

САДОВОЙ АНТОН ВАЛЕНТИНОВИЧ

**СТАТИЧЕСКОЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ  
РАССЕЯНИЕ СВЕТА В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ  
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ И  
ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и наноэлектроника на квантовых эффектах  
01.04.05 – оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Саратов  
2008

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела факультета нано- и биомедицинских технологий и кафедре оптики и биомедицинской физики физического факультета Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского

**Научный руководитель:**

доктор физ.-мат. наук, проф. Названов Василий Федорович  
доктор физ.-мат. наук, проф. Зимняков Дмитрий Александрович

**Официальные оппоненты:**

доктор физ.-мат. наук, проф. Гусятников Виктор Николаевич  
доктор физ.-мат. наук, проф. Мельников Леонид Аркадьевич

**Ведущая организация:**

Саратовский филиал ИРЭ РАН (г. Саратов)

Защита диссертации состоится "29" декабря 2008 г. в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д212.243.01 в Саратовском государственном университете (410026, г. Саратов, ул. Московская, 155).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке СГУ.

Автореферат разослан "28" ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Аникин В.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Создание композитных жидкокристаллических материалов (гели, пористые структуры, диспергированные в полимере жидкие кристаллы (ДПЖК) и др.) представляет собой новое направление в материаловедении. Оно состоит, в частности, в исследовании взаимосвязи структурных компонентов, особенно на границе раздела, оптических, электрических и магнитных характеристик материала. В последние годы привлекло внимание исследователей модифицирование жидкокристаллических композитов внесенными в их состав различными наночастиц (наночастиц металлов и полупроводников, фуллеренов, углеродных нанотрубок и др.), с целью получения новых электрооптических характеристик среды (Каманина Н.В., 2005; Dierking I., 2005; Lee W., 2004; Yaroshchuk O.V., 2005).

Благодаря уникальным электрооптическим и механическим свойствам жидкокристаллические композиты получили широкое распространение в приборах обработки и отображения информации (Жаркова Г.М., 1994; Drzaic P.S., 1995).

Особое распространение получили диспергированные в полимере жидкие кристаллы, которые представляют собой взвесь жидкокристаллических капель в полимерной матрице. Они отличаются простой и недорогой технологией получения, сравнительно высоким быстродействием и чувствительностью к внешним воздействиям, в частности, к электрическому полю и температуре.

Указанные материалы исследователями рассматриваются в качестве одного из типов так называемых «умных» материалов.

К настоящему времени хорошо исследованы многие оптические и электрооптические свойства таких материалов с привлечением эффекта однократного рассеяния света (явление оптического пропускания, явления индуцированного электрическим полем сдвига фазы волны оптического излучения и др.) (Žumer S., 1988; Kelly J.R., 1994; Loiko V.A., 2006; Aphonin O.A., 1997; Reshetnyak V.Yu., 1997).

Однако во многих случаях, в частности, при больших концентрациях жидкокристаллических капель в полимере и больших толщинах исследуемых образцов ЖК композита, весьма важны эффекты многократного рассеяния света, например, в случае изучения эффектов угловой зависимости рассеянного света, обратного рассеяния света и др. (Kelly J.R., 1993; Delica S., 2004; Neijen Jaap H.M., 1997).

Несмотря на важность этой проблемы, экспериментальных и теоретических работ по теме явно недостаточно. Актуальность темы связана также с проблемой, так называемой локализации света в подобных неупорядоченных средах.

Анализ динамики границы раздела многофазных систем вносит вклад, как в изучение динамики движения жидкостей в различных неупорядоченных

средах (горных пород, биологических объектов и т.д.), так и в исследовании процесса фазового разделения в процессе формирования жидкокристаллических композитов. Полученные результаты могут быть полезны в медицине, нефтедобывающей и химической промышленности.

### **Цель и задачи исследований**

В связи со сказанным можно сформулировать цель данной диссертационной работы.

Цель работы:

1. Выявление вклада многократного рассеяния света в диспергированных в полимере нематических жидких кристаллах и установление возможных границ применимости модели однократного рассеяния света в приближении аномальной дифракции в таких средах (в частности, в угловом распределении интенсивности рассеянного света);
2. Поиск и разработка метода получения жидкокристаллических композитов на основе нематического жидкого кристалла и производных ацетата целлюлозы;
3. Разработка метода модифицирования свойств диспергированных в полимере нематических жидких кристаллов при внесении в состав композита углеродных нанотрубок;
4. Выяснение влияния критических параметров динамики подъема жидкости в неупорядоченных пористых средах с использованием оптических методов.

### **Постановка задач исследования**

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Экспериментальное и теоретическое исследование электрооптических характеристик ДПЖК, в частности, зависимости пропускания, индуцированного полем сдвига фазы излучения и углового распределения интенсивности рассеянного излучения под действием внешнего электрического поля.
2. Моделирование многократного рассеяния света в образцах ДПЖК методом Монте-Карло с целью выявления вклада многократного рассеяния света и установление границ применимости модели однократного рассеяния света в приближении аномальной дифракции.
3. Исследование и разработка метода получения жидкокристаллического композита на основе нематического жидкого кристалла и ацетата целлюлозы с устойчивым эффектом самоорганизации структуры композита.
4. Экспериментальное исследование электрооптических характеристик композита «нематический ЖК/диацетат целлюлозы» с устойчивым эффектом самоорганизации, в частности, зависимости пропускания,

- рассеяния и малоуглового рассеяния излучения от величины внешнего электрического поля.
5. Экспериментальные исследования и разработка метода модифицирования оптических свойств диспергированного в полимере жидкого кристалла углеродными нанотрубками.
  6. Экспериментальное исследование электрооптических характеристик модифицированного углеродными нанотрубками ДПЖК (зависимостей пропускания и рассеяния света от величины внешнего электрического поля).
  7. Исследование и разработка методики получения ориентирующего покрытия для электрооптических ячеек на основе арахиновой кислоты и углеродных нанотрубок по методике Ленгмюра-Блоджетт.
  8. Разработка методики исследования и анализа динамики разделения фаз в многофазных системах с использованием когерентного и некогерентного излучения.
  9. Исследование динамики индуцированного полимеризацией фазового разделения под действием ультрафиолетового излучения системы «нематический жидкий кристалл/ фотополимер NOA65».
  10. Исследование критических параметров динамики подъема жидкости в неупорядоченных пористых средах оптическими методами.

**Научная новизна работы** определяется комплексом выполненных исследований и полученных результатов. Они сводятся к следующему:

1. Выявлена роль вклада многократного рассеяния света в ДПЖК «нематический ЖК/ПВС». Определены границы применимости модели однократного рассеяния света в приближении аномальной дифракции при учете разброса капель по размерам и параметров порядка ЖК включений.
2. Обнаружен эффект устойчивой самоорганизации структуры в системе «нематический жидкий кристалл/диацетат целлюлозы» в процессе формования пленки.
3. Разработана методика получения воспроизводимого эффекта самоорганизации структуры композита при формовании системы «нематический жидкий кристалл/диацетат целлюлозы».
4. Исследованы зависимости некоторых электрооптических характеристик (пропускание и рассеяние света, времена переориентации) от величины управляющего электрического поля системы «нематический жидкий кристалл/диацетат целлюлозы» с устойчивым эффектом самоорганизации структуры.
5. Предложен метод модифицирования свойств диспергированных в полимере жидких кристаллов углеродными нанотрубками.
6. Обнаружен и исследован аномальный электрооптический отклик ДПЖК, модифицированных углеродными нанотрубками.

7. Предложен метод ориентации молекул ЖК мономолекулярными пленками «арахиновая кислота/углеродные нанотрубки», полученными методом Ленгмюра-Блоджетт.
8. Разработан метод исследования динамики локальных неоднородностей границы раздела фаз в многофазных системах с использованием когерентного излучения.
9. Показано, что при критическом поведении границ раздела жидкой и газовой фаз в неупорядоченных фибриллярных средах влияние критического параметра  $f$  на динамику развития локальных неоднородностей границы незначительно, .
10. Показано, что развитие границы фронта на стадии закрепления контролируется в основном зависимостью частоты возникновения локальных неустойчивостей от критического параметра и происходит по диффузионному механизму.

### **Научная и практическая значимость работы**

Проведенные исследования существенно расширяют возможности получения жидкокристаллических композитов с новыми электрооптическими свойствами, что является актуальным не только с точки зрения применения композитов в приборах обработки и отображения информации, но и с фундаментальной точки зрения решения проблемы рассеяния света в дисперсных средах.

Использованная модель однократного рассеяния света в приближении аномальной дифракции с учетом гамма-распределения ЖК капель по размерам и параметров порядка ЖК капель позволяет выявлять вклад многократного рассеяния света в диспергированных полимером нематических жидких кристаллах.

Полученные результаты расширяют спектр применяемых полимеров для производства ЖК композитов. Предложенный в работе метод позволяет изготавливать ЖК композиты на основе диацетата целлюлозы, используемого в качестве полимерной матрицы, с устойчивым эффектом самоорганизации структуры типа «решетка».

Исследования в области модифицирования ЖК композитов углеродными нанотрубками (УНТ) позволят получать ЖК композиты с новыми электрооптическими свойствами, обусловленными введением наноматериалов с «уникальными» оптическими свойствами в состав исходного ЖК композита.

Анализ динамики границы раздела фаз многофазных систем вносит вклад как в изучение динамики движения жидкостей в различных неупорядоченных средах (горных пород, биологических объектов и т.д.), так и в исследование процесса фазового разделения в процессе полимеризации полимера. Полученные результаты могут быть полезны в медицине, нефтедобывающей и химической промышленности.

Полученные в работе результаты использовались при выполнении научных исследований по следующим грантам:

1. Грант РФФИ № 07-02-01467а

**Достоверность научных результатов**, представленных в работе, обусловлена тем, что они получены на основе апробированных методик измерений, а также учета систематических и случайных погрешностей для каждой из предложенных схем измерений. Достоверность результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, а также их соответствием результатам, полученным другими исследователями.

### **Личный вклад**

Все экспериментальные результаты исследований получены лично автором.

Постановка задач, обсуждение хода и развития исследований проводились совместно с Названовым В.Ф., Зимняковым Д.А., Шиповской А.Б., Глуховским Е.Г., Виленским М.А., Яковлевым Д.А., Башкатовым А.Н.

### **Научные результаты и положения, выносимые на защиту:**

1. Расчет углового распределения интенсивности рассеянного света в диспергированных в полимере жидких кристаллах, основанный на модели однократного рассеяния света в приближении аномальной дифракции с учетом параметра порядка ЖК-капли, применим при величине управляющего электрического поля, соответствующей оптическому пропусканию образцов ДПЖК, превышающему 90%.
2. При формировании слоев жидкокристаллического композита «нематический жидкий кристалл / диацетат целлюлозы» методом полива исходного раствора на стеклянную подложку (с прозрачным проводящим покрытием SnO<sub>2</sub>) под углом (15-60°), наблюдается устойчивый эффект самоорганизации структуры слоев композита в виде линейной структуры (решетки). Наилучшими электрооптическими характеристиками обладают образцы, полученные при угле формования ~45°.
3. Обнаруженный аномальный электрооптический отклик (в вольт-контрастной характеристике) диспергированных в полимере нематических жидких кристаллов с добавлением углеродных нанотрубок можно объяснить частичной предварительной ориентацией молекул ЖК в каплях углеродными нанотрубками, ориентирующий эффект которых определяется значительным дипольным моментом углеродных нанотрубок, индуцированным переносом заряда с молекул ЖК на УНТ, вследствие большого электронного сродства УНТ. По этой же причине углеродные нанотрубки в составе упорядоченного монослоя арахиновой кислоты

на стеклянных подложках влияют на наклонную ориентацию молекул сплошных слоев нематического жидкого кристалла.

4. В неупорядоченных пористых системах формирование границ раздела жидкой и газовой фаз на стадии закрепления происходит по механизму зарождения и развития локальных неустойчивостей границы и характеризуются критическим индексом скорости, меньшим 1, что соответствует конечному времени закрепления границы раздела жидкой и газовой фаз в пористых слоях.
5. Развитие локальных неоднородностей границы раздела жидкой и газовой фаз в пористых слоях на стадии закрепления происходит по диффузионному механизму, при этом величина коэффициента диффузии слабо зависит от критического параметра системы.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных научных конференциях: 1) XII International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophysics, Saratov, Russia, 2008; 2) XI International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophysics, Saratov, Russia, 2007; 3) Eight International Conference on Correlation Optics, Chernovci, Ucrain, 2007; 4) X International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophysics, Saratov, Russia, 2006; 5) Весенняя конференция по химии, СГУ, 2006, Саратов, Россия; 6) Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии. VI Всерос. конф. молодых ученых с международ. участием. Саратов, 2006; 7) Summer School "Imaging, Communication, and Disorder", 11-17 June 2006, Cargese, Corsica, France (INTAS travel grant); 8) XIII International Conference of Students, Post-graduate Students, and Young Scientists "Lomonosov-2006", 11-15 April, 2006, Moscow, Russia; 9) 6th International Young Scientists Conference "Optics & High Technology Material Science SPO 2005", Kyiv, Ukraine; 10) IX International School for Young Scientists and Students on Optics, Laser Physics & Biophysics, Saratov, Russia, 2005; 11) Second International Conference of Electronic Materials PHYEM'05, Kaluga, Russia, 2005; 12) Ежегодная студенческая конференция Саратовского государственного университета, Саратов, Россия, 2005; 13) Ежегодная студенческая конференция Саратовского государственного университета, Саратов, Россия, 2004

По теме диссертации опубликовано 10 работ (2 статьи в реферируемых журналах и 8 статей в сборниках трудов научных конференций).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей 5 глав, заключения, списка цитируемой литературы из 157 наименований. Диссертация изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 5 таблиц и иллюстрирована 63 рисунками.



## **Краткое содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы, отмечена научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы цель, задачи исследований и научные положения, кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** представлен обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященный описанию жидкокристаллических композитов нематического жидкий кристалл/полимер, а именно методики получения, новейших направлений применения, электрооптических характеристик.

Диспергированные в полимере жидкие кристаллы (ДПЖК) представляют собой пленку, состоящую из взвеси жидкокристаллических капель, «замороженных» в полимерной матрице. Оптические свойства ДПЖК управляются внешними воздействиями, такими как температура, механическая деформация, электрические и магнитные поля.

В связи с широким применением ДПЖК в приборах обработки и отображения информации широко исследуются электрооптические характеристики, такие, как зависимость пропускания и рассеяния излучения от величины управляющего электрического поля, динамика электрооптического отклика, сдвиг фазы волны оптического излучения, индуцированный внешним электрическим полем, малоугловое рассеяние света.

Изучению рассеянию света в ДПЖК посвящено множество работ, использующих различные приближения рассеяния света: Релея-Ганса, аномальной дифракции (АД), геометрической оптики. Однако явлениям многократного рассеяния света в ДПЖК уделено недостаточно внимания.

Наноразмерные частицы (фуллерены, углеродные нанотрубки и др.), обладающие уникальными физическими свойствами, введенные в состав ЖК-композита, модифицируют его оптические и электрооптические характеристики. Проведенный анализ литературных данных позволил определить перспективы исследований рассеяния света в ДПЖК и других неупорядоченных средах, а также перспективы дальнейшего развития методов получения и модифицирования ЖК-композитов.

Во **второй главе** описаны результаты экспериментальных и теоретических исследований рассеяния излучения ( $\lambda = 0.635 \text{ мкм}$ ) в ЖК композитах «нематический жидкий кристалл ЖК-807/ поливиниловый спирт» (НЖК/ПВС).

Экспериментально исследованы зависимости оптического пропускания излучения и сдвиг фаз волны излучения, индуцированный электрическим полем, в НЖК/ПВС от величины управляющего электрического поля. Использована теоретическая модель однократного рассеяния света в приближении аномальной дифракции, учитывающая разброс ЖК-капель по размеру и параметры порядка ЖК-капель. Полученная модель хорошо описывает экспериментальные данные зависимости пропускания света в

НЖК/ПВС от величины управляющего электрического поля (см. рис. 1). Из сравнения теоретического расчета с данными эксперимента получены некоторые параметры исследуемых образцов, которые были использованы при теоретическом расчете сдвига фаз волны оптического излучения, индуцированного электрическим полем в НЖК/ПВС. Получено хорошее соответствие полученного расчета с данными эксперимента.

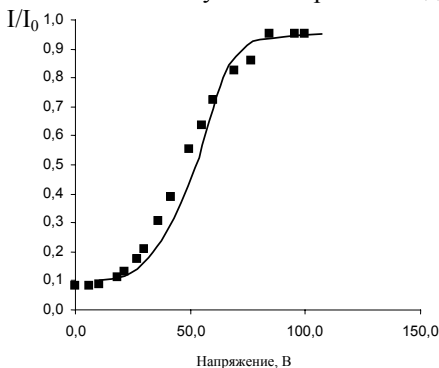


Рис. 1 Зависимость пропускания света через образец от величины приложенного напряжения. Расчет пропускания учитывает модифицированное гамма-распределение разброса капель по радиусу. (■ – эксперимент, — - теория). Параметры расчета образца:  $R = (2.1, 2.2)$  мкм,  $\eta = 0.4$ ,  $\mu = -0.93$ ,  $A = 0.18$

Исследована также зависимость углового распределения интенсивности рассеянного света в НЖК/ПВС от величины управляющего электрического поля, а также проведен теоретический расчет с учетом однократного рассеяния света в приближении АД с учетом параметров образцов, полученных ранее. Из сравнения расчета с данными эксперимента выявлен вклад многократного рассеяния света.

Проведено также моделирование многократного рассеяния света методом Монте-Карло для данных образцов (рис. 2). Моделирование проведено с использованием приведенного дифференциального сечения рассеяния ЖК-капли в качестве фазовой функции. Получено хорошее соответствие результатов расчета данным эксперимента (рис. 2). Таким образом, полученная модель распределения интенсивности рассеянного излучения в образцах НЖК/ПВС учитывает влияние эффектов многократного рассеяния света.

Установлено, что использованная теоретическая модель однократного рассеяния света позволяет описывать зависимость углового распределения интенсивности рассеянного света от величины электрического поля в исследуемых образцах НЖК/ПВС только при величине электрического поля, соответствующей значению оптического пропускания образцов свыше 90% (см. рис. 2).

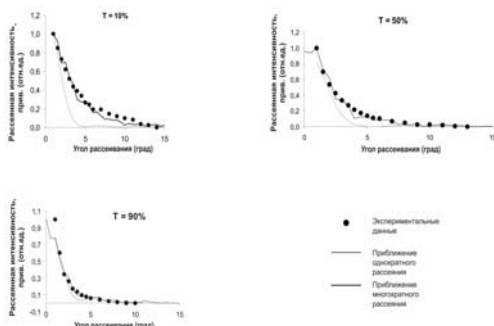


Рис. 2 Графики зависимости приведенного значения рассеянной интенсивности от угла рассеяния, при пропускании слоя  $T = 10\%, 50\%, 90\%$

**Третья глава** посвящена развитию метода получения жидкокристаллических композитов на основе «нематический жидкий кристалл /ацетат целлюлозы» (НЖК/ДАЦ) методом фазового разделения при испарении растворителя.

Показано, что диацетат целлюлозы возможно использовать в качестве полимерной матрицы для производства жидкокристаллических композитов.

Обнаружен устойчивый эффект самоорганизации морфологии системы «нематический жидкий кристалл /диацетат целлюлозы» в виде линейной структуры (решетки) в процессе формования пленок (см. рис. 3). Данный эффект наблюдается в процессе формования пленок при поливе исходного раствора на подложку, расположенную под углом ( $15^\circ \sim 60^\circ$ ).

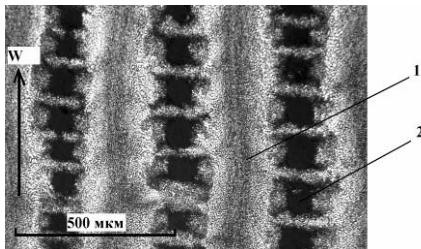


Рис. 3 Изображение пленки нематический ЖК-ДАЦ в поляризационном микроскопе в скрещенных поляризаторах (W — направление растекания исходной композиции; 1 — композит НЖК-ДАЦ; 2 — чистый ДАЦ без содержание ЖК). Образец ДАЦ:ЖК-1:2-45

Исследование оптического пропускания НЖК/ДАЦ с эффектом самоорганизации показало, что наилучшим контрастом обладают слои, полученные при угле формования  $\sim 45^\circ$ .

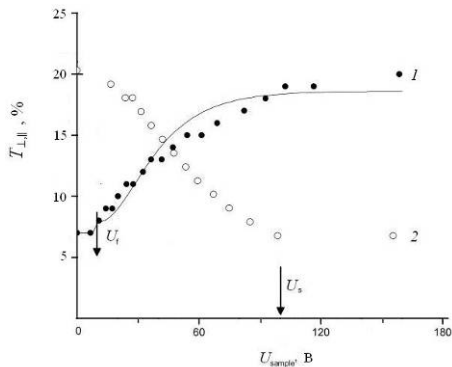


Рис. 4 Зависимость пропускания  $T_{\perp, \parallel}$  от величины управляющего напряжения  $U_{\text{sample}}$  при параллельном (1) и скрещенном (2) расположении поляризатора и анализатора. Сплошная линия – теоретический расчет

Результаты исследования малоуглового рассеяния света в НЖК/ДАЦ с эффектом самоорганизации представлены на рис. 5. Сравнивая полученные результаты с результатами обычных ЖК композитах «НЖК/ПВС», можно видеть принципиальные отличия. Во-первых, максимум интенсивности находится при 0 град и остается практически постоянным по величине и ширине (рис. 5). Во-вторых, на зависимости хорошо видны «плечи», которые при увеличении управляющего напряжения постепенно исчезают.

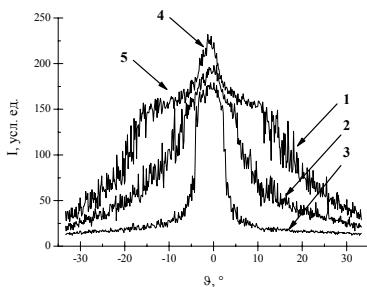


Рис. 5 Зависимость интенсивности малоуглового рассеяния излучения от угла рассеяния (1 –  $U_{\text{sample}}=0\text{В}$ , 2 –  $U_{\text{sample}}=30\text{В}$ , 3 –  $U_{\text{sample}}=100\text{В}$ , 4 – максимум интенсивности, 5 – «плечо»)

**Четвертая глава** посвящена модифицированию свойств жидкокристаллических композитов углеродными нанотрубками.

Впервые предложен метод модифицирования диспергированных в полимере нематических жидких кристаллов (ДПЖК) углеродными нанотрубками (УНТ). В полученном модифицированном материале исследованы основные электрооптические характеристики, такие, как зависимости пропускания и рассеяния света от величины управляющего электрического поля. Обнаружено anomalous электрооптическое пропускание образцов ДПЖК, модифицированных УНТ, при скрещенном расположении поляризатора и анализатора (см. рис. 6), который объясняется эффектом предварительной ориентации молекул ЖК многостенными углеродными нанотрубками. Эффект объясняется наличием дипольного

момента УНТ, индуцированным вследствие большого электронного сродства УНТ переносом заряда с молекул ЖК на УНТ в ЖК композите.

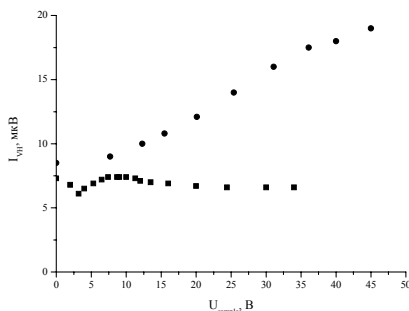


Рис. 6 Экспериментальная зависимость оптического пропускания пленок ДПЖК (●) и ДПЖК модифицированных УНТ (■) от величины управляющего напряжения при скрещенном расположении поляризатора и анализатора

Предложен, также метод ориентации молекул нематического ЖК в сплошных слоях ЖК мономолекулярными пленками «арахиновая кислота/углеродные нанотрубки» (АРХ/УНТ), полученными методом Ленгмюра-Блоджетт. При исследовании электрооптических характеристик ЖК ячеек с ориентирующим покрытием АРХ/УНТ выявлена зависимость ориентации первого слоя молекул ЖК от направления нанесения ориентирующего покрытия арахисовая кислота/углеродные нанотрубки (рис. 7).

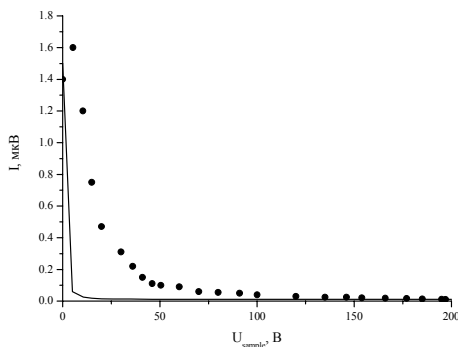


Рис. 7 Зависимость пропускания излучения от величины управляющего напряжения при скрещенном расположении поляризатора и анализатора (— - ЖК ячейки с ориентирующим покрытием  $C_{20}H_{40}O_2$ ; ● - ЖК ячейки с ориентирующим покрытием  $C_{20}H_{40}O_2$ -УНТ

**Пятая глава** посвящена исследованию динамики границы раздела фаз неупорядоченных сред. В работе рассмотрены две двухфазные системы: 1) нематический жидкий кристалл /фотополимер в процессе фазового разделения, индуцированного ультрафиолетовым излучением; 2) неупорядоченные фибриллярные структуры в процессе капиллярного движения жидкости.

В работе представлены результаты исследования динамики границы нематический жидкий кристалл /фотополимер (ЖК-807/NOA65) в процессе

фазового разделения, индуцированного ультрафиолетовым излучением, с использованием спекл-корреллометрического анализа обратно рассеянного излучения. Показано, что ДПЖК образуются лишь при соотношении компонентов исходной смеси больше, чем 3:7 (ЖК-807:NOA65). Анализ показал, что зависимость средней интенсивности спеклов  $\langle I \rangle$  от времени облучения характеризуется скачкообразным увеличением интенсивности обратно рассеянного излучения, что свидетельствует о квазипороговом переходе от стадии «разогрева» к стадии формирования и резкому росту ЖК капель на данной стадии. Также установлено, что угол наклона зависимости на стадии «формирования» зависит от концентрации, причем чем выше концентрация ЖК в смеси, тем угол наклона больше, однако время начала стадии «формирования» смещается в сторону больших времен при увеличении концентрации ЖК в исходной смеси. (см. рис. 8)

На стадии «отверждения» зависимость средней интенсивности детектируемого спекл-модулированного излучения аппроксимируется функция времени  $\langle I \rangle \sim t^{2/3}$  (см. рис. 8).

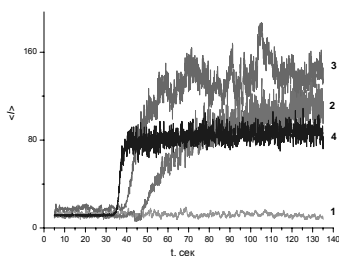


Рис. 8 Зависимости средней интенсивности  $\langle I \rangle$  детектируемого спекл-модулированного излучения от времени УФ облучения. На графики представлены зависимости для различных концентраций компонент ЖК-807:NOA65 (1 – 3:7; 2 – 4:6; 3 – 5:5; 4 – 6:4)

В результате анализа последовательностей изображений поверхности слоев неупорядоченной пористой среды (бумаги) в процессе капиллярного подъема жидкости, полученных при освещении некогерентным и когерентным излучением, установлены закономерности, контролирующие критическое поведение границы раздела жидкой и газовой фаз в слое в процессе ее закрепления. Предложена феноменологическая модель макроскопической динамики границы раздела фаз для интерпретации полученных экспериментальных данных и определены значения критических индексов, характеризующих исследуемые образцы в рамках данной модели.

Показано, что при критическом поведении границ раздела жидкой и газовой фаз в неупорядоченных фибриллярных слоях влияние критического параметра  $f$  на динамику развития локальных неустойчивостей границы незначительно (см. рис. 9). Развитие границы на стадии закрепления контролируется в основном зависимостью частоты возникновения локальных неустойчивостей от критического параметра. Также показано, что развитие глобальных неоднородностей границы раздела жидкой и газовой фаз в пористых слоях на стадии закрепления происходит по диффузионному механизму, при этом величина коэффициента диффузии слабо зависит от критического параметра системы (см. рис. 10). Полученные величины сопоставлены с представленными в литературе результатами численного моделирования для дискретных моделей направленного протекания, соответствующих уравнению Кардара-Паризи-Жанга.

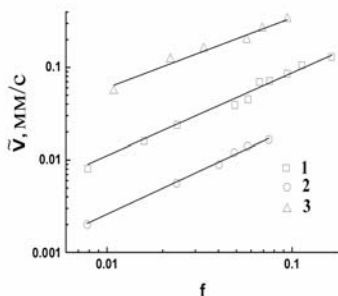


Рис. 9 Зависимости  $\tilde{v}$  от критического параметра  $f$  на стадии закрепления границы. Образцы: 1 – ФБ; 2 – ФМ; 3 – ФС

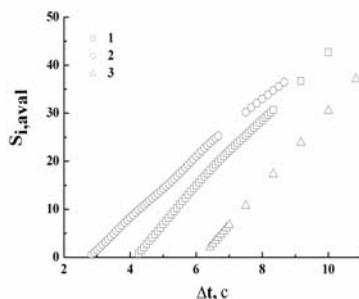


Рис. 10 Зависимости  $S_{i,aval}(\Delta t)$  при малых значениях критического параметра. Образец – ФС; 1 -  $f \approx 0.07$ ; 2 -  $f \approx 0.03$ ; 3 -  $f \approx 0.01$

**В заключении** сформулированы основные результаты работы и выводы.

#### Основные результаты и выводы:

1. Исследована модель однократного рассеяния света в приближении аномальной дифракции с учетом распределения размера и параметров порядка включений жидкого кристалла. Данная модель использована для выявления эффектов многократного рассеяния света в диспергированных в полимере жидких кристаллах.

2. Методом сравнения теоретического расчета по предложенной модели, а также по методу Монте-Карло с данными эксперимента установлены границы применимости для данной модели.
3. Предложена методика формирования пленок «нематический жидкий кристалл / диацетат целлюлозы» с устойчивым эффектом самоорганизации структуры.
4. Впервые измерены электрооптические характеристики пленок «нематический жидкий кристалл / диацетат целлюлозы» с устойчивым эффектом самоорганизации структуры, такие, как пропускание и рассеяние света, малоугловое рассеяние света и электрооптический отклик.
5. Предложена методика модифицирования диспергированных в полимере нематических жидких кристаллов углеродными нанотрубками.
6. В диспергированных в полимере нематических жидких кристаллах, модифицированных углеродными нанотрубками обнаружен эффект предварительной ориентации молекул жидкого кристалла углеродными нанотрубками.
7. Предложен метод ориентации молекул жидкого кристалла мономолекулярными пленками «арахиновая кислота / углеродные нанотрубки», полученные методом Ленгмюра-Блоджетт.
8. Экспериментально исследована динамика фазового разделения системы нематический жидкий кристалл/фотополимер в процессе полимеризации под воздействием ультрафиолетового излучения с использованием спекл-корреллометрического анализа. Показано, что средняя интенсивность картин спекл-полей есть функция времени вида  $\langle I \rangle \propto t^{2/3}$
9. Экспериментально исследованы критические поведения границ раздела жидкой и газовой фаз в неупорядоченных пористых слоях, установлено незначительное влияние критического параметра  $f < 1$  на динамику развития локальных неустойчивостей границы («лаvin»); при этом развитие границы на стадии закрепления контролируется в основном зависимостью частоты возникновения локальных неустойчивостей от критического параметра.
10. Показано, что развитие локальных неустойчивостей границы раздела фаз на стадии закрепления происходит по диффузионному механизму.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. Садовой А.В., Шиповская А.Б., Названов В.Ф. Самоорганизация и электрооптические характеристики композита нематический жидкий кристалл-диацетат целлюлозы // Письма в ЖТФ. - 2008. - Т. 34. - В. 23. - С. 15-20



2. Садовой А.В., Названов В.Ф., Оптическое пропускание диспергированными в полимере жидкими кристаллами с углеродными нанотрубками // Письма в ЖТФ, 2006, Т. 32, №. 15, 30-34
3. Садовой А.В., Медведев М.В., Названов В.Ф., Исследование многократного рассеяния света в капсулированных полимером жидких кристаллах: моделирование методом Монте-Карло // Известия СГУ серия физика, 2008, Том 8, №1, 26-29
4. Sadovoy A., Dubovik Yu., Nazvanov V.F. Carbon nanotubes aligning by Langmuir-Blodgett technique and visualizing by nematic liquid crystals // Proc. of SPIE, 2007, Vol. 6536 653609-1
5. Sadovoy A.V., Nazvanov V.F. Study of the electro-optical response of polymer dispersed liquid crystal doped with multi-wall carbon nanotubes // Proc. SPIE, 2005, Vol. 6164, p. 65-68
6. Sadovoy A.V., Nazvanov V.F. Investigation of multiple light scattering in polymer dispersed liquid crystals // Physics of Electronic Materials: 2nd International Conference Proceedings, Kaluga, Russia, May 24-27, 2005. Vol. 2. - Kaluga: KSPU Press, 2005. - 344 p.
7. Исюков Д.П., Садовой А.В., Шиповская А.Б., Шмаков С.Л., Жидкокристаллический композит на основе диацетата целлюлозы и низкомолекулярного жидкого кристалла // Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии: Межвуз. сборник науч. трудов VI Всерос. конф. молодых ученых с международ. участием. Саратов: Изд-во «Научная книга». 2007. с. 271-274
8. Zimnyakov D.A., Sadovoy A.V., Vilensky M.A., White-light and speckle-correlation analysis of imbibition in porous media: critical properties of near-pinned interfaces // Proc. of SPIE, 2008, Vol. 7008, 70080T-1
9. Zimnyakov D.A., Sinichkin Y.P., Kuznetsova L.V., Vilensky M.A., Sadovoy A.V., Coherence-domain and polarization diagnostics of spatially oriented and random fibrous media such as paper and collagenous biotissues. 3rd Russian-Finnish Meeting "Photonics and Laser Symposiym" Book of Abstracts, 2007, 4.
10. Vilensky M, Zimnyakov D.A., Sadovoy A.V., Speckle-based probes of scattering media with the use of frequency-modulated laser light. Proceedings of SPIE on Eight International Conference on Correlation Optics, 2007, V.7008

САДОВОЙ АНТОН ВАЛЕНТИНОВИЧ

**СТАТИЧЕСКОЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В  
НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ  
КОМПОЗИТАХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

Автореферат