

На правах рукописи

Сутормин Виталий Сергеевич

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
ЯЧЕЕК С ИОННО-СУРФАКТАНТНЫМ СПОСОБОМ УПРАВЛЕНИЯ

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Зырянов Виктор Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Подопригора Владимир Георгиевич.
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Сибирский
федеральный университет», заместитель
директора по научной и инновационной
деятельности

кандидат физико-математических наук, доцент
Сорокин Анатолий Васильевич. Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Сибирский государственный
аэрокосмический университет имени академика
М.Ф. Решетнева», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт теоретической и
прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии
наук (г. Новосибирск)

Защита состоится “__” октября 2013 г. в __ часов __ минут
на заседании диссертационного совета Д 003.055.01 по защитам диссертаций
при ФГБУН Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу:
660036, г. Красноярск, Академгородок 50, строение 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН

Автореферат разослан “__” _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук _____ Втюрин Александр Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой интересный объект как для фундаментальных исследований частично упорядоченных молекулярных структур, так и для использования в различных областях современных технологий, особенно в оптоэлектронике. В большинстве практических применений и исследований используются специальные ячейки, состоящие из двух параллельных твердых подложек, зазор между которыми заполнен ЖК. Макроскопические оптические характеристики такой ячейки зависят от конфигурации директора, которая в отсутствие внешних воздействий определяется условиями сцепления жидкого кристалла с подложками. Изменяя ориентацию директора можно управлять оптическими характеристиками ЖК ячейки. Существует два принципиально разных подхода к управлению ЖК. Первый из них основан на эффекте Фредерикса [1]. Данный эффект заключается в переориентации директора ЖК в объеме слоя под действием внешнего электрического или магнитного поля. При этом поверхностное сцепление ЖК с подложками остается неизменным. После выключения поля директор возвращается к исходной ориентации под действием упругих сил изгибовой деформации жидкого кристалла. Эффект Фредерикса лежит в основе функционирования большинства современных ЖК устройств.

Второй подход основан на локальном переходе Фредерикса [2], исследование которого может привести к созданию нового поколения оптоэлектронных устройств, а также к расширению функциональных возможностей современных ЖК дисплеев. В данном подходе изменение ориентации ЖК в объеме происходит вследствие модификации условий сцепления молекул жидкого кристалла с подложкой под действием внешних факторов. Такими факторами могут выступать изменение температуры, облучение УФ светом и пр., однако с практической точки зрения наиболее интересными являются способы, в которых изменение условий сцепления происходит при воздействии электрического поля. Для реализации такого подхода могут быть использованы ионные сурфактанты, ориентирующая способность которых зависит от их концентрации на границе раздела [3]. Ранее попытка реализовать электроуправляемую ионную модификацию граничных условий в плоском слое ЖК была предпринята в работе [4]. Однако в чистом виде наблюдать поверхностный переход не удалось, поскольку доминирующим эффектом была электрогидродинамическая неустойчивость. Электроуправляемая ионная модификация граничных условий была реализована для капсулированных полимером капель жидкого кристалла в прямом [5] и инверсном [6] режимах.

Работа поддержана грантами РФФИ № 12-02-16091-моб_з_рос (2012 г.),

№ 12-03-31144 (2012-2013 гг.), № 12-03-00816 (2012-2014 гг.); гос/контрактов № П901 (2009-2011 гг.), № 14.В37.21.0730 (2012-2014 гг.) ФЦП «Кадры России»

Цель работы и задачи исследования

Целью работы являлось развитие метода электрически индуцированной ионной модификации поверхностного сцепления для управления оптическими ячейками на основе нематических жидких кристаллов, а также исследование их ориентационно-структурных и электрооптических свойств.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Подобрать состав и оптимизировать методику изготовления оптических ЖК ячеек с ионно-сурфактантным способом управления.
2. Методами поляризационно-оптической микроскопии изучить изменения текстурных картин и соответствующих им ориентационных структур жидкого кристалла при воздействии электрического поля.
3. Исследовать электрооптические свойства ЖК ячеек и выявить основные процессы, определяющие характер изменения ориентации жидкого кристалла и соответствующий оптический отклик.
4. Рассмотреть различные варианты ориентационно-структурных переходов в электрооптических ЖК ячейках с ионно-сурфактантным способом управления.

Научная ценность и новизна

1. Реализован метод электрически индуцированной ионной модификации поверхностного сцепления для управления оптическими ячейками на основе слоя нематического жидкого кристалла.
2. Продемонстрировано, что возможность реализации данного метода управления не зависит от величины и знака анизотропии диэлектрической проницаемости используемого ЖК.
3. Показано, что переориентация ЖК имеет пороговый характер и в общем случае происходит под действием комбинации различных ориентирующих факторов: эффекта Фредерикса, эффекта модификации поверхностного сцепления и переноса носителей зарядов.
4. Осуществлены и исследованы два варианта ориентационно-структурных переходов и соответствующих переключений оптических состояний ЖК ячеек, управляемых ионно-сурфактантным методом.

Практическая значимость

1. Продемонстрирована возможность использования метода электрически индуцированной ионной модификации поверхностного сцепления для управления светопропусканием жидкокристаллических ячеек.
2. Предложены методы улучшения динамических характеристик оптического отклика ЖК ячеек, управляемых ионно-сурфактантным методом.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В электрооптической ячейке, заполненной нематиком, допированым ионным сурфактантом, под действием постоянного электрического поля может происходить изменение поверхностного сцепления, которое вызывает переориентацию жидкого кристалла.
2. Процесс ионной модификации поверхностного сцепления носит пороговый характер и в определенном диапазоне управляющих напряжений проходит без возникновения электрогидродинамической неустойчивости.
3. ЖК ячейки с ионно-сурфактантным управлением в общем случае имеют сложный оптический отклик, обусловленный комбинацией различных ориентирующих эффектов: модификацией поверхностного сцепления, эффектом Фредерикаса, переносом носителей зарядов.
4. Ионно-сурфактантный метод позволяет управлять светопропусканием ЖК ячеек, заполненных нематиком с любым значением диэлектрической анизотропии.
5. Возможна реализация двух различных вариантов ориентационно-структурных переходов ЖК с использованием эффекта электрически индуцированной ионной модификации поверхностного сцепления: переход от гомеотропной конфигурации директора к гомеопланарной структуре и переход от гомеопланарной конфигурации директора к твист структуре.
6. Изменение формы управляющего электрического импульса позволяет существенно улучшить быстродействие ЖК ячеек с ионно-сурфактантным способом управления.

Личный вклад автора: разработка состава и изготовление исследуемых образцов жидкокристаллических ячеек с ионно-сурфактантным способом управления, планирование и проведение экспериментов. Совместно с научным руководителем анализ и обсуждение экспериментальных данных.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на Конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых-физиков НКCF-XXXVII, НКCF-XXXVIII (Красноярск, 2008, 2009 г.); 22nd International Liquid Crystals Conference ILCC-2008 (Jeju, Korea, 2008 г.); IV Всероссийской конференции «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах ФАГРАН-2008» (Воронеж, 2008 г.); Всероссийском семинаре «Физикохимия поверхностей и наноразмерных систем» (Москва, 2009 г.); Научно-технической конференции с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (V Ставеровские чтения) (Красноярск, 2009 г.); VII Международной научной конференции по лиотропным жидким

кристаллам и наноматериалам совместно с симпозиумом «Успехи в изучении термотропных жидких кристаллов» (V Чистяковские чтения) (Иваново, 2009 г.); XXII симпозиуме «Современная химическая физика» (Туапсе, 2010 г.); XVIII International Symposium «Advanced Display Technologies» (St-Petersburg, Russia, 2010 г.); International Display Manufacturing Conference IDMC-2011 (Taipei, Taiwan, 2011 г.); International Siberian Conference on Control and Communications Sibcon-2011 (Krasnoyarsk, Russia, 2011 г.); Восемнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-18 (Красноярск, 2012 г.); Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике (Иркутск, Россия, 2012 г.); Первой Всероссийской конференции по жидким кристаллам РКЖК-2012 (Иваново, 2012 г.); 21-м Международном симпозиуме «Передовые дисплейные и световые технологии» ADLT-13 (Мытищи, Россия, 2013 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 4 статьи в отечественных журналах из списка ВАК (Письма в ЖТФ (2013), Известия Вузов. Физика (2013), Письма в ЖЭТФ (2012), Журнал СФУ. Серия: математика и физика (2009)), 4 статьи в сборниках трудов и материалов международных и российских конференций, 12 тезисов международных и российских конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 96 страницах и иллюстрируется 43 рисунками, список цитируемой литературы содержит 92 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы: обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертации.

Первая глава – обзорная, состоящая из нескольких разделов. В разделе 1.1 приведена классификация ЖК, относящихся к термотропным каламитикам. В разделе 1.2 описаны упругие свойства ЖК, приведены соотношения для определения плотности свободной энергии нематических жидких кристаллов при наличии упругих деформаций поля директора. В разделе 1.3 приведена схема ячейки, которая применяется для исследований ЖК, а также рассматриваются основные подходы к упорядочению жидких кристаллов. В разделе 1.4 рассмотрен эффект Фредерикса, приведены выражения для плотности свободной энергии ЖК в присутствии поля, а также соотношения для

определения порогового поля. В разделе 1.5 рассмотрены основные электрооптические эффекты в нематиках. В разделе 1.6 обсуждается флексоэлектрический эффект в нематических ЖК. В разделе 1.7 рассмотрен локальный переход Фредерикса и факторы, его инициирующие: изменение температуры, облучение ультрафиолетом, приложение внешнего электрического поля. Обсуждается ионная модификация поверхностного сцепления в каплях нематика. В конце главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлен перечень используемых материалов, описаны методы изготовления образцов и их экспериментальных исследований. Для изготовления образцов использовались нематики 4-н-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ), имеющий $\Delta\epsilon > 0$ и 4-метоксибензилиден-4'-н-бутиланилин (МББА) с $\Delta\epsilon < 0$. В качестве планарно-ориентирующего покрытия для выбранных ЖК использовались пленки поливинилового спирта (ПВС), пластифицированного глицериновым компаундом (Гл). В работе использовался катионный сурфактант цетилтриметиламмоний бромид (ЦТАБ), который, растворяясь в ЖК, распадается на положительно заряженный поверхностно-активный ион ЦТА⁺ и отрицательный ион Br⁻ и при достаточной концентрации задает нормальные граничные условия [3].

Объектом исследования являлись плоские электрооптические ячейки, состоящие из двух стеклянных подложек с прозрачными ИТО электродами на внутренних сторонах и слоя ЖК между ними. На электроды предварительно наносились полимерные пленки толщиной около 1.5 мкм с помощью установки Spin coater HO-TN-05 (HOLMARC), выполняющие двойную функцию: ориентирующего покрытия и протекторного слоя, препятствующего контакту ионов сурфактанта с электродами. Ось легкого ориентирования задавалась механическим натиранием поверхности полимера в определенном направлении на установке Rubbing Machine HO-IAD-BTR-01 (HOLMARC).

Экспериментальные исследования оптических текстур слоя ЖК проводились методом поляризационной микроскопии при помощи микроскопа Axio Imager.A1 (Carl Zeiss), оборудованного цифровой камерой AxioCam MRc5 (Carl Zeiss), сопряженной с компьютером. Исследование электрооптических характеристик проводилось с использованием установки, в которой излучение He-Ne лазера (Linos) с длиной волны $\lambda = 0.633$ мкм проходило последовательно через поляризатор, жидкокристаллическую ячейку, анализатор и попадало на фотоприемник. Запись сигнала с фотоприемника и управляющего электрического импульса производилась с помощью двухканального осциллографа DISCO (Трейд-М), сопряженного с компьютером.

Третья глава содержит результаты исследования электрооптических свойств жидкокристаллических ячеек с переходом от гомеотропной конфигурации директора к гомеопланарной структуре, вызванным ионной модификацией поверхностного сцепления. В разделе 3.1 описан принцип ионной модификации граничных условий, которая происходит вследствие изменения плотности

адсорбированных поверхностно-активных катионов на одной из подложек под действием электрического поля (рис. 1). При достаточной концентрации ионного сурфактанта в ЖК, поверхностно-активные катионы ЦТА⁺, адсорбируясь на межфазную границу, экранируют планарно-ориентирующее действие полимерного покрытия. Такой слой поверхностно-активных ионов задает для ЖК нормальные условия сцепления, и в исходном состоянии в жидкокристаллической ячейке реализуется гомеотропная ориентация директора (рис. 1 а). При воздействии постоянного электрического поля ионы сурфактанта перемещаются к соответствующим электродам, и подложка-анод освобождается от слоя поверхностно-активных катионов ЦТА⁺. В результате этого на данной подложке формируются планарные условия сцепления, характерные для полимерного покрытия (рис. 1 б). В итоге, в ячейке происходит ориентационный переход от гомеотропной структуры к гибридной гомеопланарной конфигурации директора, который приводит к существенному изменению макроскопических оптических характеристик ЖК ячейки.

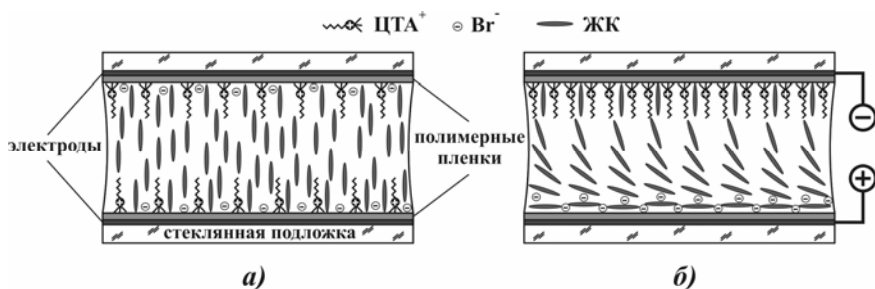


Рис. 1. Схема реализации эффекта ионной модификации поверхностного сцепления в слое нематика. *а)* Электрическое поле выключено, адсорбированных на границе раздела ионов ЦТА⁺ достаточно для образования гомеотропных условий сцепления на верхней и нижней подложках; *б)* под действием постоянного электрического поля нижняя подложка освобождается от ионов ЦТА⁺, в результате полимерная пленка на этой подложке задает планарное упорядочение ЖК.

Раздел 3.2 посвящен изучению электрооптических свойств ячеек, заполненных жидким кристаллом с положительной диэлектрической анизотропией. Исследовались три варианта ячейки, отличающиеся обработкой подложек: ячейка, в которой натиралась одна из подложек; ячейка, в которой угол между направлениями натирания верхней и нижней подложек составляет 45°; ячейка, в которой направления натирания верхней и нижней подложек антипараллельны. Изменения текстурных картин при переключении полярности электрического импульса, наблюдавшиеся в первых двух вариантах ЖК ячеек, убедительно свидетельствуют о модификации условий сцепления на подложке с электродом-анодом (рис. 2).

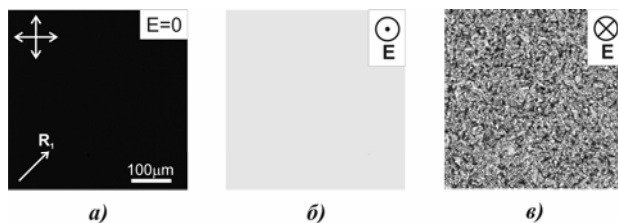


Рис. 2. Микрофотографии оптических текстур слоя ЖК 5ЦБ, допированного ЦТАБ: *а)* в исходном состоянии; *б)* под действием постоянного электрического поля E , направленного от нижней подложки к верхней; *в)* для поля противоположной полярности. Величина приложенного напряжения $U = 3$ В. В полимерном покрытии весовое соотношение компонент ПВС : Гл = 1 : 0.289, в ЖК – 5ЦБ : ЦТАБ = 1 : 0.01. Толщина слоя ЖК 6 мкм. Направления поляризаторов обозначены двойными стрелками. Нижняя подложка натиралась в направлении R_1 , составляющем угол 45° с поляризатором. Верхняя подложка не натиралась.

На рис. 3 приведены фотографии, показывающие зависимость оптической текстуры слоя нематика 5ЦБ, допированного ЦТАБ, от величины управляющего электрического поля для третьего варианта ЖК ячейки.

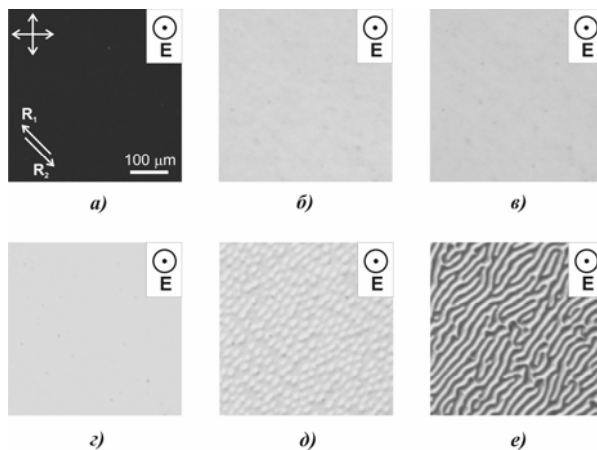


Рис. 3. Зависимость оптической текстуры слоя 5ЦБ, допированного ЦТАБ, от величины приложенного напряжения: *а)* $U = 2.7$ В, *б)* $U = 2.9$ В, *в)* $U = 3.2$ В, *з)* $U = 3.5$ В, *д)* $U = 3.6$ В, *е)* $U = 4$ В. В полимерном покрытии весовое соотношение компонент ПВС : Гл = 1 : 0.484, в ЖК – 5ЦБ : ЦТАБ = 1 : 0.01. Толщина слоя ЖК 6 мкм. Направления натирания нижней (R_1) и верхней (R_2) подложек антипараллельны.

Процесс переориентации нематика и соответствующего изменения светопропускания, обусловленный ионной модификацией поверхностного сцепления, является пороговым, начинаясь для данной ЖК ячейки примерно с величины поля $U = 2.8$ В. Пороговый характер связан с наличием критической плотности слоя адсорбированных ионов ЦТА⁺, ниже которой уже не происходит экранирование ориентирующего действия полимерного покрытия. В диапазоне управляющих напряжений $2.8 \text{ В} \leq U \leq 3.5 \text{ В}$ переориентация директора ЖК, вызванная ионной модификацией поверхностного сцепления, проходит без искажения оптически однородной текстуры слоя. При достижении $U = 3.6$ В в слое ЖК начинает формироваться текстурная картина доменов (рис. 3 д), вытянутых преимущественно перпендикулярно направлению натирания, которые отчетливо видны при $U = 4$ В (рис. 3 е).

Рассмотренные выше текстурные картины соответствуют установившейся ориентационной структуре ЖК при воздействии постоянного электрического поля. Но наиболее интересные особенности исследуемого эффекта проявляются в динамике оптического отклика ЖК слоя в области переднего и заднего фронта электрического импульса прямоугольной формы (рис. 4). Измерения проводились в геометрии скрещенных поляризаторов. Направления натирания подложек были антипараллельны и составляли угол 45° с поляризаторами. Величина светопропускания определялась как $T = (I_t / I_0) \cdot 100\%$, где I_0 – интенсивность излучения, прошедшего первый поляризатор, I_t – интенсивность после второго поляризатора.

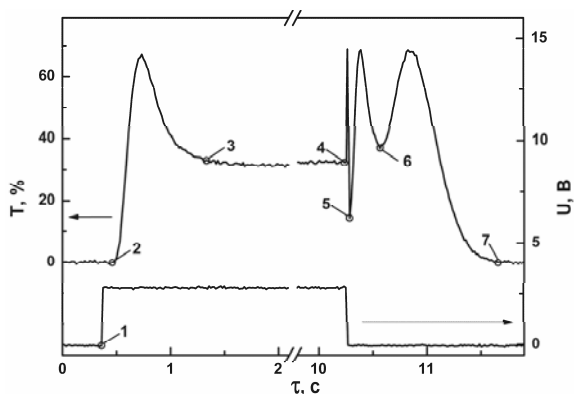


Рис. 4. Осциллограмма оптического отклика ЖК ячейки, заполненной 5ЦБ, допированным ЦТАБ, на импульс электрического поля величиной 2.8 В. Цифрами обозначены условные границы характерных временных интервалов. В полимерном покрытии весовое соотношение компонент ПВС : Гл = 1 : 0.283, в ЖК – 5ЦБ : ЦТАБ = 1 : 0.008. Толщина слоя ЖК 6 мкм.

Сложную картину оптического отклика можно условно разделить на последовательность временных интервалов, в пределах каждого из которых доминирует определенный физический эффект. Прежде всего, следует

обратить внимание на заметное запаздывание оптического отклика относительно переднего фронта электрического импульса – $\tau_{12} = 0.14$ с (нижний индекс указывает на две точки на рис. 4, интервал между которыми рассматривается). Это объясняется тем, что при включении внешнего электрического поля требуется некоторое время для уменьшения плотности адсорбированных ионов ЦТА⁺ на подложке с электродом-анодом ниже критической. В этом интервале эффект Фредерикса стабилизирует исходную гомеотропную ориентацию, поскольку ячейка заполнена ЖК 5ЦБ с $\Delta\epsilon > 0$.

После того, как поверхностная плотность адсорбированных ионов ЦТА⁺ становится меньше критической, на одной из подложек начинает происходить изменение граничных условий, которое вызывает переориентацию директора, что приводит к росту светопропускания T (рис. 4, момент времени 2). Кривая T достигает максимума 68 %, затем уменьшается до 33 % и выходит на насыщение. Такое поведение светопропускания для наших условий эксперимента может быть описано известным соотношением:

$$T = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(z) - n_o] dz \right) = \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} R \right) \quad (1)$$

где интеграл определяет оптическую разность хода (R) необыкновенного и обыкновенного луча на толщине d слоя ЖК. Для гомеотропного слоя нематика R , а, следовательно, и светопропускание равны нулю. Для гомеопланарного слоя ЖК в приближении линейного изменения угла наклона директора по толщине мы получили значение $R = 0.511$ мкм. Это означает, что при изменении ориентационной структуры ЖК от гомеотропной к гомеопланарной светопропускание, возрастая, достигает максимума при значении $R = 0.317$ мкм и затем уменьшается до величины $T = 32$ %, соответствующей величине $R = 0.511$ мкм. Такой характер изменения светопропускания находится в хорошем согласии с наблюдаемым в эксперименте, что является подтверждением образования гомеопланарной структуры под действием электрического поля. Время выхода на установившийся режим $\tau_{23} = 0.75$ с есть время переключения поверхностного сцепления плюс время перехода гомеотропной конфигурации объема ЖК в гомеопланарную структуру.

Еще более сложная картина изменения светопропускания наблюдается после выключения управляющего электрического импульса. Здесь в первый момент времени ЖК слой оказывается под действием поля разделенных ионов $E_i = E$. В этом случае доминирует эффект Фредерикса, проявляющийся в переориентации вдоль поля большей части объема ЖК 5ЦБ за исключением тонкого слоя вблизи нижней подложки (рис. 5 б). За время $\tau_{45} = 0.02$ с светопропускание проходит обратный путь, вначале увеличиваясь до тех же 68 %, а затем, падая до 14 %. Затем в результате встречного движения анионов и катионов поле разделенных зарядов падает до нуля, и воздействие подложки с планарным сцеплением вновь становится доминирующим, частично восстанавливая гомеопланарную структуру (рис. 5 в). Этот процесс начинается в

момент времени 5 (рис. 4) и длится в течение $\tau_{56} = 0.3$ с. Затем ионы ЦТА⁺ за счет диффузии подходят к подложке с планарным ориентантом и, адсорбируясь на ней, начинают формировать гомеотропно ориентирующий слой (рис. 4, момент времени 6), возвращая ориентационную структуру ЖК в исходное состояние (рис. 5 з) за время $\tau_{67} = 0.95$ с. Проведенный сравнительный анализ показал, что перечисленные выше динамические параметры согласуются с расчетными значениями, характеризующими аналогичные процессы в ЖК.

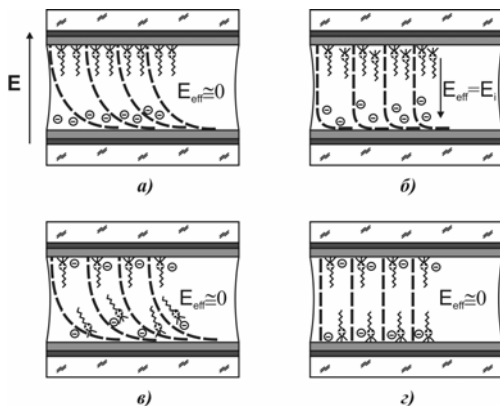


Рис. 5. Схемы распределения директора и ионов сурфактанта в слое 5ЦБ в моменты времени, обозначенные цифрами на рис. 4: **а)** в момент выключения электрического импульса 4; **б)** момент времени 5; **в)** 6; **з)** 7.

Исследование зависимости оптического отклика от величины управляющего электрического поля показало, что переход от гомеотропной конфигурации директора к гомеопланарной происходит в диапазоне 2.6 – 2.8 В. При дальнейшем увеличении поля на осциллограммах начинал проявляться ориентирующий эффект, уменьшающий отклонение директора от нормали к подложкам в гомеопланарной структуре. Причиной такого эффекта может быть усиление электрического тока и, следовательно, потока носителей заряда, который противодействует планарному ориентирующему влиянию подложки.

На рис. 6 представлены зависимости основных динамических параметров оптического отклика ЖК ячейки, заполненной 5ЦБ, допированной ЦТАБ, от величины управляющего напряжения. Рассмотрим сначала время задержки τ_{del} (равное временному интервалу τ_{12} на рис. 4). При увеличении амплитуды импульса в диапазоне от 2.6 до 3.3 В время задержки τ_{del} снижается с 1.6 до 0.1 с. Такая корреляция объясняется следующим: чем больше величина поля, тем быстрее катионы, адсорбированные на слое полимера, отрываются от его поверхности и уходят к катоду. В отличие от τ_{del} зависимость времени включения τ_{on} , определенного как интервал между началом действия электрического импульса и выходом светопропускания на насыщение, имеет немонотонный характер. Видно, что τ_{on} быстро уменьшается с 4.8 до 0.8 с в диапазоне управляющих напряжений 2.6 – 2.8 В. Такое уменьшение τ_{on} , обусловлено ускорением модификации поверхностного сцепления на подложке с электродом-анодом, которое связано с увеличением силы планарного

сцепления. При $U = 2.9$ В происходит скачок величины τ_{on} с 0.8 до 3.4 с. Данная аномалия в оптическом отклике объясняется конкурирующим влиянием ориентационного эффекта, связанного с токовым процессом, которое начинает существенно проявляться при $U = 2.9$ В. Время выключения τ_{off} определялось как промежуток времени между окончанием действия электрического импульса и релаксацией светопропускания к исходному нулевому уровню. В диапазоне 2.6 – 2.8 В τ_{off} возрастало с 0.3 до 1.1 с, а затем оставалось практически неизменным до 3.3 В. Такое поведение зависимости $\tau_{off}(U)$ характерно для многих релаксационных процессов в электрооптических ЖК ячейках.

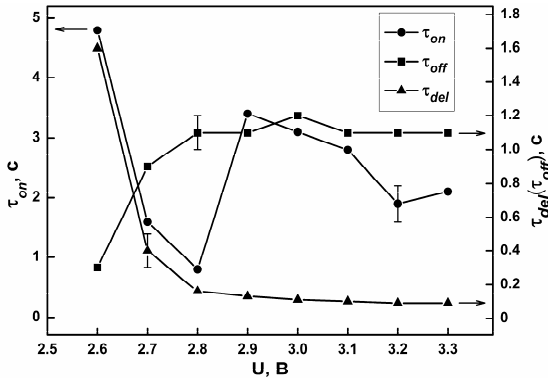


Рис. 6. Зависимости времен задержки τ_{del} , включения τ_{on} и выключения τ_{off} ЖК ячейки, заполненной 5ЦБ, допированным ЦТАБ, от величины управляющего напряжения.

Как видно, времена переключения ЖК ячеек, управляемые ионно-сурфактантным методом имеют довольно большие величины – порядка секунды. Однако их можно уменьшить путем изменения формы управляющего импульса, в частности добавкой импульса обратной полярности перед выключением поля. В этом случае поверхностно-активные ионы ЦТА⁺ быстрее возвращаются к планарной подложке и, тем самым, происходит более быстрое формирование изначальной гомеотропной ориентации директора.

Раздел 3.3 посвящен изучению электрооптических свойств ячеек, заполненных жидкими кристаллами с отрицательной (МББА) и близкой к нулю (смесь МББА и 5ЦБ) диэлектрической анизотропией. Экспериментально продемонстрировано, что ионно-сурфактантный метод позволяет эффективно управлять макроскопическими оптическими характеристиками ячеек, содержащими ЖК с различной величиной и знаком диэлектрической анизотропии. Особенно эффектно выглядит управление оптическими ячейками на основе ЖК с $\Delta\epsilon \approx 0$, для которых переориентация структуры с использованием эффекта Фредерикса принципиально невозможна.

Четвертая глава содержит результаты исследования электрооптических свойств ЖК ячеек с переходом от гомеопланарной конфигурации директора к твист-структуре, вызванным ионной модификацией поверхностного сцепления. В разделе 4.1 описана схема перехода, для реализации которого нами

изготавливались ЖК ячейки с функционально различными ориентирующими покрытиями на верхней и нижней подложках. Состав полимерного покрытия на верхней подложке подбирался таким образом, чтобы слой катионов ЦТА⁺, адсорбированных на межфазной границе при достаточной концентрации, мог экранировать планарное ориентирующее воздействие полимерной пленки и задать гомеотропное поверхностное сцепление. Нижняя подложка покрывалась пленкой, на которой ионы ЦТА⁺ не способны экранировать планарное ориентирующее воздействие полимерного слоя. При этом направления натирания подложек были взаимно перпендикулярны. Таким образом, в исходном состоянии в ЖК ячейке реализовывалась гомеопланарная ориентация директора. При приложении постоянного электрического поля, направленного сверху вниз, верхняя подложка освобождается от слоя катионов ЦТА⁺, и на данном участке формируются планарные условия сцепления. В итоге, в ЖК ячейке происходит ориентационный переход от гомеопланарной конфигурации директора к твист-структуре.

Раздел 4.2 посвящен исследованию ЖК ячейки методом поляризационной микроскопии. Ячейка заполнялась нематиком 5ЦБ, допированным ионным сурфактантом ЦТАБ в весовом соотношении 1 : 0.008. Толщина слоя ЖК составляла 6 мкм. В качестве ориентирующего покрытия использовались пленки ПВХ с добавкой глицеринового компаунда в весовом соотношении 1 : 0.432 (верхняя подложка) и непластифицированного ПВХ (нижняя подложка). Исследования, проведенные в геометрии скрещенных и параллельных поляризаторов, подтвердили, что в ЖК ячейке под действием постоянного электрического поля происходит переход гомеопланарной ориентации директора к твист-структуре.

Исследование электрооптических характеристик жидкокристаллической ячейки при переходе от гомеопланарной конфигурации директора к твист-структуре обсуждается в разделе 4.3. На рис. 7 представлена осциллограмма оптического отклика данной ЖК ячейки на прямоугольный импульс электрического поля. Измерения проводились в геометрии скрещенных поляризаторов, и ЖК ячейка была повернута так, что направление натирания нижней подложки совпадало с одним из поляризаторов. В этом случае практически не наблюдается осциллирующей зависимости светопропускания, поскольку изменение макроскопических оптических характеристик ЖК ячейки происходит вследствие поворота плоскости поляризации падающего линейно-поляризованного света. Динамические характеристики данного ориентационно-структурного перехода имеют меньшие значения, чем при изменении от гомеотропной конфигурации директора к гомеопланарной структуре. Время включения $\tau_{\text{он}}$ составило 0.57 с, а время выключения $\tau_{\text{оф}}$ – 0.46 с. Причем, использование дополнительного импульса обратной полярности на выключении позволяет снизить $\tau_{\text{оф}}$ до 15 мс.

Таким образом, исследованный переход гомеопланарной ориентации директора к твист-структуре является более интересным в плане практического

использования по сравнению с переходом гомеотропной ориентационной структуры ЖК к гомеопланарной структуре, поскольку позволяет улучшить динамические характеристики оптического отклика ЖК ячейки.

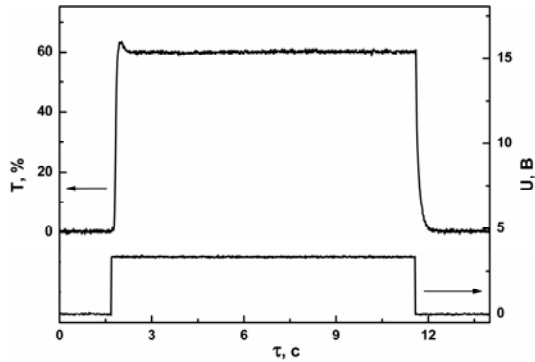


Рис. 7. Оциллограмма оптического отклика ЖК ячейки с переходом от гомеопланарной конфигурации директора к твист-структуре на прямоугольный импульс электрического поля величиной 3.3 В. Направление натирания нижней подложки совпадает с одним из поляризаторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и изготовлены образцы оптических ячеек на основе слоя нематических жидких кристаллов, в которых была реализована электрически индуцированная ионная модификация поверхностного сцепления.
2. Показано, что ионная модификация поверхностного сцепления приводит к существенному изменению ориентационной структуры и оптической текстуры ЖК. Трансформация ориентационной структуры имеет пороговый характер и реализуется в определенном интервале управляющих напряжений, выше которого возникает электрогидродинамическая неустойчивость.
3. Проведен анализ оциллограмм оптического отклика ЖК ячеек, управляемых ионно-сурфактантным методом, который показал, что переориентация жидкого кристалла в общем случае обусловлена комбинацией различных ориентирующих эффектов: модификацией поверхностного сцепления, эффектом Фредерикса, переносом носителей зарядов.
4. Продемонстрировано, что эффект электрически индуцированной ионной модификации поверхностного сцепления позволяет управлять оптическими ячейками на основе слоя нематического ЖК независимо от величины и знака их диэлектрической анизотропии.
5. Реализованы две различные геометрии ориентационно-структурных изменений ЖК, вызванные ионной модификацией межфазной границы:

переход от гомеотропной конфигурации директора к гомеопланарной структуре и переход от гомеопланарной конфигурации директора к твист структуре.

6. Определены динамические характеристики исследуемых электрооптических ЖК ячеек (времена включения и выключения) и показана возможность их существенного улучшения.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Зырянов В.Я. Динамика отклика электрооптической ячейки на основе слоя нематика с управляемым поверхностным сцеплением // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39, Вып. 13. – С. 1–8.
2. Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Прищепа О.О., Зырянов В.Я. Электроуправляемый локальный переход Фредерикса в слое нематического жидкого кристалла // Письма в ЖЭТФ. – 2012. – Т. 96, Вып. 8. – С. 562–567.
3. Зырянов В.Я., Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Гардымова А.П., Прищепа О.О., Шабанов А.В. Электрооптические устройства на основе жидких кристаллов с ионно-сурфактантным управлением // Известия Высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, Вып. 2/2. – С. 146–150.
4. Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Прищепа О.О. Температурно индуцированные изменения конфигурации директора в каплях нематика, диспергированного в поливинилпирролидоне // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. – 2009. – Т. 2, Вып. 3. – Р. 352–359.
5. Сутормин В.С. Температурно-индуцированный переход в каплях нематика, диспергированного в поливинилпирролидоне // Тезисы докладов научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых физиков НКСФ–XXXVII. – Красноярск, 2008. – С. 27.
6. Sutormin V.S., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Zyryanov V.Ya. Director Transformations within Nematic Droplets Dispersed in Polyvinylpyrrolidone Induced by Temperature and Moisture // The 22nd International Liquid Crystals Conference ILCC 2008, Jeju, Korea, 2008. Abstracts, P. 378.
7. Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Прищепа О.О., Зырянов В.Я. Температурно-индуцированная трансформация поверхностного сцепления в нематике, диспергированном в поливинилпирролидоне // Материалы IV Всероссийской конференции «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах ФАГРАН-2008» – Воронеж, 2008. – С. 873–876.
8. Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Прищепа О.О., Зырянов В.Я. Температурно-индуцированная модификация поверхностного сцепления в нематике, диспергированном в полимерной матрице // Тезисы докладов

- Всероссийского семинара «Физико-химия поверхностей и наноразмерных систем» – Москва, 2009. – С. 16.
9. Сутормин В.С. Структурные превращения в каплях нематика, вызванные температурной модификацией поверхностного сцепления // Тезисы докладов научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых физиков НКФФ–XXXVIII. – Красноярск, 2009. – С. 21.
 10. Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Прищепа О.О., Зырянов В.Я. Температурно индуцированные изменения конфигурации директора в каплях нематика, диспергированного в полимерной матрице // Тезисы докладов VII Международной научной конференции по лиотропным жидким кристаллам и наноматериалам совместно с симпозиумом «Успехи в изучении термотропных жидких кристаллов» (V Чистяковские чтения) – Иваново, 2009. – С. 76.
 11. Крахалев М.Н., Прищепа О.О., Шабанов А.В., Гардымова А.П., Сутормин В.С., Зырянов В.Я. Ионно-сурфактантный метод управления структурными и оптическими свойствами жидкокристаллических материалов // Труды научно-технической конференции с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (V Ставеровские чтения) – Красноярск, 2009. – С. 211–216.
 12. Сутормин В.С., Зырянов В.Я. Эффект электроуправляемой ионной модификации межфазной границы для плоского слоя нематического жидкого кристалла // Тезисы докладов XXII симпозиума «Современная химическая физика» – Туапсе, 2010. – С. 79.
 13. Zyryanov V.Ya., Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Gardymova A.P., Sutormin V.S., Loiko V.A. Light valves based on LC materials with ion-surfactant operation modes // XVIII International Symposium «Advanced Display Technologies», St-Petersburg, Russia, 2010. Abstracts, P. 148.
 14. Zyryanov Victor, Krakhalev M.N., Prishchepa O.O., Gardymova A.P., Sutormin V.S., Lee Wei Electrooptical Characteristics of Polymer Dispersed Liquid Crystal Films Operated with the Ion-Surfactant Method // International Display Manufacturing Conference IDMC 2011, Taipei, Taiwan, 2011. Abstracts, P. 52–53.
 15. Сутормин В.С., Шабанов А.В., Зырянов В.Я. Исследование оптических текстур и ориентационных структур в каплях нематика при температурной модификации поверхностного сцепления // Труды международной IEEE-сибирской конференции по управлению и связи (Sibcon-2011) – Красноярск, 2011. – С. 500–502.
 16. Сутормин В.С., Зырянов В.Я. Оптический отклик плоского жидкокристаллического слоя, допированного ионным сурфактантом, при воздействии постоянного электрического поля // Материалы Восемнадцатой Всероссийской конференции студентов-физиков и

молодых ученых (ВНКСФ-18) – Красноярск, 2012. – С. 256–257.

17. Зырянов В.Я., Крахалев М.Н., Шабанов А.В., Гардымова А.П., Прищепа О.О., Сутормин В.С. Электрооптические устройства на основе жидких кристаллов с ионно-сурфактантным управлением // Тезисы Международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике – Иркутск, 2012. – С. 79–80.
18. Сутормин В.С., Крахалев М.Н., Зырянов В.Я. Инверсный режим работы эффекта ионной модификации межфазной границы для плоского слоя нематического жидкого кристалла // Сборник тезисов докладов Первой Всероссийской конференции по жидким кристаллам РКЖК-2012 – Иваново, 2012. – С. 122.
19. Шабанов В.Ф., Зырянов В.Я., Крахалев М.Н., Шабанов А.В., Прищепа О.О., Гардымова А.П., Сутормин В.С. Ионно-сурфактантный метод управления жидкими кристаллами // Сборник тезисов докладов Первой Всероссийской конференции по жидким кристаллам РКЖК-2012 – Иваново, 2012. – С. 31.
20. Зырянов В.Я., Крахалев М.Н., Шабанов А.В., Гардымова А.П., Прищепа О.О., Сутормин В.С. Дисплеи на основе жидких кристаллов с ионно-сурфактантным управлением // Сборник тезисов докладов 21-го международного симпозиума «Передовые дисплейные и световые технологии» ADLT-13 – Мытищи, 2013. – С. 69.

Список цитируемой литературы:

1. Фредерикс В.К., Золина В. О применении магнитного поля к измерению сил, ориентирующих анизотропные жидкости в тонких однородных слоях // Ж.Р.Ф.–Х.О., ч. физич. – 1930. – Т. 62, № 5. – С. 457–464.
2. Dubois-Violette E., de Gennes P.G. Local Frederiks transitions near a solid/nematic interface // J. Phys. Lett (France). – 1975. – Т. 36. – P. L-255–L-258.
3. Proust J.E., Ter-Minassian-Saraga L., Guyon E. Orientation of a nematic liquid crystal by suitable boundary surfaces // Solid State Communs. – 1972. – V. 11. – P. 1227–1230.
4. Petrov A.G., Durand G. Electric field transport of biphilic ions and anchoring transitions in nematic liquid crystals // Liq. Cryst. – 1994. – V. 17 – P. 543–554.
5. Зырянов В.Я., Крахалев М.Н., Прищепа О.О., Шабанов А.В. Ориентационно-структурные превращения в каплях нематика, обусловленные ионной модификацией межфазной границы // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 86, Вып. 6. – С. 440–445.
6. Зырянов В.Я., Крахалев М.Н., Прищепа О.О., Шабанов А.В. Инверсная мода эффекта ионной модификации поверхностного сцепления в каплях нематика // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. 88, Вып. 9. – С. 688–692.

Сутормин
Виталий
Сергеевич

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
ЯЧЕЕК С ИОННО-СУРФАКТАНТНЫМ СПОСОБОМ УПРАВЛЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации
на соискание ученой степени
кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать 20.08.13
Формат 60x90/16. Уч.-изд. л.1.
Усл. печ. л. 1.5. Тираж 70 экз. Заказ № 34
Типография ФГБУН Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50, ИФ СО РАН