

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

На правах рукописи

Ткаченко Тимофей Павлович

**Диэлектрические и электрооптические свойства
ферриэлектриков в смесях неполярного жидкого
кристалла и хиральных соединений**

Специальность 1.3.8 —
Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

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

Научный руководитель: **Пожидаев Евгений Павлович**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Емельяненко Александр Вячеславович**,
доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник кафедры физики полимеров и кристаллов Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова

Горкунов Максим Валерьевич,
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией теоретических исследований Отделения «Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова» Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твёрдого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН)

Защита состоится 21 сентября 2026 года в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г.Москва, Ленинский проспект, д. 53.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.262.01,
доктор физико-математических наук

Золотко Александр Степанович

Общая характеристика работы

Термотропные жидкие кристаллы (ЖК), или мезофазы, являются агрегатным состоянием вещества, возникающем в некотором интервале температур между твердым телом и жидкостью. Это отдельное фазовое состояние, сочетающее в себе свойства жидкости (текучесть) и твердых кристаллов (двулучепреломление), которое обычно наблюдается в молекулах с ярко выраженным анизотропным строением. С момента открытия Фридрихом Рейнитцером и Отто Лемоном на рубеже 20-го века, жидкие кристаллы прошли огромный путь от научных дискуссий на тему природы их существования, классификаций, исследований физических свойств до промышленного применения в различных устройствах, в том числе и массового использования (в дисплеях, телевизорах и т.д.).

Существует множество типов жидкокристаллических мезофаз, различающихся по молекулярной структуре и физическим свойствам: нематики (НЖК), смектики А (SmA), смектики С (SmC) и т.д [1]. С точки зрения диэлектрической классификации, они могут быть как параэлектриками, так и сегнетоэлектриками, антисегнетоэлектриками и ферриэлектриками.

Данная работа посвящена индуцированию ферриэлектрических фаз жидких кристаллов в смесях смектика С и хиральных соединений, а также исследованию их диэлектрических и электрооптических свойств.

Актуальность темы исследования.

На данный момент в хиральных смектиках C^* открыты все типы полярных фаз: сегнетоэлектрическая [2], антисегнетоэлектрическая [3] и ферриэлектрическая [4]. Жидкокристаллические ферриэлектрики, являющиеся предметом исследования в этой работе, обычно называют промежуточными фазами, так как ранее они наблюдались в узком температурном диапазоне между сегнетоэлектрической и антисегнетоэлектрической фазами. Их молекулярная структура также является промежуточной между сегнетоэлектрической и антисегнетоэлектрической упаковкой. В сегнетоэлектриках диполи в каждом смектическом слое сонаправлены, в антисегнетоэлектриках диполи в соседних смектических слоях противоположно направлены. В ферриэлектриках упаковка (в значении минимального количества смектических слоев, необходимых для образования типа полярной фазы) состоит из трех или более смектических слоев с неэквивалентно направленными диполями.

Ввиду многообразия возможных упаковок ферриэлектриков [5], они представляли интерес в основном для теоретических работ и экспериментов по установлению вида их упорядоченных молекулярных структур. С точки зрения практического применения или исследования их электрооптических свойств жидкокристаллические ферриэлектрики практически не

рассматривались, так как известные до начала этой работы ферриэлектрики обычно существуют при температурах существенно выше комнатной и в узком температурном диапазоне $\sim 6^\circ\text{C}$.

Разработка ферриэлектрических фаз смектических C^* жидких кристаллов, существующих в широком диапазоне температур, включая комнатные, является актуальной темой исследования, так как позволит описать их электрооптические свойства, определить сферу возможного практического использования и исследовать преимущества (или недостатки) относительно остальных полярных фаз.

Целью работы является индуцирование в смесях неполярного смектического C жидкого кристалла и немезофазных хиральных соединений ферриэлектрических фаз, существующих в том числе при комнатных температурах, а также исследование их диэлектрических и электрооптических свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Охарактеризовать двухкомпонентную жидкокристаллическую смесь, обладающую ферриэлектрическими фазами при комнатных температурах;
2. Методами физического материаловедения разработать трехкомпонентные жидкокристаллические ферриэлектрики с модифицированными свойствами и расширенным температурным диапазоном существования;
3. Исследовать диэлектрические и электрооптические характеристики разработанных широкотемпературных ферриэлектрических жидких кристаллов;
4. Сравнить сегнетоэлектрические и ферриэлектрические жидкие кристаллы с точки зрения их практического использования для задач фазовой модуляции света.

Научная новизна:

1. Экспериментально доказано существование жидкокристаллических ферриэлектриков, не являющихся промежуточными между сегнетоэлектрическими и антисегнетоэлектрическими фазами;
2. Обоснован принцип управления типом молекулярной упаковки ферриэлектрических фаз из-за изменения шага геликоидальной структуры в жидкокристаллических смесях, содержащих хиральные соединения, индуцирующие противоположные знаки волнового вектора;
3. Показано существование дисперсии критического электрического поля разрушения геликоидальной структуры в области частот приложенного электрического поля 1 Гц - 1000 Гц, при которых диэлектрическая восприимчивость смектических C^* жидких кристаллов постоянна;

4. Обнаружены качественные различия в температурных зависимостях электроуправляемого двулучепреломления между ферриэлектрическими и сегнетоэлектрическими фазами жидких кристаллов.

Практическая значимость:

1. Разработан новый класс смесевых широкотемпературных ферриэлектрических жидких кристаллов, существующих в том числе при комнатной температуре, что позволит использовать их в различных электрооптических устройствах;
2. Достигнута модуляция фазы света в видимом диапазоне с глубиной не менее 6π с субмиллисекундным времени электрооптического отклика при уменьшенных управляющих напряжениях более чем в два раза по сравнению с известными смектическими C^* жидкими кристаллами. Модуляторы фазы с приведенными характеристиками могут быть использованы при решении задач гипер- и мультиспектрального анализа;
3. Получено уменьшение времени электрооптического отклика при возрастании величины электроуправляемого двулучепреломления с увеличением температуры, что позволит повысить быстродействие и глубину фазовой модуляции света.
4. Продемонстрирована возможность, сохраняя заданный фазовый сдвиг света, минимизировать управляющие напряжения и расход материала при разработке электрооптических модуляторов на основе режима деформированного электрическим полем геликоида смектических C^* жидких кристаллов.

Методология и методы исследования.

Для проведения диэлектрических измерений использовался метод интегрирования токов переполаризации на конденсаторе, а для электрооптических - стандартные методики поляризационной микроскопии и спектрометрии в видимой области спектра.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан новый класс смесевых жидких кристаллов, основанный на смешивании компонентов, не образующих полярные фазы в индивидуальном состоянии, и обладающий ферриэлектрическими фазами в широком диапазоне температур, включающем комнатные.
2. В ферриэлектрических жидких кристаллах обнаружен эффект деформированного электрическим полем геликоида и ориентационный эффект Керра.
3. В жидкокристаллических ферриэлектриках температура слияния критических электрических полей, при которых происходит разрушение геликоидальной структуры или переупаковка молекул в смектических слоях, не является критерием наличия фазового

перехода ферриэлектрик-сегнетоэлектрик в отсутствие электрического поля.

4. В ферриэлектрических жидких кристаллах при нагреве растет величина электроуправляемого эффективного двулучепреломления геликоидальной структуры из-за увеличения коэффициента ориентационного эффекта Керра при температурной независимости первого критического электрического поля.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных экспериментальных методик, воспроизводимостью данных, полученных в ходе диэлектрических и электрооптических измерений, непротиворечивостью с результатами, полученными другими научными группами, а также широкой апробацией результатов на профильных конференциях и их публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на 3 всероссийских и 5 международных конференциях:

1. International Conference “Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics with Using of To-Date Achievements of Theoretical Physics” 20-23 April 2021, Moscow, Russia.
2. XXXII Всероссийской школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени профессора А.П. Сухорукова, Москва, 2021.
3. XIX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, Самара, 2021.
4. XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2023», Москва, 2023.
5. I Самарцевские Чтения (ФЭКС/IWQO-2023), Светлогорск, 2023.
6. 31st international conference on advanced laser technologies, Vladivostok, Russia, 2024.
7. XXII Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы, Самара, 2024.
8. XXXII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2025», Москва, 2025.

На XXX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2023», XXII Всероссийской молодежной Самарской конкурс-конференции по оптике, лазерной физике и физике плазмы и на XXXII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2025» результаты работы доложены лично.

Результаты работы получены в рамках проектов РФФИ №20-02-00746 А, №19-52-06005МНТИ_a и в рамках гранта РНФ №23-72-01063.

Личный вклад. Представленные в работе основные результаты получены лично Т.П. Ткаченко или при его ключевом участии, за исключением химического синтеза соединений, используемых в качестве основы для разработки жидкокристаллических смесей. Т.П. Ткаченко самостоятельно разрабатывал составы исследуемых жидкокристаллических смесей (за исключением жидкого кристалла FerriLCM-1-B, разработанного Е.П. Пожидаевым), изготавливал смеси и электрооптические ячейки, проводил диэлектрические и электрооптические измерения, обработку и анализ экспериментальных данных. Т.П. Ткаченко принимал непосредственное участие в написании научных статей, подготовке и представлении докладов на конференциях.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 14 печатных работах, 5 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых в Едином государственном перечне научных изданий — «Белом списке» и в международных базах данных Web of Science и Scopus [A1-A5], одна — в журнале из перечня ВАК [A6], 8 — в тезисах докладов [A7-A14].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 143 страницы, включая 74 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 188 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается выбор темы диссертации и её актуальность: дается краткая классификация жидких кристаллов, история открытия различных полярных фаз смектиков С*, а именно сегнетоэлектрических (СЖК), антисегнетоэлектрических (АСЖК) и ферриэлектрических (ФЖК). Освещаются преимущества полярных фаз жидких кристаллов над неполярными фазами, выявляются и ставятся научные, а также практические проблемы, существующие в области ферриэлектрических фаз смектических С* жидких кристаллов. На этих основаниях формулируются цели и задачи исследования, определяется научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, обосновывается достоверность результатов, указывается личный вклад автора, а также представляются выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена состоянию исследований по тематике диссертационной работы. В **разделе 1.1** приведена структурная классификация наиболее часто исследуемых фаз термотропных жидких кристаллов, а

также диэлектрическая классификация различных полярных фаз смектических C^* жидких кристаллов. В **разделе 1.2** описаны наиболее часто используемые электрооптические эффекты, присущие хиральным смектикам C^* : эффект деформированного геликоида сегнетоэлектрического жидкого кристалла (Deformed helix ferroelectric, DHF) [6] и эффект стабилизированного поверхностью сегнетоэлектрического жидкого кристалла (Surface stabilized ferroelectric liquid crystal, SSFLC) [7]. В **разделе 1.3** рассмотрены вопросы, связанные с практическим использованием жидких кристаллов и обозначены области применения, в которых полярные фазы смектиков C^* имеют преимущества над неполярными фазами. Рассмотрены диапазоны длин волн электромагнитного излучения, на которых используются ЖК, а также описаны следующие электрооптические режимы: плавной безгистерезисной перестройкой уровня серого (V-shape в СЖК и U-shape в АСЖК), режим многоволновой модуляции фазы света (фазовый сдвиг $\Delta\Phi > 2\pi$). Показаны возможности использования полярных фаз на примере генерации аксиально-симметричных вихревых световых полей и в устройствах отображения информации, основанных на использовании электроуправляемых цветов двулучепреломления. **Раздел 1.4** посвящен исследованиям ферриэлектрических жидких кристаллов. Приведены теоретические подходы к описанию различных упаковок ФЖК, экспериментальные способы идентификации ферриэлектрических фаз и известные до начала работы однокомпонентные и многокомпонентные смесевые ФЖК.

Вторая глава посвящена описанию технологических аспектов работы с жидкими кристаллами, и используемых в диссертации методов экспериментальной работы с полярными фазами жидких кристаллов. В **разделе 2.1** приведена технология изготовления электрооптических жидкокристаллических ячеек типа "сендвич". В **разделе 2.2** изложена процедура лабораторного приготовления многокомпонентных жидкокристаллических смесей. В **разделе 2.3** приведена схема экспериментальной установки и описаны методики диэлектрических и электрооптических измерений. В **разделе 2.4** описана оптическая методика определения шага геликоидальной структуры смектических C^* жидких кристаллов.

Третья глава посвящена разработке широкотемпературных ферриэлектрических фаз в смектических C^* жидких кристаллах. В **разделе 3.1** указаны подходы физического материаловедения, руководствуясь которыми выбиралась матрица и различные хиральные добавки (рисунок 1) для разработки смесевых геликоидальных смектиков C^* с возможностью управления их свойствами. В качестве матрицы выбран 5-гексил-2-(4'-пентил-[1,1'-бифенил]-4-ил) пиримидин (ВРР-65). Это ахиральное соединение, обладающее широкотемпературной смектической C фазой с минимальной вращательной вязкостью γ_φ .

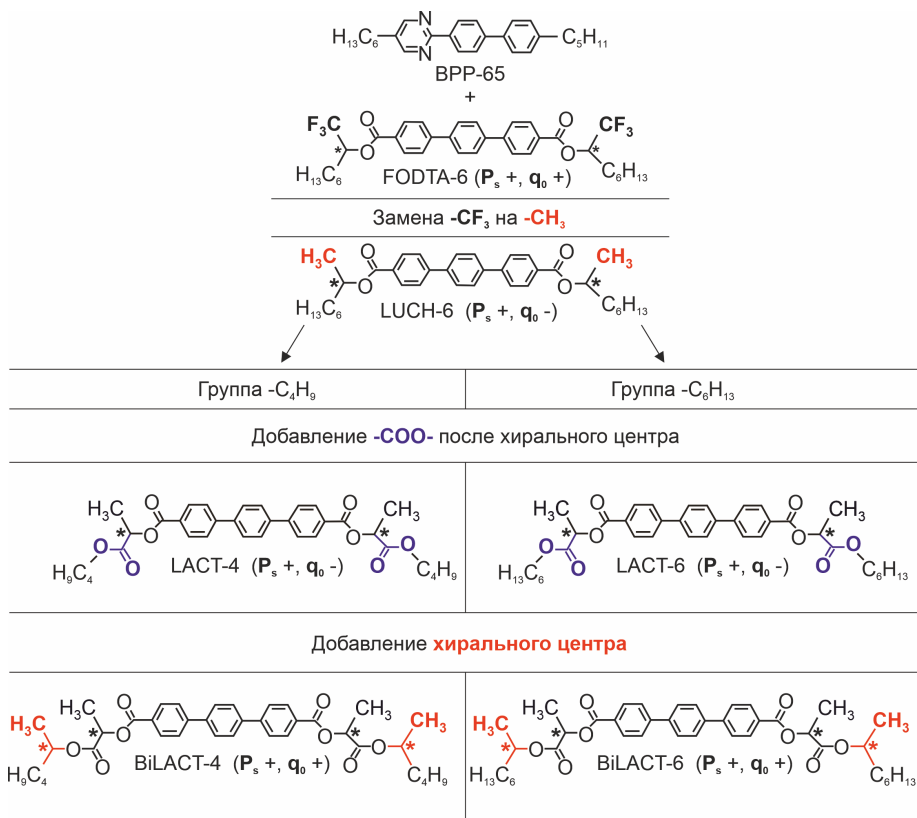


Рисунок 1 — Структурные формулы используемых соединений.

В разделе 3.2 описан жидкокристаллический ферриэлектрик FerriLCM-1В, существующий в широком диапазоне температур (от 21.5 °С до 65 °С). Этот ФЖК, разработанный в Лаборатории оптоэлектронных процессоров ФИАН Пожидаевым Е.П., состоит из матрицы (BPP-65) и одной хиральной добавки (FODTA-6). До начала этой диссертационной работы было известно, что FerriLCM-1В является ферриэлектриком, но он не был детально исследован. Наличие ферриэлектрических фаз в диссертации определялось двумя взаимодополняющими способами: измерением диэлектрической восприимчивости $\chi(T)$ при $E \rightarrow 0$ и $\chi(E)$ при фиксированных T . В зависимости $\chi(T)$ между различными полярными фазами меняется характер поведения диэлектрической восприимчивости, как видно на рисунке 2 а). В зависимости $\chi(E)$ наблюдается один максимум (у СЖК или АСЖК), а в случае ФЖК - по крайней мере два. Электрическое поле, соответствующее максимуму $\chi(E)$, называется критическим E_c . При

этом поле у СЖК происходит разрушение геликоидальной структуры, а у ФЖК - переупаковка между различными молекулярными структурами [8].

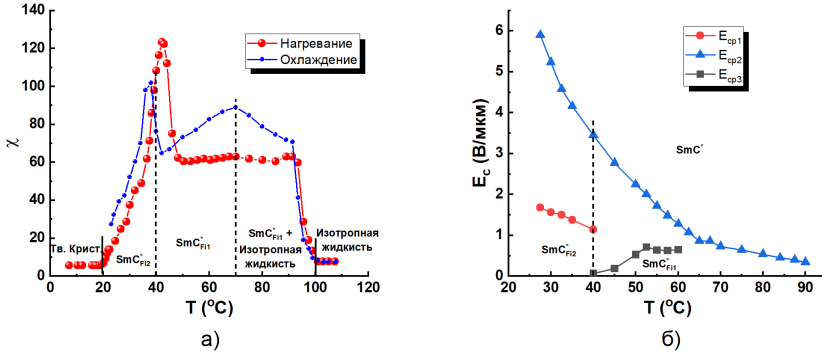


Рисунок 2 — Температурная зависимость: а) диэлектрической восприимчивости χ ; б) критических полей E_c для FerriLCM-1-B.

У FerriLCM-1-B существуют по крайней мере две области температур, при которых одновременно наблюдаются два критических поля E_c : от 21.5°C до 40°C и от 40°C до 65°C (рисунок 2 б)). При электрических полях E_{c1} и E_{c3} происходит переупаковка ферриэлектрических структур, а при E_{c2} - разрушение ферриэлектрических упаковок и образование пространственно-однородного смектика C^* . Значения χ при $E \rightarrow 0$ в полях $E < E_{c1}$ и $E < E_{c3}$ существенно различаются (рисунок 2 а)).

В таблице 1 проведены результаты сравнения параметра $G = \varepsilon_0 \chi G / P_s$ при фиксированной температуре между FerriLCM-1B и известными АСЖК AFLC-036 [9] и СЖК NFLC-4-eut [10]. На основании этих данных был сделан вывод о том, что в диапазоне от 21.5°C до 40°C наблюдается четырехслойная антисегнетоэлектрическая упаковка ферриэлектрика SmC_{F12}^* , а в диапазоне от 40°C до 65°C - трехслойная упаковка ферриэлектрика SmC_{F11}^* . Таким образом, был охарактеризован первый смесевой ферриэлектрический жидкий кристалл, существующий при комнатных температурах.

Таблица 1 — Параметр G для полярных фаз смектиков C^* .

Жидкий кристалл	G , м/В	T , $^{\circ}\text{C}$
NFLC-4-eut	$3.0 \cdot 10^{-7}$	25
FerriLCM-1-B	$4.0 \cdot 10^{-7}$	55
AFLC-036	$2.0 \cdot 10^{-8}$	25
FerriLCM-1-B	$5.8 \cdot 10^{-8}$	27.5

В разделе 3.3 описан выбор хиральной добавки для разработки трехкомпонентной смеси на основе FerriLCM-1B. Для этого были изготовлены 6 двухкомпонентных смесей, содержащих BPP-65 в качестве матрицы (86.7 мол.%). Используемые хиральные добавки показаны на рисунке 1. В смеси FerriLCM-1-D0 содержится добавка FODTA-6, в FerriLCM-1-D1 - LUCH-6, в FerriLCM-1-D2 и FerriLCM-1-D3 - LACT-4 и LACT-6 соответственно, в FerriLCM-1-D4 и FerriLCM-1-D6 - BiLACT-4 и BiLACT-6 соответственно. В смесях определялись температурный диапазон существования сегнетоэлектрической фазы смектика C^* (T_{SmC^*}), спонтанная поляризация $P_s(T)$, угол наклона молекул в смектических слоях $\theta(T)$ и вращательная вязкость $\gamma_\varphi(T)$. Измеренные зависимости экстраполировались на температуру $T = 23$ °C. Определялось наличие (+) или отсутствие (-) шага геликоида p_0 . Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Сравнение экстраполированных свойств исследуемых смесей при $T = 23$ °C.

Характеристика	FerriLCM-1-					
	-D0	-D1	-D2	-D3	-D4	-D5
P_s , нКл/см ²	93.2	32.5	73.2	47.4	72.4	54.1
θ , °	34.0	28.4	35.9	32.1	36.2	30.6
γ_φ , Па·с	0.18	0.22	0.36	0.20	0.45	0.28
T_{SmC^*} , °C	42	45	48	45	46	66
$\frac{\gamma_\varphi \cdot T_{SmC^*}}{(P_s \theta)^2} \cdot 10^{-6}$,	0.7	12	2.5	3.8	3.0	6.7
p_0	+	+	-	-	+	+

Смесь FerriLCM-1-D0 является аналогом FerriLCM-1B, но с другим мольным соотношением компонентов и была сделана для сравнения хиральных добавок между собой. Использован сравнительный параметр $\gamma_\varphi T_{SmC^*} / (P_s \theta)^2$, содержащий все важные с практической точки зрения характеристики (таблица 2). По этому параметру выделяются смеси FerriLCM-1-D2 и FerriLCM-1-D4, содержащие хиральные добавки LACT-4 и BiLACT-4. Эти хиральные добавки были выбраны для изготовления трехкомпонентной смеси на основе FerriLCM-1B.

В разделе 3.4 исследованы разработанные трехкомпонентные широкотемпературные ферриэлектрические жидкие кристаллы с оптимизированными по сравнению с FerriLCM-1B свойствами. Были разработаны две смеси: FerriLCM-1 и FerriLCM-1-V2, содержащие в составе BPP-65/FODTA-6/LACT-4 и BPP-65/FODTA-6/BiLACT-4 соответственно. Мольное соотношение BPP-65/FODTA-6 равно 2.15, а соотношение BPP-65 к хиральным добавкам LACT-4 и BiLACT-4 - 6.5. Таким образом, в разработанных трехкомпонентных смесях FerriLCM-1 и FerriLCM-1-V2

одинаковое молярное соотношение компонентов, а молярный состав смесей - 61.8 мол. % (BPP-65), 28.7 мол. % (FODTA-6), 9.5 мол. % (LACT-4 или BiLACT-4).

На рисунке 3 показаны зависимости критических полей от температуры. В смеси FerriLCM-1-V2, так же как и у двухкомпонентной FerriLCM-1-B, наблюдаются два критических поля E_{cp1} и E_{cp3} при электрических полях меньших, чем E_{cp2} (рисунок 3 а)). Если для идентификации типа полярной фазы использовать параметр G и способ, описанный в разделе 3.2, можно предположить, что при $E < E_{cp1}$ наблюдается антисегнетоэлектрическая упаковка SmC_{F12}^* , а при $E < E_{cp3}$ - ферриэлектрическая упаковка SmC_{F11}^* [11]. У FerriLCM-1 критические поля гораздо меньше по величине, как и температура слияния пиков T_{merg} . Кроме того, в этой смеси наблюдается только одна ферриэлектрическая фаза SmC_{F11}^* (рисунок 3 б)).

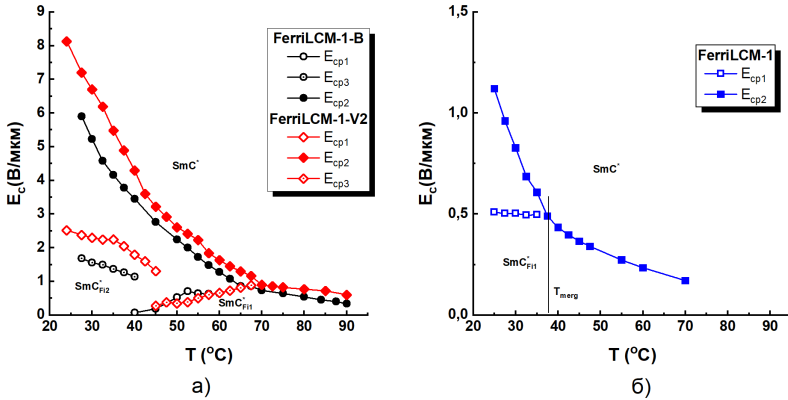


Рисунок 3 — Температурные зависимости критических электрических полей E_c : а) для FerriLCM-1-B и FerriLCM-1-V2; б) для FerriLCM-1.

Таким образом, в смесях на основе неполярного жидкого кристалла (BPP-65), немезогенной хиральной добавки FODTA-6 и хиральных добавок LACT-4, BiLACT-4, выбранных в качестве третьих компонентов, наблюдаются широкотемпературные ферриэлектрические фазы, существующие в том числе при комнатных температурах. На основании этого результата сформулировано первое защищаемое положение.

Изменение величин критических полей происходит из-за разных шагов геликоида в смесях. Критическое электрическое поле определяется формулой 1 [6]. Уменьшение p_0 должно вести к увеличению критического поля, а увеличение - к уменьшению.

$$E_c = \frac{\pi^2 K \sin^2 \theta q_0^2}{16 P_s} = \frac{\pi^4 K \sin^2 \theta}{4 P_s p_0^2} \quad (1)$$

где K - модуль упругости.

На рисунке 4 а) показаны зависимости шага геликоида от температуры для смесей FerriLCM-1-B, FerriLCM-1 и FerriLCM-1-V2. Видно, что все исследуемые жидкие кристаллы обладают субволновым шагом геликоида при комнатных температура ($p_0 < \lambda/5$). Это позволило в дальнейшем использовать приближения кристаллооптики для описание их электрооптических свойств. В FerriLCM-1 шаг геликоида существенно больше, чем в других рассматриваемых смесях. Это достигнуто за счет использования в составе ФЖК двух хиральных добавок (FODTA-6 и LACT-4) с разными знаками волновых векторов (рисунок 1). В случае FerriLCM-1-V2 использование двух хиральных добавок с одинаковым знаком q_0 привело к уменьшению шага геликоида относительно двухкомпонентной смеси FerriLCM-1-B.

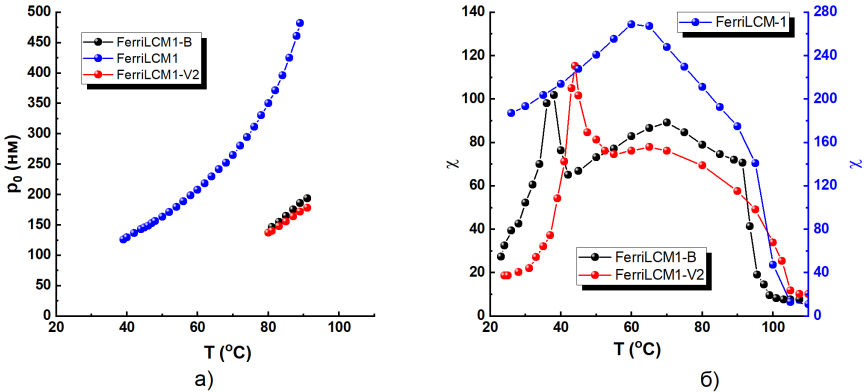


Рисунок 4 — Температурные зависимости: а) шага геликоидальной структуры p_0 ; б) диэлектрической восприимчивости χ при $E = 0.1$ В/мкм.

Значение χ описывается формулой 2 [12]. В этом уравнении, как и в случае E_c (уравнение 1), присутствует q_0^2 . Но, в отличие от E_c , уменьшение шага геликоида ведет к снижению величины χ .

$$\chi = \frac{P_s^2}{2\varepsilon_0 K \sin^2 \theta q_0^2} + \chi_\infty = \frac{P_s^2 p_0^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 K \sin^2 \theta} + \chi_\infty \quad (2)$$

На рисунке 4 б) показана зависимость диэлектрической восприимчивости от температуры, измененная при $E = 0.1$ В/мкм. Величина χ у смеси FerriLCM-1 примерно в 3 раза выше, чем у остальных исследуемых смесей, а у FerriLCM-1-V2 χ меньше, чем у FerriLCM-1-B. Разница в величинах

$\chi(T)$ и $E_c(T)$ в смесях FerriLCM-1-B, FerriLCM-1-V2 и FerriLCM-1 хорошо объясняется различием именно шага геликоида. Такое сравнение стало возможно благодаря близким величинам $P_s(T)$ и $\theta(T)$ в исследуемых смесях.

В смеси FerriLCM-1-V2 переход между фазами $\text{SmC}_{\text{F12}}^* \rightarrow \text{SmC}_{\text{F11}}^*$ наблюдается при больших температурах, чем у FerriLCM-1-B. Толщина смектического слоя l_0 составляет ~ 3.5 нм. Если угол φ между соседними смектическими слоями будет 22.5 градуса (что весьма много), в одном шаге геликоида обычного СЖК будет содержаться 16 смектических слоев, а p_0 будет равен 56 нм. Упаковка обычной антисегнетоэлектрической фазы будет составлять 7 нм, фазы $\text{SmC}_{\text{F11}}^*$ - 10.5 нм, а $\text{SmC}_{\text{F12}}^*$ - 14 нм. Таким образом, при экстраполяции $p_0(T)$ смесей FerriLCM-1-B и FerriLCM-1-V2 на более низкие температуры, шаг геликоида становится соизмерим по величине с упаковкой различных фаз. Чтобы трехслойная упаковка фазы $\text{SmC}_{\text{F11}}^*$ образовала 1 шаг геликоида, требуется минимум 12 смектических слоев, шаг при этом составит 42 нм. В зависимости от вида экстраполяции, ограничение в 42 нм наступит как раз в диапазоне температур 40-50 °С, что может быть причиной переупаковки между ферриэлектрическими фазами. Так как p_0 у FerriLCM-1-V2 меньше, чем у FerriLCM-1-B, то и фазовый переход $\text{SmC}_{\text{F12}}^* \rightarrow \text{SmC}_{\text{F11}}^*$ будет происходить при более высоких температурах.

Приведенный результат обладает новизной и позволяет управлять типом ферриэлектрической упаковки за счет изменения шага геликоида. Уменьшение p_0 в трехкомпонентной смеси FerriLCM-1-V2 привело к увеличению диапазона существования ферриэлектрической фазы $\text{SmC}_{\text{F12}}^*$ на 7 °С относительно FerriLCM-1-B. В смеси FerriLCM-1 p_0 был существенно увеличен, что привело к исчезновению $\text{SmC}_{\text{F12}}^*$ фазы и наблюдению только одной $\text{SmC}_{\text{F11}}^*$ фазы.

В четвертой главе приведено исследование электрооптических свойств широкотемпературных ферриэлектрических фаз смектических C^* жидких кристаллов. В **разделе 4.1** обнаружен эффект деформации геликоида и квадратичный электрооптический эффект в ФЖК. На рисунке 5 приведены полевые зависимости поляризации, угла отклонения главной оптической оси ψ_d , а также диэлектрической восприимчивости и времен электрооптического отклика $\tau_{0.1-0.9}$ ФЖК FerriLCM-1-V2.

Измерения произведены при двух температурах ($T = 24$ °С и $T = 55$ °С), соответствующих фазам $\text{SmC}_{\text{F12}}^*$ и $\text{SmC}_{\text{F11}}^*$ соответственно. До первого критического поля в обеих фазах $P(E)$ и $\psi_d(E)$ растут линейно, а величины χ_G и $\tau_{0.1-0.9}$ не зависят от электрического поля, что говорит об обнаружении DHF-эффекта в ферриэлектрических жидких кристаллах. Аналогичное электрооптическое поведение демонстрирует и FerriLCM-1.

В ферриэлектрическом ЖК FerriLCM-1 обнаружена безистерезисная непрерывная модуляция светопропускания в режиме V-shape (рисунок 6 а)), как и в сегнетоэлектрической C^* фазе [13]. На рисунке 6 б)

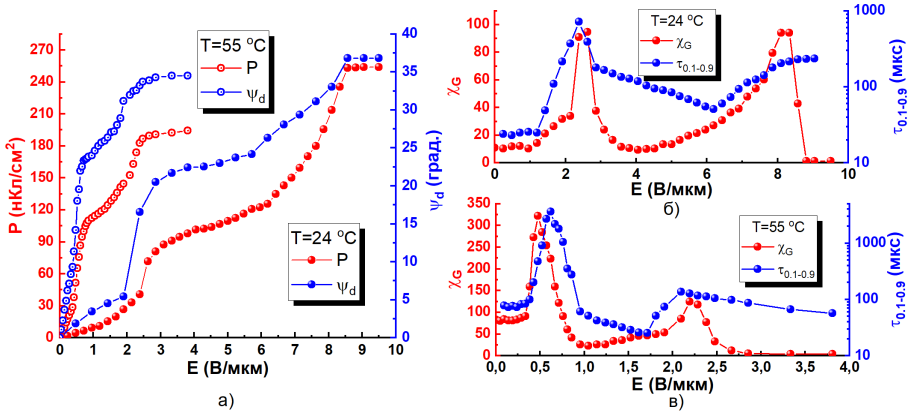


Рисунок 5 — Полевые зависимости FerrLCM-1-V2: а) поляризации P и угла отклонения главной оптической оси ψ_d , а также зависимости диэлектрической восприимчивости χ_G и времени электрооптического отклика $\tau_{0.1-0.9}$ при: б) $T = 24^\circ\text{C}$; в) $T = 55^\circ\text{C}$.

показано измерение светопропускания T_{cell} слоя FerrLCM-1 толщиной $d = 107$ мкм. Видно, что при электрических полях $E < 0.7$ В/мкм обеспечивается фазовый сдвиг в 8π . В СЖК NFLC-4-eut [10] такой же фазовый сдвиг обеспечивается при электрических полях $E > 3$ В/мкм, а при $E \sim 0.7$ В/мкм фазовый сдвиг не достигает даже π .

По положениям экстремумов светопропускания была определена величина электроуправляемого двулучепреломления Δn_{eff}^E и, так как зависимость Δn_{eff}^E оказалась квадратичной по электрическому полю (обнаружен ориентационный эффект Керра [14] в ФЖК), определена величина коэффициента ориентационного эффекта Керра $K_{\text{кerr}}$. При реакции ФЖК

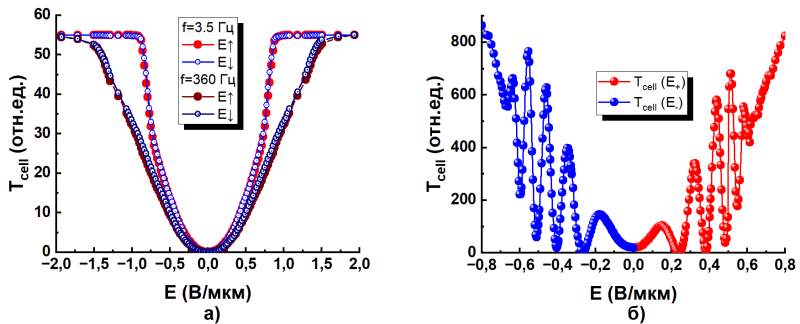


Рисунок 6 — Электрооптическое переключение ФЖК FerrLCM-1: а) плавный безгистерезисный режим V-shape; б) многоволновая ($\Delta\Phi > 2\pi$) непрерывная фазовая модуляция света, $\lambda = 532$ нм.

на положительную полярность сигнала $K_{\text{kerr}} = 134 \text{ нм/В}^2$, а на отрицательную полярность - $K_{\text{kerr}} = 115 \text{ нм/В}^2$. На основании вышеизложенного сформулировано второе защищаемое положение, результаты **раздела 4.1** опубликованы в статье [A1].

В **разделе 4.2** приведены результаты исследований по влиянию формы сигнала и частоты электрического поля на свойства ферриэлектрического жидкого кристалла FerriLCM-1. Обнаружено, что первое критическое поле $E_{\text{ср1}}$ не зависит от формы управляющего напряжения, в отличие от второго критического поля $E_{\text{ср2}}$. Обнаружена сильная частотная зависимость $E_{\text{ср1}}$ в диапазоне частот 1 Гц - 10^3 Гц (рисунок 7 а)). В **разделе 4.3** описано влияние толщины слоя ФЖК на его диэлектрические свойства. Показано, что величина χ сильно возрастает при увеличении толщины слоя ФЖК (рисунок 7 б)): от 70 при $d = 1.85 \text{ мкм}$ до 173 при $d = 57 \text{ мкм}$, а $E_{\text{ср1}}$ уменьшается: от 0.98 В/мкм при $d = 1.85 \text{ мкм}$ до 0.38 В/мкм при $d = 57 \text{ мкм}$. Изложенные в **разделах 4.2 и 4.3** результаты опубликованы в статье [A2].

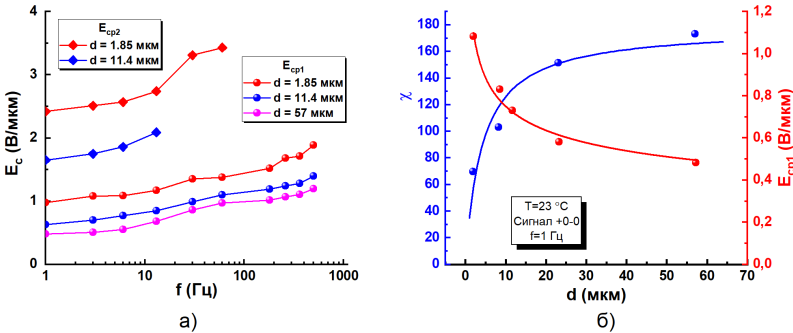


Рисунок 7 — Частотно-толщинные характеристики FerriLCM-1: а) $E_{\text{ср1}}(f)$ и $E_{\text{ср2}}(f)$; б) $\chi(d)$ и $E_{\text{ср1}}(d)$, $f = 1 \text{ Гц}$.

В **разделе 4.4** обсуждается вопрос о наличии фазового перехода ферриэлектрик - сегнетоэлектрик по температуре T_{merg} , при которой происходит слияние двух критических полей в ферриэлектриках. Показано, что в FerriLCM-1 при $E < E_{\text{ср1}}$ (до слияния порогов, $T < T_{\text{merg}}$) и при $E < E_c$ (после слияния порогов, $T > T_{\text{merg}}$) наблюдаются монотонные температурные зависимости $K_{\text{kerr}}(T)$, $\tau_{0.1-0.9}(T)$. В совокупности с поведением $\chi(T)$ это указывает на отсутствие изменения молекулярной упаковки при T_{merg} . Также была измерена зависимость температуры «слияния» критических полей в зависимости от частоты электрического поля (рисунок 8). При увеличении частоты электрического поля с 1 Гц до 50 Гц T_{merg} увеличивается почти на $5 \text{ }^\circ\text{C}$ при электрических полях $\sim 1 \text{ В/мкм}$.

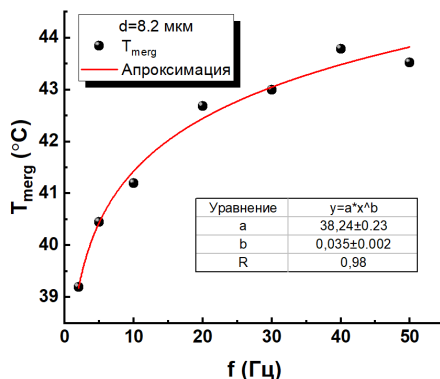


Рисунок 8 — Зависимость температуры «слияния» T_{merg} критических электрических полей $E_{\text{ср1}}$ и $E_{\text{ср2}}$ для 8.2 мкм слоя ЖКФ FerriLCM-1 от частоты электрического поля.

На основании вышеизложенных данных был сделан вывод о том, что в FerriLCM-1 температура T_{merg} не свидетельствует о фазовом переходе ФЖК-СЖК (3 защищаемое положение), а ферриэлектрическая фаза наблюдается до фазового перехода в изотропную жидкость при $T_c = 100$ °С. Таким образом, в разработанных жидкокристаллических ферриэлектриках не обнаружено ни сегнетоэлектрических, ни антисегнетоэлектрических фаз, что обладает новизной, так как ранее ФЖК считались исключительно промежуточными фазами между СЖК и АСЖК. Изложенные в **разделе 4.4** результаты опубликованы в статьях [А3; А6].

В **пятой главе** приведено сравнение ферриэлектрических и сегнетоэлектрических жидких кристаллов для задач фазовой модуляции света в режиме деформированного геликоида. В **разделе 5.1** приведены основные характеристики исследуемых смектических S^* жидких кристаллов, а именно зависимости $P_s(T)$, $\theta(T)$, $\chi(T)$, $p_0(T)$. В **разделе 5.2** обсуждаются критерии окончания эффекта деформированного геликоида по величине электрических полей и обосновывается целесообразность ограничивать диапазон существования DHF-эффекта по критерию $\chi_G \approx \text{const}$, $E_{\text{DHF}} \approx 0.8 \cdot E_c$. Также в разделе обсуждаются ограничения по величине максимально достижимого электроуправляемого двулучепреломления геликоидальных структур $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}})$ в DHF-эффекте.

В **разделе 5.3** проведено сравнение температурных зависимостей $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}})$ для двух СЖК (FLC-576 и FLC-587-F7) и двух ФЖК (FerriLCM-1 и FerriLCM-2). Так как во всех этих фазах наблюдается ориентационный эффект Керра, то, согласно уравнению 3, величина $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}}, T)$ будет определяться видом температурных зависимостей $K_{\text{kerr}}(T)$ и $E_{\text{DHF}}(T)$.

$$\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}}, T) = K_{\text{kerr}}(T)\lambda E_{\text{DHF}}^2(T) \quad (3)$$

Экспериментально измеренные температурные зависимости коэффициента ориентационного эффекта Керра K_{kerr} для смесей FLC-576, FLC-587-F7, FerriLCM-1 и FerriLCM-2 показаны на рисунке 9. Показано, что качественно зависимости $K_{\text{kerr}}(T)$ одинаковы для всех четырех смесей (рисунок 9 а)), хотя количественные значения различаются на порядок (рисунок 9 б)). Отдельно стоит отметить величину K_{kerr} у FerriLCM-1, которая достигает значения почти в $1600 \text{ нм}/\text{В}^2$, что делает этот материал самым чувствительным к электрическому полю, среди всех известных термотропных жидких кристаллов.

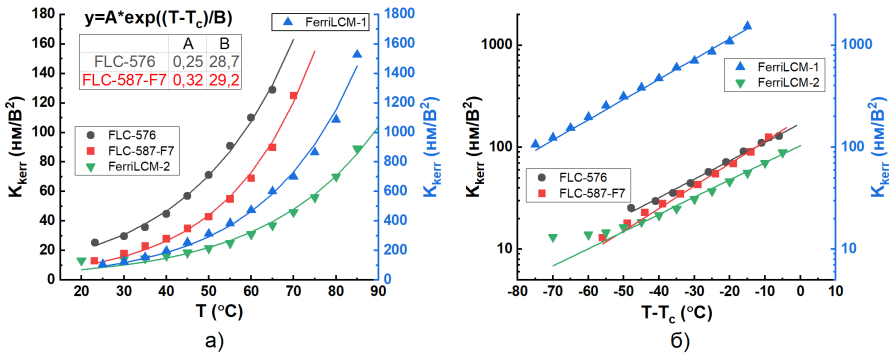


Рисунок 9 — Температурные зависимости коэффициента ориентационного эффекта Керра K_{kerr} исследуемых сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов: а) в линейном масштабе; б) в логарифмическом масштабе K_{kerr} , температурная шкала нормирована на температуру фазового перехода в параэлектрическую фазу T_c , $\lambda = 532 \text{ нм}$.

В зависимостях критических электрических полей $E_c(T)$ наблюдаются как качественные, так и количественные различия между ФЖК и СЖК. У сегнетоэлектрических жидких кристаллов критическое поле экспоненциально уменьшается с ростом температуры. Вид уравнения для аппроксимации и используемые коэффициенты показаны на рисунке 10 а). В ферриэлектрических смесях FerriLCM-1 и FerriLCM-2 значение критического поля E_{cp1} практически не зависит от температуры, пока не происходит слияния с E_{cp2} при T_{merg} . При $T > T_{\text{merg}}$ зависимость критического поля от температуры хорошо аппроксимируется экспоненциальным уравнением, описывающим поведение E_{cp2} при $T < T_{\text{merg}}$ (рисунок 10 б)).

На рисунке 11 а) представлены максимально достижимые значения электроуправляемого эффективного двулучепреломления $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}}, T)$ в

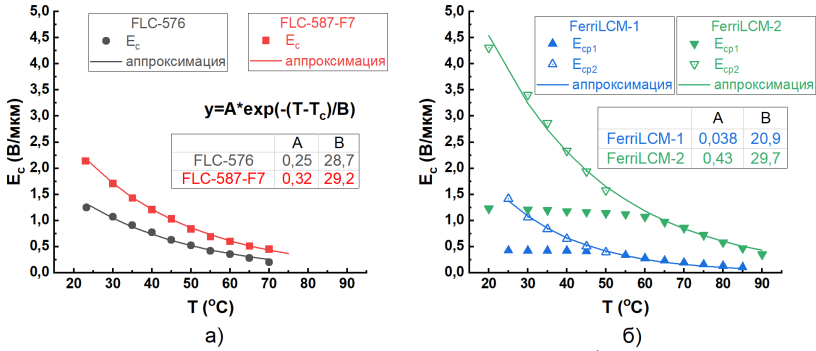


Рисунок 10 — Температурные зависимости: а) критического электрического поля E_c для сегнетоэлектрических жидких кристаллов FLC-576 и FLC-587-F7; б) критических электрических полей E_{cp1} и E_{cp2} для ферриэлектрических жидких кристаллов FerriLCM-1 и FerriLCM-2.

DHF-режиме, которые принципиально отличаются для сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов. Максимальное значение $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}}, T)$ для ферриэлектрического жидкого кристалла FerriLCM-1 наблюдается при температуре $T = 50$ °C. Вплоть до этой температуры значение $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}}, T)$, согласно уравнению 3, увеличивается из-за роста $K_{\text{kerr}}(T)$ при постоянстве $E_c(T)$. При больших температурах величина $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}}, T)$ начинает убывать, так как уменьшение $E_c^2(T)$ происходит быстрее, чем рост $K_{\text{kerr}}(T)$. Аналогичное поведение наблюдается для FerriLCM-2. На основании этого результата выдвинуто четвертое защищаемое положение. Для СЖК FLC-576 и FLC-587-F7 значение $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}}, T)$ уменьшается почти экспоненциально с повышением температуры.

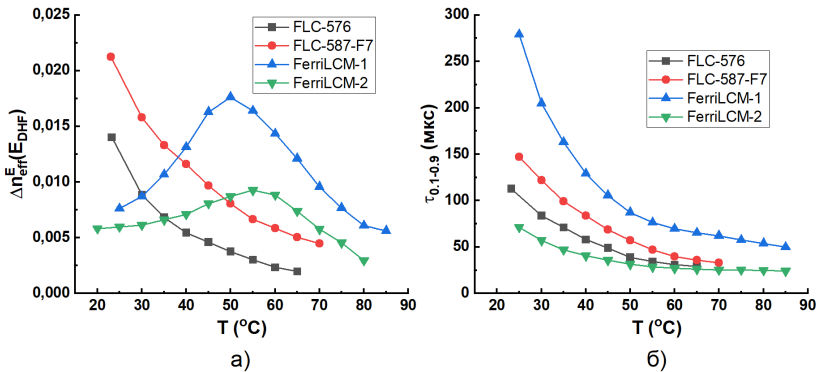


Рисунок 11 — Температурные зависимости: а) максимально достижимого электроуправляемого эффективного двулучепреломления в DHF-эффекте $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{DHF}})$; б) времен электрооптического отклика $\tau_{0,1-0,9}$.

Таким образом, ФЖК являются единственными жидкокристаллическими материалами, в которых возможен рост величины электроуправляемого двулучепреломления (а значит и глубины фазовой модуляции) при одновременном уменьшении времени электрооптического отклика (рисунок 11 б)).

В разделе 5.4 описаны возможности по оптимизации толщин слоев СЖК и ФЖК в электрооптических ячейках и частот управляющих напряжений для обеспечения требуемой величины фазового сдвига. Частотная зависимость $K_{\text{kerr}}(f)$ хорошо описывается уравнением 4, связывающим K_{kerr} и χ_G . Но зависимость $E_{\text{ср1}}(f)$ обладает гораздо большей дисперсией (рисунок 12), чем должно быть теоретически (расчет по уравнению 5). В области частот от 1 Гц до 100 Гц χ_G уменьшается на 6 %, в то время как $E_{\text{ср1}}(f)$ возрастает более чем в 2 раза.

$$K_{\text{kerr}}(f) = \frac{\Delta n}{\lambda} \frac{2 + \tan^2 \theta}{8} \frac{\sin^2 2\theta}{1 - \frac{3}{2} \sin^2 \theta} \left(\frac{\varepsilon_0 \chi_G(f)}{P_s} \right)^2 \quad (4)$$

$$E_{\text{ср1}}(f) = \frac{\pi^2}{32} \frac{P_s}{\varepsilon_0 \chi_G(f)} \quad (5)$$

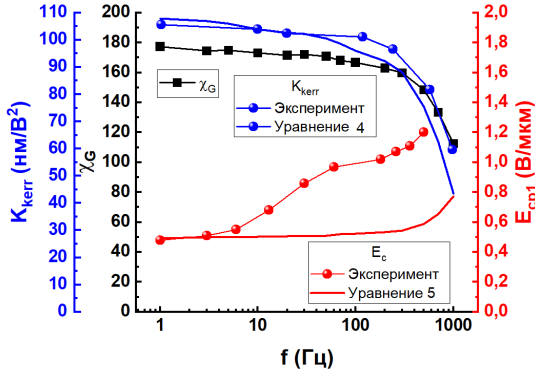


Рисунок 12 — Частотные зависимости характеристик FerriLCM-1: диэлектрической восприимчивости $\chi_G(f)$, коэффициента ориентационного эффекта Керра $K_{\text{kerr}}(f)$ и критического поля $E_{\text{ср1}}$ при $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $d = 57 \text{ мкм}$.

Данное несовпадение может быть связано с тем, что теория, согласно которой получено уравнение 5 предполагает непрерывную раскрутку геликоидальной структуры в пространственно-однородное состояние [15]. В эксперименте же наблюдается разрушение геликоида и образование доменов разных типов.

При учете результатов, описанных в главе 4, а именно наличие сильной зависимости χ_G и $E_{\text{ср1}}$ от толщины слоя жидкого кристалла (рисунок 7), можно утверждать, что и диэлектрическая восприимчивость, и критическое поле разрушения геликоидальной структуры при фиксированной температуре будут функциями двух величин: $\chi_G(d, f)$ и $E_{\text{ср1}}(d, f)$. Зависимости $E_{\text{ср1}}(d, f)$ и $\chi_G(d, f)$ нелинейны во всем диапазоне толщин и частот электрических полей, причем характер нелинейности существенно различен. Можно написать эмпирические уравнения 6 и 7, полученные на основе экспериментальных данных. Значения $E_c^{d \rightarrow \infty, f \rightarrow 0}$ и $\chi_G^{d \rightarrow \infty, f \rightarrow 0}$ имеют смысл экстраполяции на бесконечную толщину слоя ЖК (когда влияние поверхности отсутствует) при частоте электрического поля, стремящейся к 0. Значения $E_c^{d \rightarrow d_c, f \rightarrow 0}$ и $\chi_G^{d \rightarrow d_c, f \rightarrow 0}$ имеют смысл экстраполяции на критическую толщину слоя ЖК d_c , при которой происходит разрушение геликоидальной структуры под действием поверхностных сил.

$$E_c(d, f) = \left(E_c^{d \rightarrow \infty, f \rightarrow 0} - A \cdot e^{-d/d_1} \right) + a(d) \cdot \sqrt{f} \quad (6)$$

$$\chi_G(d, f) = \frac{\chi_G^{d \rightarrow \infty, f \rightarrow 0} - B \cdot e^{-d/d_2}}{1 + b(d) \cdot f} \quad (7)$$

где $A = E_c^{d \rightarrow \infty, f \rightarrow 0} - E_c^{d \rightarrow d_c, f \rightarrow 0}$, $B = \chi_G^{d \rightarrow \infty, f \rightarrow 0} - \chi_G^{d \rightarrow d_c, f \rightarrow 0}$, $a(d) = 3.4 \cdot 10^{-2} + 7 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-d/d_2}$, $b(d) = 4.6 \cdot 10^{-4} + 1.9 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-d/6}$.

По уравнениям 6 и 7, согласно закону Керра (уравнение 5) и используя соотношение $E_{\text{ДНФ}} = 0.8E_c$, рассчитана зависимость $\Delta n_{\text{эф}}^E(E_{\text{ДНФ}}, d, f)$ (рисунок 13 а)).

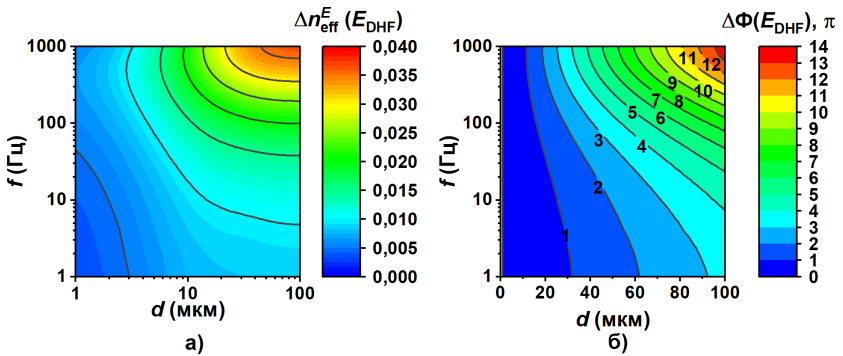


Рисунок 13 — Расчетные значения величин: а) достижимого электроуправляемого двулучепреломления в режиме DHF $\Delta n_{\text{эф}}^{\text{max}}(E_{\text{ДНФ}})$; б) достигаемого фазового сдвига $\Delta\Phi$ для FerriLCM-1 при разных частотах электрического поля f и толщинах слоя жидкого кристалла d .

Для задач фазовой модуляции света важно обеспечивать определенный фазовый сдвиг $\Delta\Phi$, определяемый уравнением 8.

$$\Delta\Phi(E) = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}^E(E)d}{\lambda} \quad (8)$$

На рисунке 13 б) приведена расчетная величина фазового сдвига $\Delta\Phi(f,d)$ для ферриэлектрического жидкого кристалла FerriLCM-1. Учет влияния f и d при определении $\Delta n_{\text{eff}}^E(E_{\text{ДНФ}})$ показывает, что, например, фазовый сдвиг в 4π можно достичь при $d = 100$ мкм, $f = 10$ Гц, или при $d = 32$ мкм, $f = 900$ Гц, что снизит объем расходуемого жидкого кристалла на 68 %. При этом управляющее напряжение снизится примерно на 17%, с 47 В до 39 В. Результаты этого подраздела справедливы не только для ферриэлектрических жидких кристаллов, но и для сегнетоэлектрических и антисегнетоэлектрических жидких кристаллов, переключающихся в режиме деформированного электрическим полем геликоида. Изложенные в **пятой главе** результаты опубликованы в статьях [A4; A5].

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработан новый класс смесевых ферриэлектрических жидких кристаллов, основанный на смешивании ахирального неполярного смектического С жидкого кристалла (5-гексил-2-(4'-пентил-[1,1'-бифенил]-4-ил)пиримидина) и хиральных немезофазных соединений. В таких смесях ферриэлектрические фазы существуют при комнатных температурах (20 °С) и обладают широким диапазоном существования более 80 °С.
2. В разработанном ферриэлектрическом жидком кристалле FerriLCM-1 обнаружен самый высокий коэффициент ориентационного эффекта Керра среди всех известных смектических С* жидких кристаллов, достигающий величины в 1550 нм/В² при времени отклика 50 мкс. Электрооптический отклик происходит в режиме деформированного электрическим полем геликоида, который характеризуется независимостью времени переключения от величины электрического поля и толщины слоя жидкого кристалла.
3. Продемонстрировано, что в жидкокристаллических ферриэлектриках критические электрические поля, при которых происходит разрушение геликоидальной структуры или переупаковка молекул в смектических слоях, сближаются с ростом температуры. При этом температура слияния критических электрических полей не является критерием наличия фазового перехода ферриэлектрик-сегнетоэлектрик, так как она возрастает на 5 °С при повышении частоты электрического поля с 1 Гц до 50 Гц.

4. Показано, что в разработанных ферриэлектрических жидких кристаллах первое критическое электрическое поле, при котором происходит разрушение геликоидальной структуры, не зависит от температуры, в то время как коэффициент ориентационного эффекта Керра с ростом температуры увеличивается. Для FerriLCM-1 это приводит к росту величины максимально достижимого электроуправляемого двулучепреломления (с 0.010 до 0.022) при одновременном уменьшении времени отклика (с 270 мкс до 90 мкс) при нагреве от комнатной температуры до 50 °С, что позволяет одновременно повысить быстродействие и глубину модуляции фазы.

Публикации автора по теме диссертации

В периодических научных изданиях, индексируемых в Едином государственном перечне научных изданий — «Белом списке» и в международных базах данных Web of Science и Scopus

- A1. *Pozhidaev, E. P.* Broad temperature range ferrielectric liquid crystal as a highly sensitive quadratic electro-optical material / E. P. Pozhidaev, M. V. Minchenko, A. V. Kuznetsov, T. P. Tkachenko, V. A. Barbashov // *Optics Letters*. — 2022. — Vol. 47, no. 7. — P. 1598—1601.
- A2. *Барбашов, В. А.* Влияние толщины ячейки и формы сигнала на частотные дисперсии диэлектрических характеристик ферриэлектрического жидкого кристалла / В. А. Барбашов, Т. П. Ткаченко, Е. П. Пожидаев // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. — 2024. — Т. 24, № 3. — С. 42—51.
- A3. *Tkachenko, T. P.* Broad temperature range ferrielectric liquid crystal: Temperature dependencies of dielectric and electro-optical properties / T. P. Tkachenko, V. A. Barbashov, M. V. Minchenko, E. P. Pozhidaev // *Optical Materials*. — 2024. — Vol. 156. — P. 115966.
- A4. *Ткаченко, Т. П.* Влияние молекулярного строения ферриэлектрических жидкокристаллических смесей на их электрооптические свойства / Т. П. Ткаченко, В. А. Барбашов, Е. П. Пожидаев // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. — 2025. — Т. 25, № 1. — С. 37—46.
- A5. *Barbashov, V. A.* Temperature dependencies of electrically controlled birefringence in the deformed helix ferroelectric mode of ferroelectric and ferrielectric liquid crystals. / V. A. Barbashov, T. P. Tkachenko, E. P. Pozhidaev // *Optical Materials*. — 2025. — Vol. 168. — P. 117408.

В изданиях из перечня ВАК

- А6. *Ткаченко, Т. П.* Широкотемпературный ферриэлектрический жидкий кристалл как квадратичная электрооптическая среда нового поколения / Т. П. Ткаченко, М. В. Минченко, В. А. Барбашов, С. И. Торгова, Е. П. Пожидаев // Ученые записки физического факультета московского университета. — 2022. — № 7. — С. 2341108.

В сборниках трудов конференций

- А7. *Kuznetsov, A.* Broad temperature range ferrielectric liquid crystal with subwavelength helix pitch / A. Kuznetsov, M. Minchenko, T. Tkachenko, E. Pozhidaev // International Conference «Advanced Element Base of Micro- and Nano-Electronics with Using of To-Date Achievements of Theoretical Physics» 20-23 April 2021, Moscow, Russia. — 2021.
- А8. *Кузнецов, А.* Квадратичный ориентационный электрооптический эффект в ферриэлектрическом жидком кристалле с субволновым шагом спиральной структуры / А. Кузнецов, Т. Ткаченко, Е. Пожидаев, М. Минченко // Сборник трудов XXXII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» имени профессора А.П. Сухорукова 6-11 июня 2021 года. — 2021.
- А9. *Кузнецов, А.* Квадратичный электрооптический эффект в ферриэлектрическом жидком кристалле / А. Кузнецов, М. Минченко, Т. Ткаченко, Е. Пожидаев // XIX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции. — 2021.
- А10. *Ткаченко, Т.* Широкотемпературный ферриэлектрический жидкий кристалл как квадратичная электрооптическая среда нового поколения / Т. Ткаченко, А. Кузнецов, А. Жукович-Гордеева // XXX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2023». Секция «Физика». Сборник тезисов. — 2023.
- А11. *Котова, С.* Генерация вихревых световых полей с помощью секторной спиральной пластины на основе сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов / С. Котова, Е. Пожидаев, С. Самагин, Т. Ткаченко // I Самарцевские Чтения (ФЭКС/IWQO-2023): Сборник тезисов. — 2023.
- А12. *Kotova, S.* The generation of vortex light fields using a sector spiral plate based on ferroelectric and ferrielectric liquid crystals / S. Kotova, E. Pozhidaev, S. Samagin, T. Tkachenko // Book of abstracts the 31st international conference on advanced laser technologies. — 2024.

- A13. *Ткаченко, Т.* Электрооптические свойства широкотемпературного ферриэлектрического жидкого кристалла / Т. Ткаченко, В. Барбашов, М. Минченко, Е. Пожидаев // XXII Всероссийская молодежная Самарская конкурс-конференция по оптике, лазерной физике и физике плазмы: сборник тезисов (Самара, 12–16 ноября 2024 г.) [Электронное издание]. — 2024.
- A14. *Ткаченко, Т.* Температурные зависимости электроиндуцируемого эффективного двулучепреломления геликоидальных структур в сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллах / Т. Ткаченко, В. Барбашов, Е. Пожидаев // XXXII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов—2025». Секция «Физика». Сборник тезисов. — 2025.

Список литературы

1. *Dierking, I.* Textures of Liquid Crystals / I. Dierking. — WILEY-VCH Verlag, 2003. — 218 с.
2. *Meyer, R. B.* Ferroelectric liquid crystals / R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, P. Keller // Journal de Physique Lettres. — 1975. — Т. 36, вып. 3. — С. 69–71.
3. *Chandani, A. D. L.* Antiferroelectric Chiral Smectic Phases Responsible for the Trislable Switching in МНРОВС / A. D. L. Chandani, E. Gorecka, Y. Ouchi, H. Takezoe, A. Fukuda // Japanese Journal of Applied Physics. — 1989. — Т. 28. — С. L1265–L1268.
4. *Lee, J.* Phase transitions among paraelectric, ferroelectric, ferrielectric and antiferroelectric phases in a chiral smectic liquid crystal / J. Lee, Y. Ouchi, H. Takezoe, A. Fukuda, W. J. // Journal of Physics: Condensed Matter. — 1990. — Т. 2. — С. 271–274.
5. *Emelyanenko, A. V.* Theory for the evolution of ferroelectric, antiferroelectric, and ferrielectric smectic phases in the electric field / A. V. Emelyanenko // Physical Review E. — 2010. — Т. 82, вып. 3. — С. 031710.
6. *Beresnev, L. A.* Deformed helix ferroelectric liquid crystal display: A new electrooptic mode in ferroelectric chiral smectic C liquid crystals / L. A. Beresnev, V. G. Chigrinov, D. I. Dergachev, E. P. Poshidaev, J. Fünfschilling, M. Schadt // Liquid Crystals. — 1989. — Т. 5, № 4. — С. 1171–1177.
7. *Clark, N. A.* Surface-stabilized ferroelectric liquid crystal electro-optics: New multistate structures and devices / N. A. Clark, S. T. Lagerwall // Ferroelectrics. — 1984. — Т. 59, № 1. — С. 25–67.

8. *Jaradat, S.* Asymmetric switching in a ferroelectric liquid crystal device / S. Jaradat, P. D. Brimicombe, N. W. Roberts, C. Southern, H. F. Gleeson // Applied Physics Letters. — 2008. — Т. 93, вып. 15. — С. 153506.
9. *Pozhidaev, E. P.* Ultrashort helix pitch antiferroelectric liquid crystals based on chiral esters of terphenyldicarboxylic acid / E. P. Pozhidaev, V. V. Vashchenko, V. V. Mikhailenko, A. I. Krivoshey, V. A. Barbashov, L. Shi, A. K. Srivastava, V. G. Chigrinov, H. S. Kwok // Journal of Materials Chemistry C. — 2016. — Т. 4, вып. 43. — С. 10339–10346.
10. *Pozhidaev, E. P.* Short helix pitch ferroelectric liquid crystals induced in nematic matrix by chiral non-mesogenic dopants / E. P. Pozhidaev, E. M. Budynina, A. V. Kuznetsov, S. I. Torgova, T. P. Tkachenko, V. A. Barbashov // Journal of Molecular Liquids. — 2023. — Т. 391. — С. 123351.
11. *Johnson, L.* Field induced transitions and interlayer interactions in intermediate smectic phases / L. Johnson, S. Jaradat, H. F. Gleeson // Journal of Materials Chemistry C. — 2014. — Т. 2, вып. 1. — С. 147–157.
12. *Levstik, A.* Dielectric method for determining the rotational viscosity in thick samples of ferroelectric chiral smectic- C^* liquid crystals / A. Levstik, Z. Kutnjak, C. Filipi, I. Levstik, Z. Bregar, B. Žek š, T. Carlsson // Physical Review A. — 1990. — Т. 42, вып. 4. — С. 2204–2210.
13. *Pozhidaev, E.* V-shaped electro-optical mode based on deformed-helix ferroelectric liquid crystal with subwavelength pitch / E. Pozhidaev, V. Chigrinov, A. Murauski, V. Molkin, D. Tao, H.-S. Kwok // Journal of the Society for Information Display. — 2012. — Т. 20, № 5. — С. 273–278.
14. *Pozhidaev, E. P.* Enhanced orientational Kerr effect in vertically aligned deformed helix ferroelectric liquid crystals / E. P. Pozhidaev, A. K. Srivastava, A. D. Kiselev, V. G. Chigrinov, V. V. Vashchenko, A. I. Krivoshey, M. V. Minchenko, H.-S. Kwok // Optics Letters. — 2014. — Т. 39, № 10. — С. 2900–2903.
15. *Martinot-lagarde, P.* Unwinding of the Helical Texture of a Smectic C^* Liquid Crystal, Through Ferroelectric and Dielectric Anisotropic Coupling With an Applied Field / P. Martinot-lagarde // Molecular Crystals and Liquid Crystals. — 1981. — Т. 66, № 1. — С. 61–66.