов в трудах международных конференций и 2 доклада в трудах всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Общий объем работы – 117 страниц

машинописного текста, включая 67 рисунков и список используемой литературы из 88 наименований.

Содержание работы

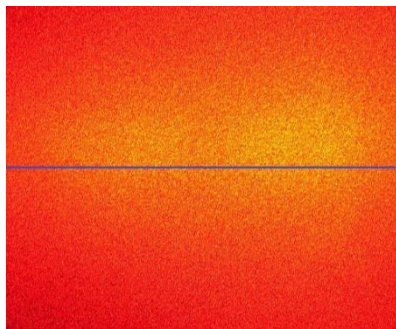
Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи, дана оценка практической значимости, определена научная новизна полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы. Приведены сведения об апробации результатов работы и публикациях автора.

Первая глава диссертации является литературным обзором. В ней дано общее представление о сегнетоэлектричестве в жидких кристаллах, основанное на симметрии жидкокристаллических фаз; описана динамика переориентации директора в тонких пленках сегнетоэлектрических жидких кристаллов в электрическом поле. В этой же главе рассмотрено управляемое электрическим полем рассеяние света в геликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах. Рассмотрена природа спекл-структур и кратко описаны наиболее распространённые методы подавления спекл-шума с указанием их достоинств и недостатков.

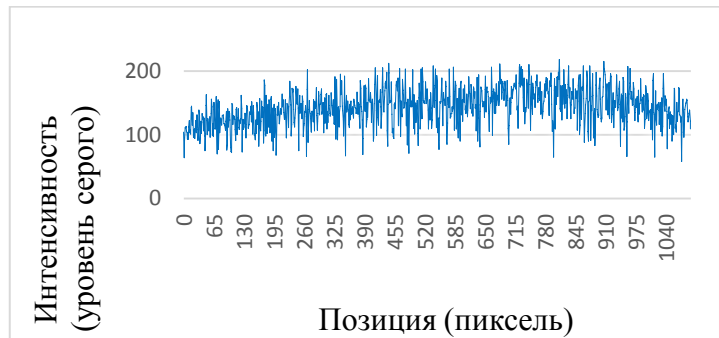
Во второй главе описаны методики диэлектрических и оптических измерений, измерения упругой энергии СЖК, методики приготовления СЖК и приведены химические структуры исследуемых сегнетоэлектрических жидкокристаллических материалов.

В этой же главе приведена методика оценки эффективности подавления спекл-шума. С помощью ПЗС видеокамеры регистрировались распределения интенсивностей излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку в отсутствие управляющего напряжения на электродах ячейки (спекл-картины) и при его наличии (когда спеклы подавлены). Полученные изображения спекл-картин обрабатывались с помощью специально разработанного программного обеспечения и на основании полученных данных (интенсивность, контрастное отношение, эффективность подавления спекл-шума)

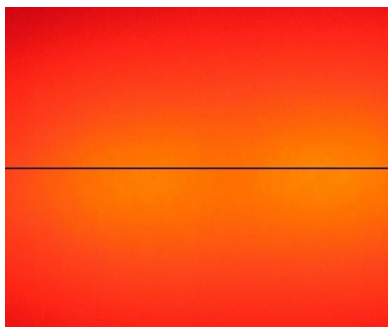
строились профили распределения интенсивности в изображении лазерного пятна (Рисунок 1).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Фотографии спекл-картин (а, в), измеренные профили распределения интенсивности излучения вдоль горизонтальной линии (б, г), прошедшего через электрооптическую ячейку в отсутствие (а, б) и при наличии (в, г) управляющего напряжения на электродах ячейки

Контрастное отношение спекл-структур вычислялось как $C = \sigma / \langle I \rangle$ - отношение среднеквадратичного отклонения флуктуаций интенсивности к среднему значению интенсивности. Эффективность подавления спекл-шума (в децибелах) рассчитывалась по уменьшению контраста спекл-структур как отношение контрастов при выключенном деспеклере (C_1) и включенном (C_2):

$$R = 10 \log_{10} (C_1 / C_2) \quad (1).$$

В третьей главе рассматривается новый тип негеликоидальных ЖК материалов, в которых светорассеяние происходит на границах спонтанно упорядоченных областей, которые образуются благодаря появлению волн стационарного профиля – динамических солитонов. Динамические солитоны возникают при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии при

нелинейном процессе переориентации директора (направления преимущественной ориентации длинных осей молекул и, соответственно, главной оптической оси) негеликоидального СЖК в переменном электрическом поле в пространственно-неоднородных структурах с деформациями смектических слоев, которые приводят к периодическим изменениям положения директора вдоль каждого слоя.

В работе использовался негеликоидальный СЖК (геликоидальная закрутка директора была подавлена за счет взаимодействия хиральных добавок с противоположными знаками оптической активности [9]) со следующими материальными параметрами: спонтанная поляризация $P_s = 40$ нКл/см², коэффициент вращательной вязкости $\gamma_\phi = 0,7$ Пуаз, угол наклона молекул в смектических слоях $\Theta_0 = 23^\circ$ (при температуре 20° С), температурный интервал существования сегнетоэлектрической (смектической C^*) фазы от 2° С до 70° С.

В ячейке с негеликоидальным СЖК в отсутствие электрического поля, при определенном соотношении между вращательной вязкостью γ_ϕ , спонтанной поляризацией и модулем упругости, определяющим деформацию вдоль смектических слоев K_ϕ , ($0,3 < \gamma_\phi < 1,0$ Пуаз, $P_s \leq 50$ нКл/см² и $K = (1 \div 3) \cdot 10^{-12}$ Н), возникают деформации смектических слоев СЖК (смектические слои трактуются как периодическая упорядоченность центров масс молекул в направлении директора с периодом порядка длины молекулы), приводящие к периодическим изменениям положения директора вдоль каждого слоя. Наличие таких периодических деформаций означает, что молекулы СЖК, исходно наклоненные на угол Θ_0 относительно нормали к слою в данной точке, дополнительно отклоняются на некоторый угол ψ относительно оси z (Рисунок 2).

Переориентация директора СЖК за счет взаимодействия электрического поля E со спонтанной поляризацией P_s может происходить как при изменения азимутального угла ориентации директора ϕ на 180° , когда директор переориентируется по образующим конуса с раствором $2\Theta_0$ (Рисунок 2), так и при изменении распределения угла ψ , отражающего деформацию смектических слоев.

В первом случае диссипативным коэффициентом является вращательная вязкость СЖК γ_φ , а во втором - вязкость при деформации сдвига γ_ψ .

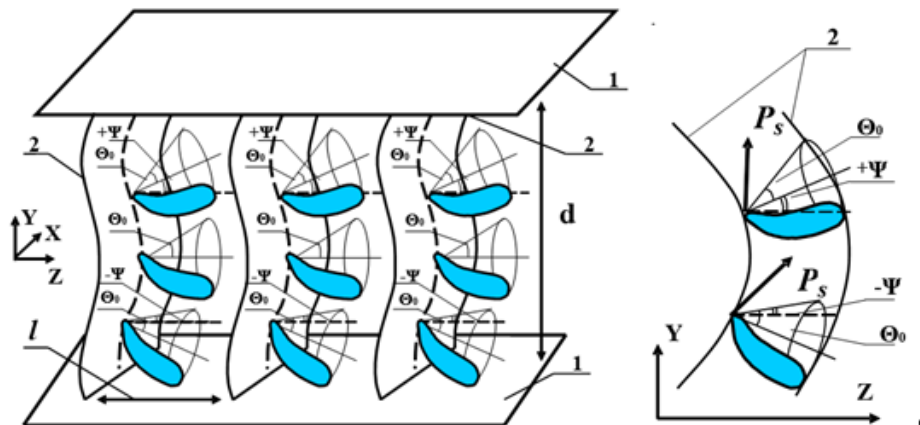


Рисунок 2 - Структура смектических слоёв негеликоидального СЖК с планарной ориентацией директора в электрооптической ячейке. 1 – стеклянные подложки с прозрачным токопроводящим покрытием, 2 – смектические слои. d – толщина ячейки, θ_0 – угол наклона молекул в смектических слоях, ψ – угол наклона смектического слоя, P_s – вектор спонтанной поляризации, l – толщина смектического слоя.

Если частота изменения внешнего электрического поля $f \sim 1/\tau_m$, где τ_m – время максвелловской релаксации, то есть время, в течение которого в СЖК затухают напряжения сдвига, оставшиеся после прекращения деформации, вызванной электрическим полем), то вязкость СЖК связана с модулем сдвига μ следующим соотношением: $\gamma \sim \tau_m \cdot \mu$ [10].

В случае, если время τ_m не зависит от частоты изменения поля, то вязкость СЖК γ_φ также не зависит от частоты, и время переориентации директора $\tau_R \sim \gamma_\varphi / P_s \cdot E$ не зависит от частоты изменения поля [11].

Как следствие этого, время электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$ и время релаксации директора не зависят от частоты изменения электрического поля, если частота не превышает 200 Гц (Рисунок 3 кривая 1 и Рисунок 4).

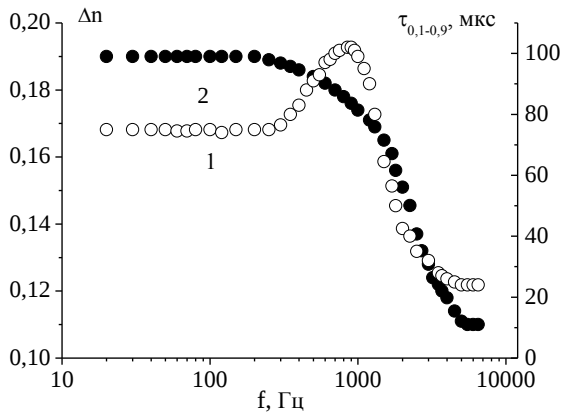


Рисунок 3 – Частотные зависимости времени электрооптического отклика (1) и показателя двулучепреломления (2). Толщина электрооптической ячейки 13 мкм. Управляющее напряжение - импульсы прямоугольной формы с амплитудой 35 В. Длина волны лазерного излучения 0,63 мкм.

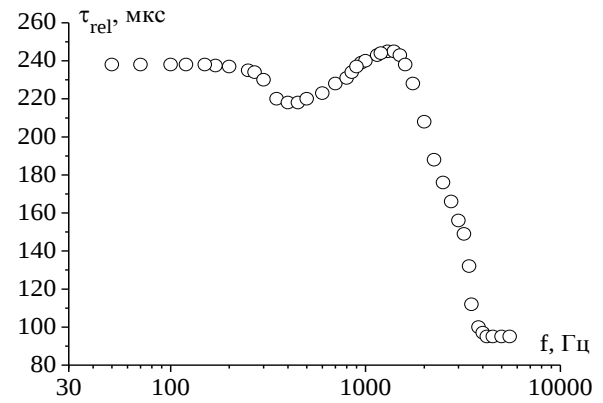


Рисунок 4 – Частотная зависимость времени релаксации директора СЖК. Толщина электрооптической ячейки 13 мкм. Управляющее напряжение - импульсы прямоугольной формы с амплитудой 35 В. Длина волны лазерного излучения 0,63 мкм.

Соответственно, вязкость зависит от частоты изменения поля, когда время максвелловской релаксации τ_m зависит от частоты. В этом случае диссипативный коэффициент - вязкость при деформации сдвига γ_ψ .

Переход к максвелловскому механизму диссипации энергии приводит к появлению солитона, который представляет собой волновой пакет с локализованной в нем периодической волной [4] и сопровождается сильной частотной зависимостью времени электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$, причем время $\tau_{0,1-0,9}$ уменьшается в несколько раз (Рисунок 3, кривая 1). При дальнейшем увеличении частоты, когда время $\tau_{0,1-0,9}$ определяется только скоростью движения солитонных волн, частотная зависимость практически отсутствует.

Максимальная скорость движения солитона может быть записана как [4]:

$$V = (\Theta_0 / \gamma_\psi) \sqrt{2K(M + P_s E \cos \varphi_0)} \quad (4)$$

где K – коэффициент упругости, описывающий деформацию директора по углу Ψ , γ_ψ - сдвиговая вязкость, M – энергия деформации смектических слоев, φ_0 - начальный азимутальный угол ориентации директора СЖК.

Характерное время переориентации директора, обусловленное движением ориентационного перегиба может быть записано как [4]:

$$\tau_c = \frac{2\gamma_\psi}{\Theta_0^2(P_s E \cos \varphi_0 + M)}, \quad (5)$$

При $\varphi_0 = 30^\circ$, $P_s = 50$ нКл/см², $M = 4 \cdot 10^3$ эрг/см³, $K = 5 \cdot 10^{-12}$ Н, $E = 3$ В/мкм, $\Theta_0 = 23^\circ$ и $\gamma_\psi = 0,2$ Пуаз скорость движения центра солитона $V = 0,65$ см/с, а время переориентации директора $\tau_c \approx 150$ мкс.

Переход к максвелловскому механизму диссипации энергии также сопровождается уменьшением показателя двулучепреломления СЖК Δn (Рисунок 3, кривая 2). Максимальное изменение Δn (в 1,5 раза) происходит при переходе к солитонной моде. В этой моде показатель Δn не меняется, и светопропускание электрооптической ячейки достигает максимального значения.

Возникновение волн стационарного профиля приводит к образованию структуры переходных доменов - спонтанно упорядоченных областей, на границах которых происходит рассеяние света. Светорассеяние в негеликоидальных СЖК связано с пространственной неоднородностью оптической анизотропии.

Движение солитонов переориентирует директор во всем объеме СЖК и, как следствие этого, переходные домены исчезают. В этом случае, если плоскость поляризации падающего света лежит вдоль направления директора (вдоль главной оптической оси СЖК), то светопропускание электрооптической ячейки становится максимально возможным. Инверсия знака электрического поля (полярности импульсов управляющего напряжения) вновь индуцирует образование солитонных волн, что вызывает появление градиентов показателя преломления вдоль смектических слоев и сопровождается интенсивным рассеянием света.

Эффективность светорассеяния и светопропускание электрооптической ячейки определяются как частотой, так и амплитудой управляющего напряжения. При фиксированной напряженности электрического поля (амплитуде биполярных импульсов напряжения) максимальная эффективность светорассеяния

(контрастное отношение) и максимальное светопропускание электрооптической ячейки достигаются при разной длительности импульсов (Рисунок 5).

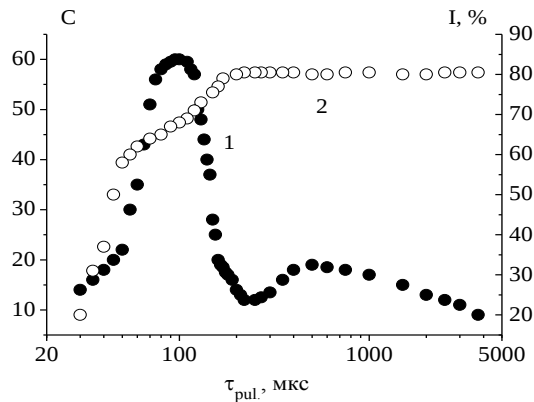


Рисунок 5 – Зависимости эффективности светорассеяния (кривая 1) и светопропускания (кривая 2) от длительности импульсов биполярного напряжения при фиксированной амплитуде импульсов (± 35 В). Толщина электрооптической ячейки 13 мкм.

Это означает, что время формирования регулярной структуры переходных доменов и время полного исчезновения этой структуры различаются. Максимальной эффективности светорассеяния соответствует регулярная структура рассеивающих центров в виде циркулярных доменов, достаточно равномерно распределенных по объему СЖК.

При отсутствии геликоида, в случае если энергия деформации смектических слоев не превышает $5 \cdot 10^3$ Эрг/см³ и спонтанная поляризация СЖК $P_s < 50$ нКл/см², процесс рассеяния имеет бистабильный характер. Это означает, что оба оптических состояния структуры как с максимальным светопропусканием, так и с максимальной эффективностью светорассеяния, сохраняются в течение нескольких десятков секунд после выключения напряжения или до прихода импульса напряжения противоположной полярности (Рисунок 6).

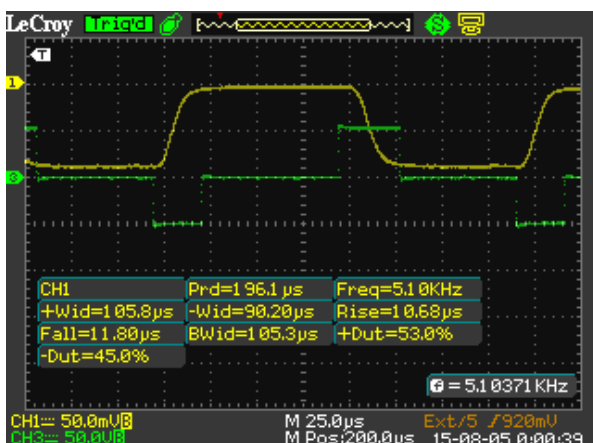


Рисунок 6 – Осциллограммы управляющего напряжения (канал CH3, импульсы ± 48 В) и электрооптического отклика (канал CH1) при бистабильном режиме переключения. Нулевой уровень светопропускания - стрелка 1. Верхний уровень электрооптического отклика - рассеивающее состояние, нижний - пропускающее. Толщина ячейки 18 мкм. Частота модуляции излучения 5 кГц.

Переключение импульсами напряжения разной длительности обеспечивает работу электрооптической ячейки в бистабильном режиме со светопропусканием порядка 80% и контрастным отношением свыше 200:1. Суммарное время включения-выключения светорассеяния не превышает 25 микросекунд при напряженности поля 2,7 В/мкм (Рисунок 6).

Диаграмма рассеяния несимметрична относительно плоскости, перпендикулярной к направлению падающего света (Рисунок 7).

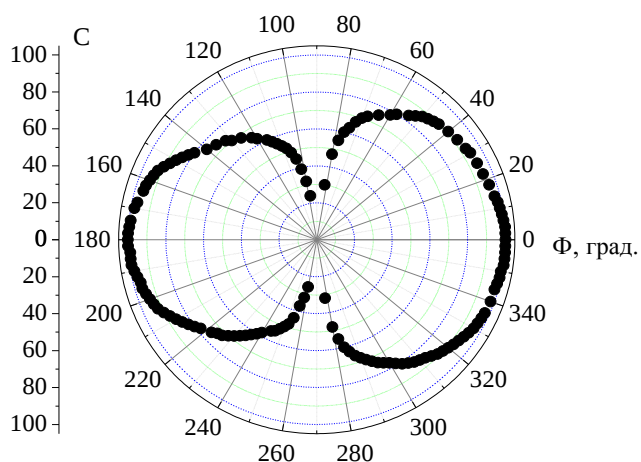


Рисунок 7 – Зависимости эффективности светорассеяния от угла наблюдения (направления рассеяния) вдоль смектических слоев. Толщина электрооптической ячейки 13 мкм. Бистабильный режим переключения. Управляющее напряжение: биполярные импульсы амплитудой ± 35 В, длина волны лазерного излучения $\lambda = 0,63$ мкм.

Эффективность светорассеяния максимальна в направлении, совпадающем с направлением падающего света ($\Phi = 0^\circ$), и уменьшается в противоположном направлении ($\Phi = 180^\circ$). Уменьшение эффективности светорассеяния в направлениях, расположенных под углами больше 20° по направлению к падающему свету (и в противоположную сторону), связано с нерегулярным распределением плотности рассеивающих центров вдоль смектических слоев. Это приводит к изменению условий интерференции - излучение от рассеивающих центров интерферирует при неодинаковой разности фаз.

Отметим, что эффективность светорассеяния не зависит от длины волны лазерного излучения во всем видимом и ближнем ИК диапазонах.

В четвертой главе рассматривается модуляция светового излучения вследствие электроуправляемого изменения двулучепреломления в негеликоидальных СЖК, причиной которого является движение пространственно-локализованных волн стационарного профиля (солитонов), а именно, рассматривается динамика процесса переориентации директора (главной

оптической оси СЖК) в переменном электрическом поле при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии.

Как показано в главе 3, характер процесса переориентации директора СЖК под действием переменного электрического поля зависит от того, который из двух диссипативных коэффициентов вращательная или сдвиговая вязкость, преобладает. Если диссипативный коэффициент – вращательная вязкость γ_φ , то время переориентации директора $\tau_R \sim \gamma_\varphi / P_S \cdot E$, [10]. Соответственно, время электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$, пропорциональное времени τ_R , также определяется отношением вязкости γ_φ к спонтанной поляризации P_S .

Значительно уменьшить отношение γ_φ / P_S не представляется возможным, так как увеличение P_S обычно приводит к возрастанию γ_φ . Это обстоятельство ограничивает частоту модуляции светового излучения, если напряжение, приложенное к электрооптической ячейке, не превышает нескольких вольт.

С другой стороны, переориентация директора СЖК за счет движения солитонных волн, при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии, позволяет уменьшить время отклика $\tau_{0,1-0,9}$, в слабых полях практически на порядок (Рисунок 3).

Частота изменения электрического поля, при достижении которой происходит переход к солитонной моде, время электрооптического отклика и частота модуляции светового излучения зависят от периода деформации смектических слоев и коэффициента вращательной вязкости γ_φ .

Так, для электрооптической ячейки толщиной 1,7 мкм (полуволновая пластинка для белого света), где в качестве модулирующей среды использовался СЖК *HF-32B* ($\gamma_\varphi = 0,7$ Пуаз, период деформации смектических слоев порядка 2 мкм, $\Delta n = 0,15$) переход к солитонной моде происходит при частоте управляющего напряжения порядка 170 Гц (Рисунок 8). В солитонной моде (частота управляющего напряжения выше 200 Гц) зависимость времени $\tau_{0,1-0,9}$ от частоты достаточно слабая. В этой моде время $\tau_{0,1-0,9}$ определяется соотношением (5).

Для *HF-32B* максимальная частота модуляции светового излучения составила 3,5 кГц при амплитуде управляющего напряжения 1,5 Вольта (Рисунок 8).

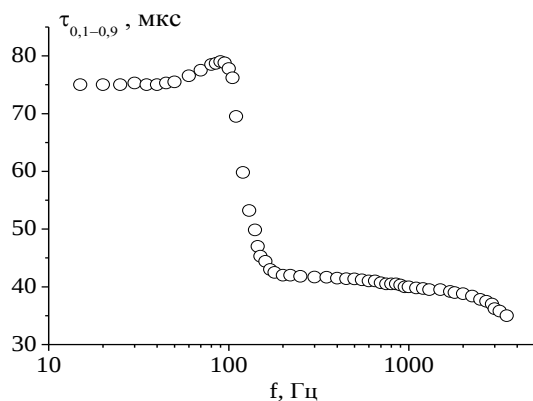


Рисунок 8 - Частотная зависимость времени оптического отклика для электрооптической ячейки с *HF-32B* толщиной 1,7 мкм. Амплитуда биполярного напряжения прямоугольной формы (меандр) $\pm 1,5$ В.

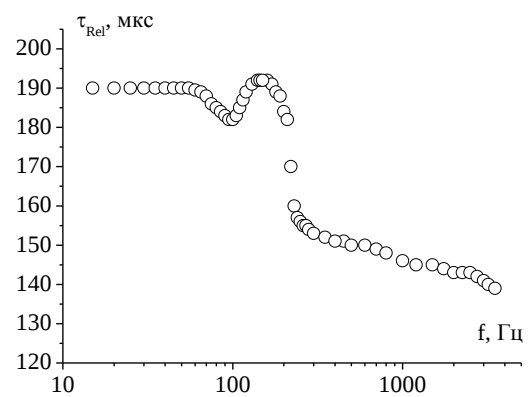


Рисунок 9 - Частотная зависимость времени релаксации директора *HF-32B*. Электрооптическая ячейка толщиной 1,7 мкм. Управляющее напряжение - импульсы прямоугольной формы с амплитудой $\pm 1,5$ В.

Переход к максвелловскому механизму диссипации энергии происходит, когда время релаксации директора начинает зависеть от частоты изменения поля. Изменение канала диссипации энергии, то есть переход к сдвиговой вязкости γ_ψ , сопровождается сильной частотной зависимостью времени релаксации (Рисунок 9).

При уменьшении коэффициента γ_ϕ до 0,3 Пуаз переход к солитонной моде происходит при частоте управляющего напряжения порядка 1 кГц. При этом время $\tau_{0,1-0,9}$ в солитонной моде возрастает практически в два раза (при амплитуде напряжения 1,5 Вольта), а максимальная частота модуляции светового излучения уменьшается до $1,5 \div 2$ кГц. Дальнейшее уменьшение коэффициента вращательной вязкости до 0,15 Пуаз приводит к тому, что при амплитуде напряжения 1,5 Вольта солитонная мода вообще не наблюдается.

Поведение электрооптической ячейки с более вязкой СЖК композицией *HF-32C* ($\gamma_\phi=1,0$ Пуаз) качественно не отличается от электрооптического поведения ячейки с *HF-32B* (Рисунок 8), но имеются количественные различия.

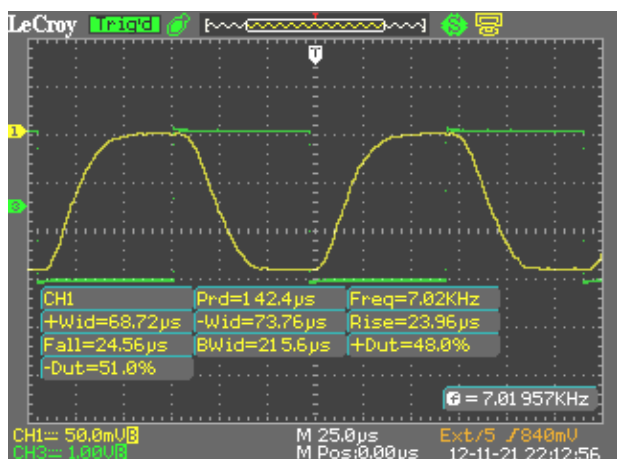


Рисунок 10— Осциллограммы управляющего напряжения (зеленый цвет) и электрооптического отклика (желтый цвет). Толщина электрооптической ячейки 1,7 мкм. СЖК HF-32С. Управляющее напряжение: меандр с амплитудой $\pm 1,5$ В, нулевой уровень напряжения - стрелка с цифрой 3. Частота модуляции света 7 кГц. Верхний уровень электрооптического отклика - закрытое состояние, нижний - пропускающее, нулевой уровень светопропускания - стрелка с цифрой 1. Время электрооптического отклика по переднему фронту - Rise, по заднему фронту - Fall.

Во-первых, в обе стороны расширился частотный интервал, в котором преобладающим диссипативным коэффициентом является сдвиговая вязкость – от 100 Гц до 7 кГц (Рисунок 10).

Во-вторых, в солитонной моде увеличилось быстродействие СЖК – время электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$ уменьшилось с 80 до 40 мкс на частоте модуляции света 100 Гц. На максимальной частоте модуляции света 7 кГц время $\tau_{0,1-0,9}$ не превышает 25 мкс при амплитуде управляющего напряжения 1,5 В.

Таким образом, использование более вязкой СЖК композиции позволило расширить частотный интервал существования солитонной моды, и, как следствие этого, увеличить быстродействие и повысить максимальную частоту модуляции лазерного излучения в два раза во всем видимом и ближнем ИК диапазоне.

Для еще более вязких СЖК композиций ($\gamma_\phi = 1,5$ Пуаза) частотная зависимость времени $\tau_{0,1-0,9}$ практически отсутствует, переход к максвелловскому механизму диссипации энергии не происходит, и солитонная мода не наблюдается ни при какой напряженности электрического поля.

Отметим, что величина спонтанной поляризации P_{S2} угол наклона молекул в смектических слоях θ_0 , период деформации смектических слоев и температурный интервал существования сегнетоэлектрической фазы, для всех используемых СЖК практически одинаковы. Изменяется только коэффициент вращательной вязкости γ_ϕ .

В пятой главе диссертации показано, что пространственно неоднородная модуляция фазовой задержки, глубина которой порядка и более π , позволяет разрушить фазовые соотношения в лазерном пучке, проходящем через электрооптическую ячейку и, как следствие этого, подавить спекл-шум в изображении. Пространственно-неоднородная фазовая модуляция является следствием хаотичного изменения положения индикатрисы рассеяния СЖК, когда на электрооптическую ячейку одновременно подается низкочастотное и высокочастотное управляющее напряжение.

Ячейки заполнялись специально разработанным негеликоидальным СЖК, способным эффективно работать в режиме пространственно-неоднородной фазовой модуляции, со следующими материальными параметрами: $P_S=40$ нКл/см², $\gamma_\phi = 0,7$ Пуаз, угол наклона молекул $\Theta_0= 23^\circ$ (при температуре 20⁰С), температурный интервал существования сегнетоэлектрической фазы от 2 до 75⁰С. Толщина ячеек составляла от 13 до 35 мкм, апертура ячеек – 2х2 см.

При фиксированной напряженности электрического поля (амплитуде импульсов управляющего напряжения) максимальная эффективность светорассеяния и максимальное светопропускание электрооптической ячейки достигаются при определенной, но разной длительности импульсов управляющего напряжения (Рисунок 11).

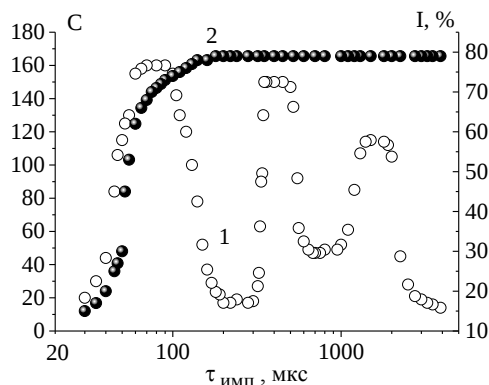


Рисунок 11 - Зависимости эффективности светорассеяния (кривая 1) и светопропускания (кривая 2) электрооптической ячейки (толщина 20 мкм) от длительности импульсов биполярного напряжения при фиксированной амплитуде (± 50 В).

Количество максимумов эффективности светорассеяния и величина контрастного отношения, им соответствующая, зависят от толщины электрооптической ячейки. Для ячеек толщиной 8÷13 микрон, наблюдается один максимум эффективности светорассеяния (Рисунок 5). Второй максимум

появляется при увеличении толщины ячейки до $15\div 17$ микрометров, а третий – при толщине 18 микрометров. При толщине ячейки 20 микрометров и более первый максимум смещается в сторону более коротких импульсов (Рисунок 11).

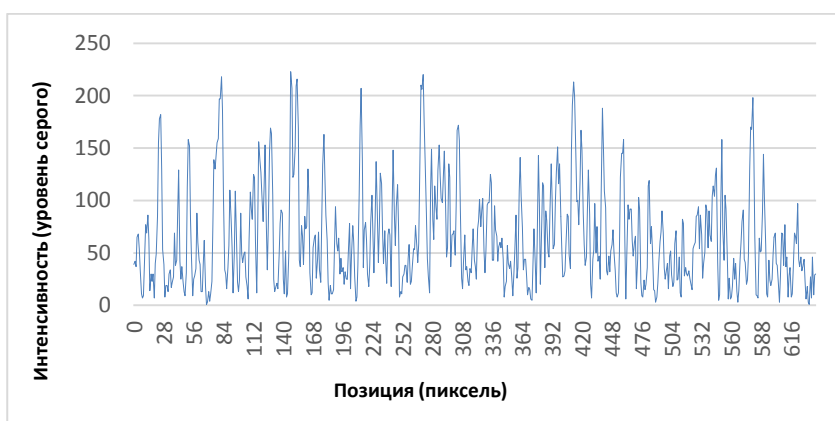
Переходы между светорассеивающими модами, которым соответствуют максимумы эффективности светорассеяния (Рисунок 11), при одновременной подаче на электрооптическую ячейку импульсов напряжения, длительность которых соответствует различным максимумам, приводят к хаотичному изменению положения индикатрисы рассеяния.

В результате кратковременного (менее 30 мкс) включения светорассеяния в объеме СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, что, в свою очередь, является причиной пространственно-неоднородной по сечению пучка фазовой модуляции света в электрооптической ячейке. Характер модуляции фазовой задержки (степень неоднородности) зависит от соотношения амплитуды и частоты низкочастотного и высокочастотного управляющего напряжения.

При отсутствии управляющего напряжения на электрооптической ячейке контраст развитой спекл-структуры на длине волны лазерного излучения 0,65 мкм составляет 0,82 (Рисунок 12).



а)



б)

Рисунок 12 - Фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку при отсутствии управляющего напряжения (а) и распределение интенсивности на анализируемых пикселях (б). Толщина ячейки 20 мкм. Контраст спекл-структуры $S_I = 0,82$. Длина волны лазерного излучения $\lambda = 0,65$ мкм.

Для электрооптической ячейки толщиной 20 микрон фазовая модуляция с высокой степенью неоднородности достигалась при амплитудной модуляции низкочастотного биполярного напряжения (меандр) с частотой 2 кГц, высокочастотным напряжением той же формы частотой 7 кГц, при напряженности электрического поля 3,5 В/мкм (Рисунок 13).

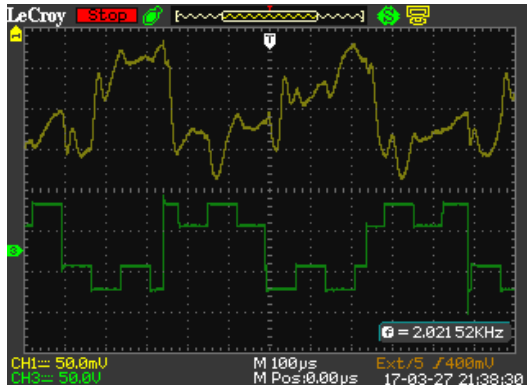
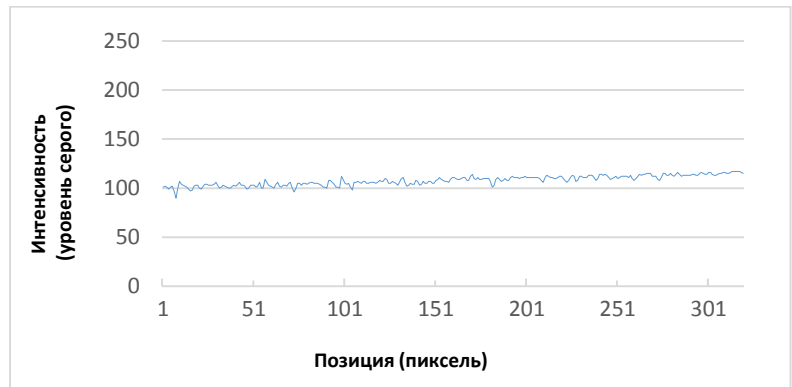


Рисунок 13 - Осциллограммы управляющего напряжения (в нижней части рисунка) и модуляции фазовой задержки (в верхней части). Толщина электрооптической ячейки 20 мкм. Частота повторения низкочастотного сигнала (меандр) 2 кГц, амплитуда ± 50 В. Частота высокочастотного модулирующего сигнала (меандр) 7 кГц, амплитуда ± 15 В. Длина волны излучения $\lambda = 0,65$ мкм.

Модуляции фазовой задержки низкочастотным и высокочастотным управляющим напряжением при одновременной подаче на электрооптическую ячейку импульсов напряжения, длительность которых соответствует первому и второму максимуму эффективности светорассеяния (Рисунок 11) позволила уменьшить контраст спекловой картины до 0,07 (Рисунок 14).



а)



б)

Рисунок 13 - Фотография распределения интенсивности излучения в поперечном сечении лазерного пучка, прошедшего через электрооптическую ячейку при подаче управляющего напряжения (а) и распределение интенсивности на анализируемых пикселях (б). Контраст спекл-структуры $S_2 = 0,07$. Толщина ячейки 20 мкм. Длина волны излучения $\lambda = 0,65$ мкм.

Эффективность уменьшения контрастного отношения спекловой картины между контрастом S_1 и контрастом S_2 составляет 10,7 dB.

Основные результаты и выводы.

Диссертационная работа посвящена исследованию модуляции лазерного излучения на основе электроуправляемого изменения двулучепреломления и светорассеяния в негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах

Основными результатами работы являются:

1. Показано, что в негеликоидальных СЖК переход к максвелловскому механизму диссипации энергии вызывает появление пространственно-локализованных волн стационарного профиля – солитонов. Движение солитонов приводит к возникновению динамической доменной структуры, на которой происходит интенсивное рассеяние света.

2. Процесс рассеяния света на динамической доменной структуре в негеликоидальных СЖК имеет бистабильный характер. Это означает что оба оптических состояния структуры как с максимальным светопропусканием, так и с максимальной эффективностью светорассеяния, сохраняются в течение нескольких десятков секунд после выключения электрического поля или до прихода импульса управляющего напряжения противоположной полярности.

3. Переход к максвелловскому механизму диссипации энергии позволил получить максимальную эффективность светорассеяния (контрастное отношение свыше 200:1), светопропускание порядка 80% и достичь частоты модуляции светового излучения $3 \div 5$ кГц при напряженности электрического поля $2 \div 3$ В/мкм. Суммарное время включения-выключения светорассеяния для электрооптического модулятора толщиной 18 микрон составило около 50 микросекунд при напряженности поля 2,5 В/мкм.

4. Солитонная мода проявляется при увеличении частоты изменения или напряженности электрического поля, если коэффициент вращательной вязкости СЖК лежит в пределах от 0,15 до 1 Пуаза.

5. Переориентация директора СЖК в солитонной моде позволила обеспечить частоту модуляции лазерного излучения 7 кГц и время электрооптического отклика порядка 25 микросекунд при амплитуде управляющего напряжения

1,5 Вольта (напряженность электрического поля около 1 В/мкм) во всем видимом диапазоне длин волн лазерного излучения.

6. Переходы между светорассеивающими модами при одновременной подаче на электрооптическую ячейку низкочастотного и высокочастотного напряжения приводят к хаотичному изменению положения индикатрисы рассеяния. В результате кратковременного (менее 30 мкс) включения светорассеяния в объеме СЖК формируются структуры со случайным распределением градиентов показателя преломления, которые, в свою очередь, являются причиной пространственно-неоднородной фазовой модуляции лазерного излучения в электрооптической ячейке.

7. Пространственно-неоднородная модуляция светового излучения, глубиной порядка и более π , позволяет разрушить фазовые соотношения в проходящем через электрооптическую ячейку лазерном пучке, и, как следствие, эффективно подавить спекл-шум в формируемом лазером изображении, при отсутствии искажений в спектральном составе модулируемого излучения. Уменьшение контраста спекловой картины составило 10,7 dB на частоте модуляции фазовой задержки 2 кГц при приложении к ячейке электрического поля напряженностью порядка 3 В/мкм.

Список использованной литературы:

1. R.B. Meyer, L. Ltebert, L. Strzelecki, and P. Keller, *Ferroelectric Liquid Crystals* // J. Phys. (France) Lett. 36, L69-71 (1975).
2. N.A. Clark and S.T. Lagerwall, Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 36, pp. 899-903 (1980).
3. A.L. Andreev, T.B. Andreeva, I.N. Kompanets, N.V. Zalyapin. Optical response of helix-free FLC: continuous gray scale, fastest response, and lowest control voltage. *Journal of the SID*, vol. 22, Issue 2, pp. 115–121 (2014).
4. Alexander Andreev, Tatiana Andreeva, Igor Kompanets, Nikolay Zalyapin, Huan Xu, Mike Pivnenko, And Daping Chu. Fast bistable intensive light scattering in helix-free ferroelectric liquid crystals. *Applied Optics*, vol. 55, No. 13, pp. 3483-3492, (2016).
5. K. Yoshino and M Ozaki. New Electro-Optic Effect of Microsecond Response Utilizing Transient Light Scattering in Ferroelectric Liquid Crystal. *Japanese Journal of Applied Physics*. Vol. 23, No. 6, June 1984, pp. L385-L387.

6. А.Л. Андреев, Ю.П. Бобылев, Н.А. Губасарян, И.Н. Компанец, Е.П. Пожидаев, В.М. Шошин, Ю.П. Шумкина. Рассеяние света в СЖК-модуляторах для объемных экранов. Оптический журнал, №9, 58-65 (2005).

7. E. P. Pozhidaev, Gurumurthy Hegde, V. G. Chigrinov, A. A. Murauski, H. S. Kwok, V. V. Vashchenko, and A. I. Krivoshey. Light Scattering of Short Helix Pitch Ferroelectric Liquid Crystal. Mol. Cryst. & Liq. Cryst., v. 510, 1146-1154 (2009).

8. А.Л. Андреев, Т.Б. Андреева, И.Н. Компанец, Ю.П. Бобылев, С.А. Гончуков, М.В. Минченко, В.М. Шошин. Управляемое электрическим полем рассеяние света в геликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах. Оптический журнал, №12, 52-61 (2010).

9. Л.А. Береснев, В.А. Байкалов, Л.М. Блинов, Е.П. Пожидаев, Г.В. Пурванецкас. Первый негеликоидальный сегнетоэлектрический жидкий кристалл. Письма в ЖЭТФ, т. 33, 10, 553-557, (1981).

10. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория упругости. Москва, Наука, с. 188-189 (1987).

11. M.A. Handschy, N.A. Clark and S.T. Lagerwall. Field-Induced First-Order Orientation Transitions in Ferroelectric Liquid Crystals, Phys. Rev. Lett., v. 51, pp. 471-474 (1983).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Alexander Andreev, Tatiana Andreeva, Igor Kompanets, Nikolay Zalyapin, Huan Xu, Mike Pivnenko, and Daping Chu. Fast bistable intensive light scattering in helix-free ferroelectric liquid crystals. Applied Optics, V. 55, No. 13, 3483-3492 (2016).

2. A.L.Andreev, T.B.Andreeva, I.N.Kompanets, R.S.Starikov, N.V. Zalyapin. Novel FLC-Materials open Possibilities for FLSoS based microdisplays and video projectors. Physics Procedia, v. 73, pp. 87-94, (2015).

3. Alexander L. Andreev, Tatiana B. Andreeva, Igor N. Kompanets, Nikolay V. Zalyapin. Optical Response of Helix-Free FLC: Continuous Gray Scale, Fastest Response and Lowest Control Voltage. The Journal of the Society for Information Display, v.22, n.2, pp.115-121 (2014).

4. А.Л.Андреев, Т.Б.Андреева, И.Н.Компанец, Н.В.Заляпин. Подавление спекл-шума с помощью ячейки негеликоидального сегнетоэлектрического жидкого кристалла. «Квантовая электроника», 44, № 12, 1136-1140 (2014).

5. А.Л.Андреев, Н.В.Заляпин, И.Н.Компанец. Дисплейная СЖК ячейка модулирует свет с частотой до 7 кГц при напряжении 1,5 В. Вестник МГОУ. Сер. «Физика - Математика». №1, 57-64 (2013).

6. А.Л.Андреев, И.Н.Компанец, Н.В.Заляпин. Новые жидкокристаллические материалы и 3D технологии записи и отображения информации. «Радиоэлектронные технологии», №1, 2016, 86-89 (2016).

7. A.L. Andreev, T.B. Andreeva, I.N. Kompanets, N.V. Zalyapin, R.S. Starikov. Speckle-noise suppression using electro-optical cell with helix-free ferroelectric LC. Journal of Physics: Conference Series 737, с. 012019, (2016).