

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук

Горкунова Максима Валерьевича

на диссертацию Ткаченко Тимофея Павловича

«Диэлектрические и электрооптические свойства ферриэлектриков в смесях неполярного жидкого кристалла и хиральных соединений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Работа Ткаченко Т.П. посвящена экспериментальному исследованию полярных фаз сегнетоэлектрических жидких кристаллов (ЖК) с асимметрично чередующимся направлением спонтанной поляризации слоёв, что определяет их особые ферриэлектрические свойства. Принципиальная возможность существования таких фаз была установлена несколько десятилетий тому назад. Однако такие фазы, как правило, обнаруживались в узких диапазонах повышенных температур, что затрудняло детальное исследование их свойств и в целом придавало фазам экзотический характер. Достоверно рентгеновскими методами были определены разнообразные надмолекулярные упаковки в ЖК ферриэлектриках, а также исследована их переупаковка под действием электрического поля и изменений температуры. В таком контексте создание и исследование широкотемпературных ферриэлектрических ЖК фаз, безусловно, является **актуальной темой**, так как позволяет выяснить все детали их оптических и электрооптических свойств. Помимо ответа на фундаментальные вопросы, исследование ферриэлектрических ЖК материалов имеет и большое практическое значение. В отличие от коммерчески доступных неполярных нематических ЖК, полярные фазы чувствительны к знаку приложенного электрического поля, а их электрооптическое переключение происходит намного быстрее. Существование при комнатных температурах позволило исследовать и перспективы практического использования ферриэлектрических ЖК в качестве электрооптических материалов для разнообразных устройств, осуществляющих модуляцию фазы света.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 143 страницы, 74 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 188 наименований.

В целом, работа отлично оформлена, написана хорошим языком и подробно представляет весь набор полученных результатов. С самого начала четко формулируется проблематика исследований, их цели и задачи, а затем приводятся результаты, и проводится их интерпретация в рамках устоявшихся понятий физики конденсированного состояния.

Введение начинается с краткой классификации ЖК, в которой особое внимание уделено неполярной нематической фазе и полярным фазам

смектических ЖК. Отмечены потенциальные практические преимущества полярных фаз перед неполярными. Указано, что наименее изученной с точки зрения электрооптических свойств является ферриэлектрическая ЖК фаза смектиков С*, ввиду температур существования, значительно превышающих комнатные. Исходя из этого, выбраны цели и задачи исследований, а также обоснована их актуальность. Сформулированы научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

Глава 1 представляет собой обзор довольно обширной литературы по полярным (сегнето-, антисегнето- и ферриэлектрическим) смектическим ЖК, накопившейся за прошедшие десятилетия. Приведена классификация неполярных и полярных ЖК фаз как по их не всегда ясной структуре, так и по наблюдаемым диэлектрическим свойствам. Описаны электрооптические эффекты, известные в полярных смектиках С*. Рассмотрена возможность стабилизации полярных ЖК фаз в конфигурации планарно ориентированного геликоида, допускающей электрооптическое переключение за счет его частичной деформации. Также проанализированы возможности полной раскрутки геликоида под действием ориентирующих поверхностей и особенности электрооптических эффектов в таком случае. Обсуждаются потенциальные применения полярных смектических ЖК фаз в оптических устройствах, основанных на управлении фазой прошедшего света: спиральных волновых пластинах и дисплейных ячейках с перестраиваемым цветом. Последний раздел главы посвящен обзору литературы по ферриэлектрическим ЖК фазам. Приведены актуальные направления исследований ферриэлектрических ЖК, включая теоретическое моделирование и экспериментальную расшифровку их надмолекулярных упаковок, развитие методов исследования фазовых переходов, в том числе в электрическом поле, а также подходы к разработке ЖК смесей с ферриэлектрическими свойствами. Указана возможность расширения интервалов существования таких фаз в многокомпонентных смесях. Сделан общий вывод о необходимости получения ферриэлектрических ЖК, стабильных в широком диапазоне температур, близких к комнатной, что позволит и более подробно исследовать их структуру и свойства, и обеспечит возможности практического применения.

В **Главе 2** подробно описаны использованные экспериментальные методы. Приведена технология сборки ЖК ячеек с плоским зазором контролируемой толщины, даны технические детали приготовления многокомпонентных смесей, а также оптических и электрооптических методов исследований: интегрирования токов на конденсаторе для определения изменений спонтанной поляризации, измерения времен переключения и угла отклонения главной оптической оси геликоидальной структуры, определения пространственного шага геликоида.

Глава 3 посвящена разработке ЖК смесей, демонстрирующих ферриэлектрические свойства в широком диапазоне температур, включая

комнатные. Обоснован выбор неполярного смектика С в качестве матрицы и используемых немезофазных (то есть не склонных в чистом виде к образованию ЖК фаз) хиральных добавок. Диэлектрическими методами охарактеризован двухкомпонентный жидкокристаллический ферриэлектрик, существующий при комнатных температурах. Проведено систематическое сравнение действия ряда хиральных соединений и, по результатам анализа, разработаны два трехкомпонентных ЖК ферриэлектрика, обладающих расширенными температурными диапазонами существования, удобными и для исследований, и для практических применений.

Глава 4 описывает исследования электрооптических свойств ферриэлектрических фаз созданных ЖК смесей. Показано, что для них, как и для короткошаговых сегнетоэлектрических ЖК, характерен электрооптический отклик в режиме деформированного электрическим полем геликоида и соответствующий ориентационный эффект Керра. Из зависимостей интегрированного тока переключения поляризации определена диэлектрическая восприимчивость ЖК ячеек, по максимумам которой установлено наличие нескольких критических полей. Меньшие из них проинтерпретированы как пороговые поля раскрутки макроскопического геликоида поляризации, а большие – как пороговые поля разрушения микроскопической ферриэлектрической упаковки молекул. Отмечено, что для описания электрооптического поведения в полях меньших, чем первое критическое, можно использовать теорию, развитую для сегнетоэлектрических смектиков С*. Исследовано электрооптическое переключение ячеек с ферриэлектрическим ЖК для разной формы и частоты сигналов управляющего напряжения. Обнаружена существенная зависимость общего вида петли гистерезиса и времен переключения от частоты. Хотя изменение толщины ячейки на порядок величины качественно картину переключения не меняет, его количественные характеристики (критическое поле и диэлектрическая восприимчивость) меняются в два и более раз. Обнаружено слияние критических полей переключения при повышении температуры. Положение точки слияния оказалось также существенно зависящим от частоты переключающего поля. Сделан вывод о том, что наличие температуры слияния первого и второго критического поля не является критерием фазового перехода ферриэлектрик – сегнетоэлектрик.

Глава 5 посвящена сравнению свойств двух ферриэлектрических и двух сегнетоэлектрических смектиков С*. Проведен анализ температурных зависимостей критических электрических полей, коэффициентов ориентационного эффекта Керра и максимально достижимого электроуправляемого двулучепреломления ЖК ячеек в режиме деформированного электрическим полем геликоида. Обнаружена возможность повышения управляемого двулучепреломления с ростом температуры, что качественно отличает исследованные ЖК ферриэлектрики от традиционных

сегнетоэлектриков. Предложены эмпирические аппроксимации свойств ферриэлектрических ЖК ячеек от толщины и частоты управляющего сигнала.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы, основным результатам и выводам.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработаны смектические S^* жидкие кристаллы, обладающие ферриэлектрическими фазами в широких температурных интервалах, близких к комнатным. Это позволило детально исследовать их электрооптические свойства и обнаружить ряд ранее неизвестных особенностей.
2. Показана существенная зависимость общего вида петель гистерезиса и критических полей переключения от частоты управляющего напряжения. Найдены области параметров, удобные для практических применений, в которых характеристики переключения стабильны.
3. Продемонстрирована возможность усиления электроуправляемого эффективного двулучепреломления геликоидальной структуры ферриэлектрических ЖК с ростом температуры.

Содержание диссертации грамотно изложено, работа логически целостна. Положения, выносимые на защиту, и выводы, сформулированные в диссертации, обладают **высокой степенью обоснованности**. Результаты диссертации опубликованы в пяти статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, в одной статье в журнале, рекомендуемом ВАК, а также апробированы на международных и всероссийских конференциях. **Достоверность** результатов диссертации подтверждается воспроизводимостью результатов экспериментов, использованием современных методов исследования и непротиворечивостью с результатами, полученными другими научными группами.

Результаты диссертационной работы обладают **практической значимостью**, так как разработанные ферриэлектрические ЖК существуют при комнатных температурах, а обнаруженный эффект деформированного электрическим полем геликоида позволяет плавно изменять величину эффективного двулучепреломления геликоидальной структуры и модулировать фазу прошедшего света.

Результаты работы могут быть использованы в российских организациях, занимающихся экспериментальными или теоретическими исследованиями ЖК и их применением: на Физическом факультете Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», в Федеральном государственном бюджетном

учреждении науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук и др.

В качестве **замечаний** к диссертации можно отметить следующее:

1. Не приведена логика рассуждений, позволивших на основании макроскопических свойств, представленных на Рис. 3.5, 3.6 и в Таблице 1, сделать вывод на стр. 58 о наличии трех- и четырехслойной микроскопической структуры обнаруженных ферриэлектрических фаз.
2. Существенная зависимость формы петель гистерезиса электрооптического переключения от частоты прикладываемого поля на Рис.4.4 ставит под вопрос существование статического предела. Похожая ситуация в цитируемой работе [167] была объяснена формированием дефектной надструктуры в приповерхностных областях. Судя по изображениям на Рис. 4.15, некие аналоги таких надструктур имеют место и в данном случае. Неопределенность статического предела проявилась и в критической зависимости от частоты температуры слияния пиков восприимчивости на Рис. 4.17. В то же время, из Рис. 4.12(б) и 5.13(а) видно, что характеристики низкочастотного отклика существенно меняются с толщиной ЖК слоя, пока та не превысит 30-40 мкм. Остается неясным, достигается ли воспроизводимый статический предел электрооптики ферриэлектрических ЖК при подавлении вклада приповерхностных эффектов в толстых ячейках.
3. На стр. 83 обсуждается наличие 3-х времен релаксации. Исходя из данных на Рис.4.7(б) следует, что системе характерны релаксационные процессы с временами, отличающимися на несколько порядков величины. Использованный эмпирический подход к определению времен (см. Рис. 2.3) не позволил идентифицировать вклады различных процессов. Их поочередное появление было бы хорошо видно на временных развертках электрооптического переключения при подаче и выключении коротких и редких ступенчатых импульсов напряжения.
4. Приведенные на Рис. 5.7 спектральные дисперсии коэффициента Керра, по-видимому, пропорциональны единой дисперсии диэлектрической анизотропии ЖК. Вычленение её как общего множителя позволило бы точнее определить, что именно меняется в ЖК с температурой.
5. В тексте работы имеются технические неточности и опечатки:
 - отсутствует аргумент функции Бесселя в Ур. (1.4) на стр. 21;
 - на стр. 51 утверждается что “хиральные добавки индуцируют в смесях разные знаки спонтанной поляризации и волнового вектора”, хотя обе эти векторные величины строго перпендикулярны;
 - на стр. 70 упомянут “район комнатных температур”.

Отмеченные замечания не снижают научную значимость результатов диссертации и не влияют на позитивную оценку работы. В работе получен действительно интересный набор новых экспериментальных данных, которые требуют дальнейшего детального теоретического осмысления.

Заключение по диссертационной работе.

На основании всего вышеизложенного, можно заключить, что диссертационная работа «Диэлектрические и электрооптические свойства ферриэлектриков в смесях неполярного жидкого кристалла и хиральных соединений» представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Ткаченко Тимофей Павлович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

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

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Горкунов Максим Валерьевич

«29» июня 2026 г.

Контактные данные:

Тел.: +7(499) 135-62-40, e-mail: gorkunov@crys.ras.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы: 119333, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 59.

Подпись к.ф.-м.н., М. В. Горкунова заверяю,

Заместитель директора – главный ученый секретарь Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт».

доктор физико-математических наук

Алексеева Ольга Анатольевна

**Список основных работ официального оппонента Горкунова Максима Валерьевича
по тематике диссертации Т.П. Ткаченко в рецензируемых научных изданиях за
последние 5 лет**

1. Mamonova A. V., Simdyankin I. V., Kasyanova I. V., Artemov V. V., Geivandov A. R., Palto S. P., Ezhov A. A., Gorkunov M. V. Liquid crystal metasurfaces for versatile electrically tunable diffraction, *Liquid Crystals*, 2023, 50 (7–10), 1555–1562. <https://doi.org/10.1080/02678292.2022.2154944>
2. Gorkunov M. V., Geivandov A. R., Mamonova A. V., Simdyankin I. V., Kasyanova I. V., Ezhov A. A., Artemov V. V. Non-Mechanical Multiplexed Beam-Steering Elements Based on Double-Sided Liquid Crystal Metasurfaces, *Photonics*, 2022, 9 (12), 986. <https://doi.org/10.3390/photonics9120986>
3. Gorkunov M. V., Mamonova A. V., Kasyanova I. V., Ezhov A. A., Artemov V. V., Simdyankin I. V. and Geivandov A. R. Double-sided liquid crystal metasurfaces for electrically and mechanically controlled broadband visible anomalous refraction, *Nanophotonics*, 2022, 11 (17), 3901–3912. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0091>
4. Irina V. Kasyanova, Maxim V. Gorkunov and Serguei P. Palto Liquid-crystal metasurfaces: Self-assembly for versatile optical functionality, *Europhysics Letters*, 2022, 136 (2), 24001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/ac4ac9>
5. Serguei P. Palto, Artur R. Geivandov, Irina V. Kasyanova, Ivan V. Simdyankin, Vladimir V. Artemov, and Maxim V. Gorkunov Liquid crystal microlenses based on binary surface alignment controlled by focused ion beam treatment, *Optics Letters*, 2021, 46 (14), 3376–3379. <https://doi.org/10.1364/OL.426904>
6. Osipov M. A., Gorkunov M. V., Antonov A. A., Berezkin A. V., Kudryavtsev Y. V. Liquid-Crystal Ordering and Microphase Separation in the Lamellar Phase of Rod-Coil-Rod Triblock Copolymers. Molecular Theory and Computer Simulations. *Polymers*, 2021, 13 (19), 3392. <https://doi.org/10.3390/polym13193392>
7. Osipov M. A., Gorkunov M. V., Antonov A. A. Different Mechanisms of Translational Symmetry Breaking in Liquid-Crystal Coil–Rod–Coil Triblock Copolymers, *Symmetry*, 2021, 13 (10), 1834. <https://doi.org/10.3390/sym13101834>