

**Московский Государственный Университет
имени М.В. Ломоносова**

На правах рукописи

БЕЛОГОРОХОВ ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
СТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КОМПЛЕКСОВ
ФТАЛОЦИАНИНОВ, СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ ЛАНТАНИДОВ В КАЧЕСТВЕ
КОМПЛЕКСООБРАЗОВАТЕЛЯ**

01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре общей физики и магнитоупорядоченных сред
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН,
Хохлов Дмитрий Ремович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Багаев Виктор Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент
Кытин Владимир Геннадиевич

Ведущая организация: Государственный технологический университет
«Московский государственный институт стали и
сплавов» ("МИСиС")

Защита состоится апреля 2009 г. в часов на заседании Диссертационного Совета
№ Д-501.001.70 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова
по адресу: 119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.35, конференц-зал Центра
коллективного пользования физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова

Автореферат разослан марта 2009 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета Д-501.001.70
доктор физико-математических наук,
профессор

Г.С. Плотников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Органические материалы составляют основу всех живущих на планете организмов. Они обеспечивают необходимый для существования обмен веществ, контролируют функции всех органов, а также защищают от вредных внешних и внутренних воздействий. Не так давно стало возможным управлять органическими молекулами, встраивая их в современные интегральные схемы. Молекулярные структуры типа политиофена, пентацена, олиготиофена и фталоцианина нашли широкое применение в создании тонкопленочных транзисторов и газовых сенсоров [1,2]. Фталоцианиновые комплексы находят также широкое применение в области создания органических полупроводниковых приборов на основе эффекта поля [3–5]. Наравне со сложными белковыми молекулами важные свойства демонстрируют более простые и широко доступные соединения. Так, известные всем молекулы хлорофилла, входящие в состав растений, не только отвечают за процесс фотосинтеза, но и проявляют необычные оптические и магнитные свойства, что позволяет использовать эти материалы для создания спиновых стекол и зарядовой памяти, а также открывает широкие возможности для использования металлопорфиринов в фотосенсибилизационных задачах. Недостатком металлопорфиринов является их способность к деконволюции при значительном увеличении температуры. В связи с этим большую ценность приобретают соединения металлфталоцианинов, так как эти соединения обладают очень высокой термической и химической устойчивостью – на воздухе практически не разрушаются вплоть до температур 400–500°C, а в вакууме большинство фталоцианинов не разлагается до 900°C, они не взаимодействуют с сильными кислотами и сильными основаниями, а также обладают значительным оптическим поглощением в видимой области спектра.

Одними из наиболее интересных объектов такого рода являются металлфталоцианиновые комплексы (PcM), содержащие атом эрбия в качестве комплексообразователя. Интерес к указанным материалам возник вследствие того, что атомы эрбия поглощают электромагнитное излучение на длине волны 1480 нм и излучают на длине волны около 1500 нм. Этот диапазон частот совпадает с максимумом пропускания оптоволоконных систем на основе двуокиси кремния.

В настоящий момент существуют также более сложные молекулярные комплексы на основе молекул фталоцианина, такие, в которых один ион комплексообразователя находится между плоскопараллельными молекулами органических лигандов. Наиболее яркими представителями таких молекул являются комплексы бис- и трифталоцианина. Физические свойства трифталоцианина мало изучены. Кроме того, неизвестно, каким

образом изменяются электрические и оптические свойства молекулярного комплекса по мере увеличения количества макроциклов в молекуле, также не представлено ни одной полуклассической модели, в рамках которой можно описать оптические и электрофизические процессы, происходящие в таких сложных органических полупроводниках, как бис- и трифталоцианиновые комплексы.

Цель работы

Целью данной работы являлось получение новой информации об электрических и оптических свойствах новых органических полупроводниковых структур, состоящих из сложных молекул фталоцианинов, легированных эрбием, европием и лютецием, содержащих в своей структуре от 65 до 200 атомов. В связи с этим в работе были решены следующие **задачи**:

1. Проведена детальная интерпретация спектров пропускания и фотолюминесценции органических полупроводниковых структур, состоящих из фталоцианиновых комплексов, в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн с целью выявления преимуществ исследуемых структур для создания новых элементов современной оптоэлектроники.
2. Проведены исследования процессов электропроводности в полупроводниковых структурах, состоящих из фталоцианиновых комплексов на постоянном и переменном токе.
3. Создана полуклассическая модель, описывающая физические свойства исследуемых полупроводниковых структур, состоящих из фталоцианиновых комплексов.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации:

1. Разработана полуклассическая модель, позволяющая описать частотные зависимости мнимой и действительной части диэлектрической проницаемости полупроводниковых структур, состоящих из фталоцианиновых комплексов.
2. Установлены закономерности изменения экспериментальных оптических спектров пропускания в области 400–1700 нм.
3. Найдены соотношения, позволяющие рассчитать значения статической диэлектрической проницаемости в полупроводниковых структурах, состоящих из фталоцианиновых комплексов.
4. Получены значения энергий активации для полупроводниковых структур, состоящих из фталоцианиновых комплексов с несимметричным распределением плотности заряда.
5. Выявлена природа появления дополнительных мод колебаний в оптических спектрах среднего и ближнего ИК-диапазонов в полупроводниковых структурах моно-, бис- и трифталоцианина, содержащих ионы эрбия в качестве комплексообразователя.

6. Показано, что с усложнением молекулярной структуры исследуемых комплексов энергия активации проводимости уменьшается, при этом значение коэффициента поглощения в области 1498–1560 нм увеличивается, и в то же время наблюдается уменьшение сигнала фотолюминесценции в области 760–800 нм.

7. Получены спектральные зависимости фотолюминесценции видимого диапазона для полупроводниковых структур, состоящих из моно-, бис- и трифталоцианинов, содержащих ионы эрбия и лютеция в качестве комплексообразователей.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость диссертации определяется тем, что полученные в настоящей работе результаты способствуют развитию фундаментальных знаний о физических свойствах органических полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов. Совокупность данных о полупроводниковых структурах, состоящих из фталоцианиновых комплексов, об электропроводности на постоянном и переменном токе, оптических свойствах в области ультрафиолета и в дальней инфракрасной области длин волн необходима для оптимизации параметров и разработки дизайна современных оптоэлектронных устройств. Результаты исследований могут быть положены в основу разработки перспективных технологий получения органических полупроводниковых материалов с заданными свойствами для создания новых полупроводниковых транзисторов на основе полупроводниковых структур, состоящих из моно-, бис- и трифталоцианинов лантанидов.

Научная обоснованность и достоверность полученных экспериментальных результатов, представленных в диссертационной работе, определяется использованием современной экспериментальной техники и воспроизведением обнаруженных эффектов рядом зарубежных научных коллективов, о чем свидетельствуют ссылки в статьях, обзорах и монографиях на опубликованные автором работы по теме данной диссертации.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Показано, что во фталоцианиновых комплексах диссипация энергии излучения ближнего ИК– диапазона происходит вследствие внутрицентровых переходов в атоме эрбия и за счет переноса заряда в ближайших к центру молекулы фталоцианина атомах углерода.
2. Показано, что коэффициент поглощения для трифталоцианина эрбия на длине волны 1.5 мкм более, чем в 2 раза превышает коэффициент поглощения моно- и бисфталоцианина эрбия.
3. В спектрах комбинационного рассеяния света полупроводниковой структуры на основе бутилзамещенного трифталоцианина эрбия обнаружено присутствие четырех

пиков в области больших частотных сдвигов, связанных со слабыми внеплоскостными колебаниями фталоцианиновых колец.

4. Показано, что с увеличением количества органических лигандов в молекулярной структуре фталоцианиновых комплексов величина энергии активации электрической проводимости существенно уменьшается.

5. В спектрах фотолюминесценции неупорядоченных полупроводниковых структур на основе бутилзамещенных фталоцианиновых комплексов обнаружены пики фотолюминесценции на длинах волн 888 нм (1.4 эВ), 760 нм (1.6 эВ) и 708 нм (1.75 эВ), связанные с электронными переходами внутри самих органических комплексов.

6. Установлено, что при изменении распределения зарядовой плотности в макромолекулах наблюдается изменение энергии вибронных состояний и на активационной зависимости сопротивления от температуры появляется второй участок с энергией активации 0.48 эВ.

7. В рамках теории дипольного квазистатического приближения вычислены значения статической диэлектрической проницаемости для полупроводниковых структур на основе моно-, бис- и трифталоцианина эрбия.

Апробация работы: Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 24-х работах, из которых 6 – статьи в научных журналах, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ (см. список публикаций) и 18 – тезисы докладов в материалах конференций.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях «XII Национальная конференция по росту кристаллов, НКРК-2006», Москва, 2006; «Восьмая всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике», Санкт-Петербург, 2006; 2nd International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured materials, Alvor, Algarve, Portugal, 2007; International Conference «Functional materials», ICFM, Ukraine, Crimea, Partenit 2007; Межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2007», Москва, 2007; VIII Российская конференция по физике полупроводников. «Полупроводники-2007», Екатеринбург, 2007; Четвертая Российская конференции с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе (Кремний 2007), Москва, 2007; 6-th Intern. Conf. On Porous Semiconductors – Science and Technology, Sa Coma-Mallorka, Spain, 2008; XIII Национальная Конференция по Росту Кристаллов, Москва, 2008; 17th International Conference of the Israel Society for Quality, Jerusalem, Israel, 2008; Fifth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines, ICPP-5, Russia, Moscow, 2008;

Десятая Всероссийская Молодежная Конференция по Физике Полупроводников и Наноструктур, Полупроводниковой Опто- и Нанoeлектронике, Санкт-Петербург, 2008.

Публикации: По результатам диссертационной работы опубликовано 24 работы (6 статей в научных журналах и 18 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций), список которых приведен в конце автореферата. Отметим, что данный список не включает публикации в трудах отечественных и международных конференций, а также статьи автора, прямо не связанные с темой диссертации.

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в постановке и обосновании задач исследования полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов эрбия, в подготовке и выборе образцов, в проведении расчетов и выполнении экспериментов по исследованию физико-химических свойств указанных полупроводников, в интерпретации полученных результатов.

Работы проводились в тесном взаимодействии с соавторами, которые не возражают против использования в диссертации совместно полученных результатов.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, семи глав и списка литературы. Объем диссертации составляет 150 страниц машинописного текста, включая 61 рисунок. Список цитированной литературы состоит из 138 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертаций, сформулирована цель работы, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость, приведены защищаемые положения и кратко изложено содержание работы по главам.

Первая глава диссертации посвящена краткому литературному обзору, в котором изложены общие представления о свойствах полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексах, накопленные к настоящему времени.

Из представленного обзора был сделан вывод, что в большинстве работ исследуются процессы, происходящие в совершенно разных по своему строению системах фталоцианиновых комплексов, выращенных на подложках разными методами и полученными разными способами. Также некоторые разногласия в полученные базы данных вносит вклад периферийных молекулярных групп, которые в случае с кристаллами из монофталоцианина меди могут влиять на их свойства. Поэтому основной целью работы являлось проведение комплексных исследований оптических и электрофизических свойств фталоцианиновых полупроводниковых структур, полученных в одинаковых условиях и несущих одинаковые молекулярные группы на периферии основной макромолекулы. Также остается открытым вопрос о том, как влияет усложнение

молекулярной структуры фталоцианиновых комплексов на свойства всей полупроводниковой системы. Данный аспект проблемы является очень важным для создания новых устройств современной микроэлектроники и разработки новых материалов для фотовольтаики (т.е. устройств, генерирующих электрический ток при освещении) и оптических сенсоров и является одним из приоритетов для фундаментальных научных исследований в области нанотехнологий и при разработке современных эффективных возобновляемых источников энергии.

Вторая глава содержит материал, посвященный методикам измерений, выполненным в настоящей работе, и приведено описание установок, использовавшихся для исследования оптических и электрических свойств полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов.

Третья глава посвящена полученным экспериментальным данным по исследованию оптических свойств полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов методами инфракрасной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

На рисунке 1 показан типичный спектр пропускания полупроводниковых структур фталоцианиновых комплексов моно-, бис- и трифталоцианина эрбия, содержащие бутильные молекулы на периферии.

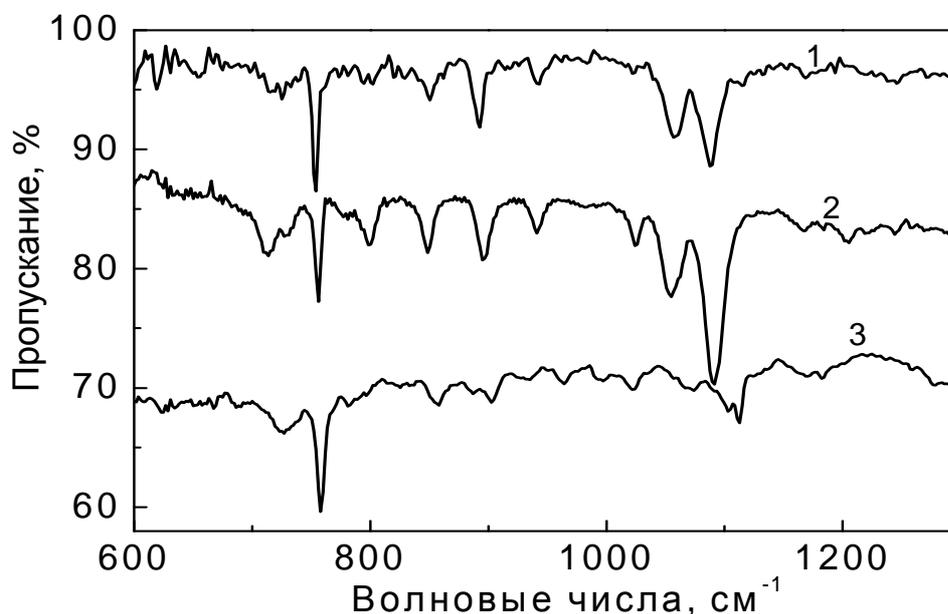


Рис. 1. Спектры пропускания фталоцианиновых комплексов в среднем ИК-диапазоне волновых чисел от 400 см^{-1} до 1300 см^{-1} . Кривая 1 – монофталоцианин эрбия; 2 – бисфталоцианин эрбия; кривая 3 – трифталоцианин эрбия.

В ходе проведенных исследований были получены координаты спектрального положения линий поглощения, отвечающих основным молекулярным группам, входящим в

структуру фталоцианиновых комплексов. Линии на 1505 см^{-1} , 1319 см^{-1} , 1321 см^{-1} , 1342 см^{-1} , $997\div 1009\text{ см}^{-1}$, $1023\div 1200\text{ см}^{-1}$, 1455 см^{-1} , $1398\div 1440\text{ см}^{-1}$, 624 см^{-1} , 689 и 801 см^{-1} характеризуют вибронные состояния пиррольной группы, аза-атомов азота, $-\text{C}-\text{H}-$ групп, изоиндолных групп и самого фталоцианинового кольца [6-8]. Проведенный детальный анализ спектральных зависимостей пропускания в среднем ИК-диапазоне позволил установить, что усложнение молекулярной структуры, сопровождающееся увеличением количества органических лигандов, приводит к смещению положения полос поглощения в сторону меньших волновых чисел.

Мода валентных колебаний бензольных колец на 1615 см^{-1} [6], присутствующая в спектре пропускания трифталоцианина, может изменять свое положение при усложнении молекулярной структуры. Так, в спектре пропускания монофталоцианина положение указанной линии приходится на 1619 см^{-1} , а в спектре бисфталоцианина смещается на 1617 см^{-1} . На рисунке 2 проиллюстрировано, как положение линии на 1114 см^{-1} (трифталоцианин эрбия) смещается в сторону меньших волновых чисел при упрощении молекулярной структуры.

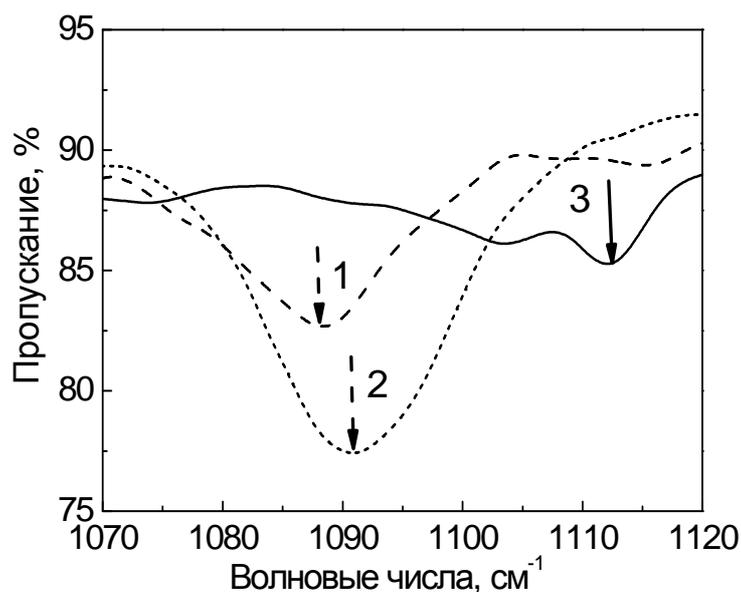


Рис. 2. Фрагмент спектра пропускания в области $1070\text{--}1111\text{ см}^{-1}$, иллюстрирующий сдвиг линии поглощения, отвечающей объединенным колебаниям молекул изоиндола и $-\text{C}-\text{H}$ групп. Кривая 1 – монофталоцианин эрбия; кривая 2 – бисфталоцианин эрбия; кривая 3 – трифталоцианин эрбия.

Дополнительную информацию об изменении вибронных состояний удалось получить из анализа спектров комбинационного рассеяния полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов. Как показано на рисунке 3, в области больших рамановских сдвигов в спектрах трифталоцианина эрбия (рис. 3, кривая 2) наблюдается серия из четырех пиков: 366 см^{-1} , 279 см^{-1} , 208 см^{-1} и 122 см^{-1} . Пики расположены почти эквидистантно друг за другом. Среднее расстояние между ними составляет примерно 79 см^{-1} . Появление указанных максимумов в спектре комбинационного рассеяния света в трифталоцианинах эрбия является следствием влияния электростатического взаимодействия параллельно расположенных молекул фталоцианиновых лигандов друг с

другом и с ионами лантанидов (в нашем случае – с эрбием).

В работе [9] показано, что в спектрах КРС сэндвичеобразных структур типа бисфталоцианинов редкоземельных металлов может возникать пара линий, расположенных на расстоянии 70 см^{-1} друг от друга. Частоты этих линий соответствуют границе среднего и дальнего инфракрасного диапазонов. Такие пики отвечают слабым внеплоскостным колебаниям фталоцианиновых колец.

В спектре КРС планарных структур типа монофталоцианина эрбия указанной последовательности

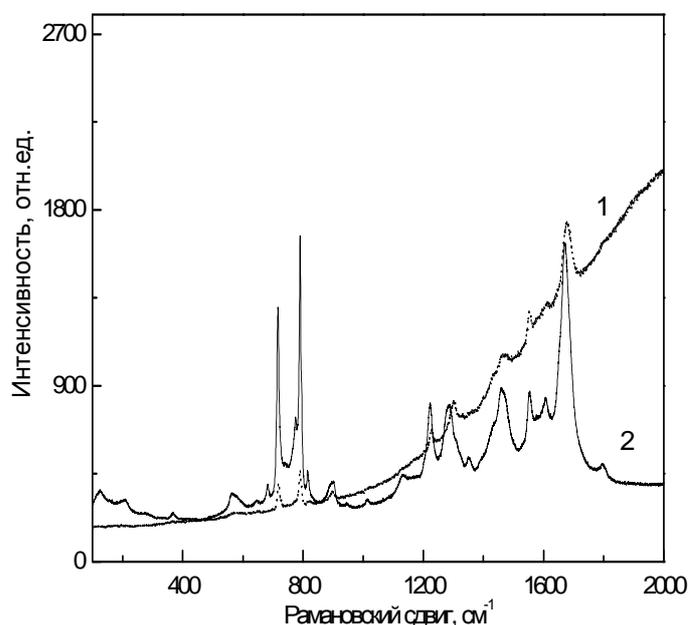


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света фталоцианиновых комплексов эрбия в диапазоне $100\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$: кривая 1 – спектр монофталоцианина эрбия; кривая 2 – спектр трифталоцианина эрбия.

пиков не наблюдается (рис. 3, кривая 1). Данное обстоятельство позволяет предположить, что положение наблюдаемых в нашей работе четырёх пиков не зависит от типа периферийных заместителей и от способа синтеза образцов. На интенсивность и положение указанных четырех пиков может влиять только увеличение органических лигандов и комплексообразователей.

Исследования спектров пропускания полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов показало, что поглощение ИК-излучения в области длин волн 1.5 мкм может иметь место вследствие суперпозиции двух процессов: поглощения за счет внутрицентровых переходов в атоме эрбия и поглощения за счет переноса заряда в ближайших к центру молекулы атомов углерода. В полупроводниковых структурах типа трифталоцианина эрбия поглощения за счет переноса заряда в ближайших к центру молекулы атомов углерода не наблюдается.

Четвертая глава посвящена исследованию транспортных свойств полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов. Характерная температурная зависимость удельной электропроводности фталоцианиновых комплексов представлена на рис. 4. Данные зависимости демонстрируют активационный характер и

могут быть описаны следующим выражением:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a / kT), \quad (1)$$

где σ_0 – параметр, зависящий от структуры и типа полупроводника; E_a – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – температура. Полученные значения энергии активации для структур моно-, бис- и трифталоцианина эрбия, содержащих бутиловые периферийные заместители, составили 0.65 эВ, 0.58 эВ и 0.12 эВ соответственно.

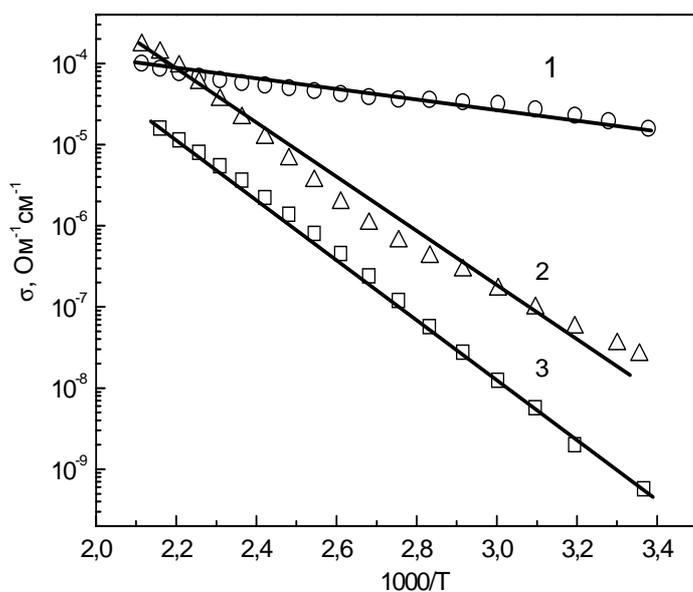


Рис. 4. Температурные зависимости электропроводности образцов полупроводниковых структур на основе бутилзамещенного фталоцианина, содержащего ионы эрбия, от обратной температуры: кривая 1 – трифталоцианин эрбия; кривая 2 – бисфталоцианин эрбия; кривая 3 – монофталоцианин эрбия.

Разница в величине значений энергии активации у полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов обусловлена наличием большего числа координационных взаимодействий заряженных ионов органических лигандов Pc^- друг с другом и с ионами находящегося в центре молекулы комплексообразователя. Расположение ионов и молекул в трифталоцианине позволяет органическому лиганду (Pc^-) взаимодействовать сразу с двумя ионами эрбия, что влечет за собой возможность возникновения

новых энергетических состояний. Особенности проводимости в органических полупроводниках пытаются объяснить в рамках модели прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка, то есть, когда проводимость обеспечивается, главным образом, перескоками электронов между состояниями с разной энергией, причем дефицит энергии покрывается за счет энергии тепловых колебаний атомов.

Пятая глава диссертации повествует об излучательных свойствах полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов, а также об их изменении при усложнении структуры молекул, формирующих полупроводниковую систему.

Спектр фотолюминесценции структур, состоящих из свободных лигандов (безметалльного монофталоцианина) (рис. 5. а) представляет собой широкую полосу с тремя различимыми максимумами на длинах волн 888 нм (1.4 эВ), 760 нм (1.6 эВ) и 708

нм (1.75 эВ) соответственно. В спектрах ФЛ, полученных в данной работе, существование максимума средней интенсивности на длине волны 888 нм можно объяснить молекулярной люминесценцией ($S_1'-S_0$) или появлением эксимерного состояния [10].

Пик в области 760 нм может появляться вследствие эмиссии первого синглетного экситонного состояния [10], а максимум ФЛ, располагающийся на длине волны 708 нм, может проявляться в ходе электронных переходов с одной молекулярной орбитали на другую внутри самой молекулы по аналогии с межзонными переходами в кристаллических полупроводниках.

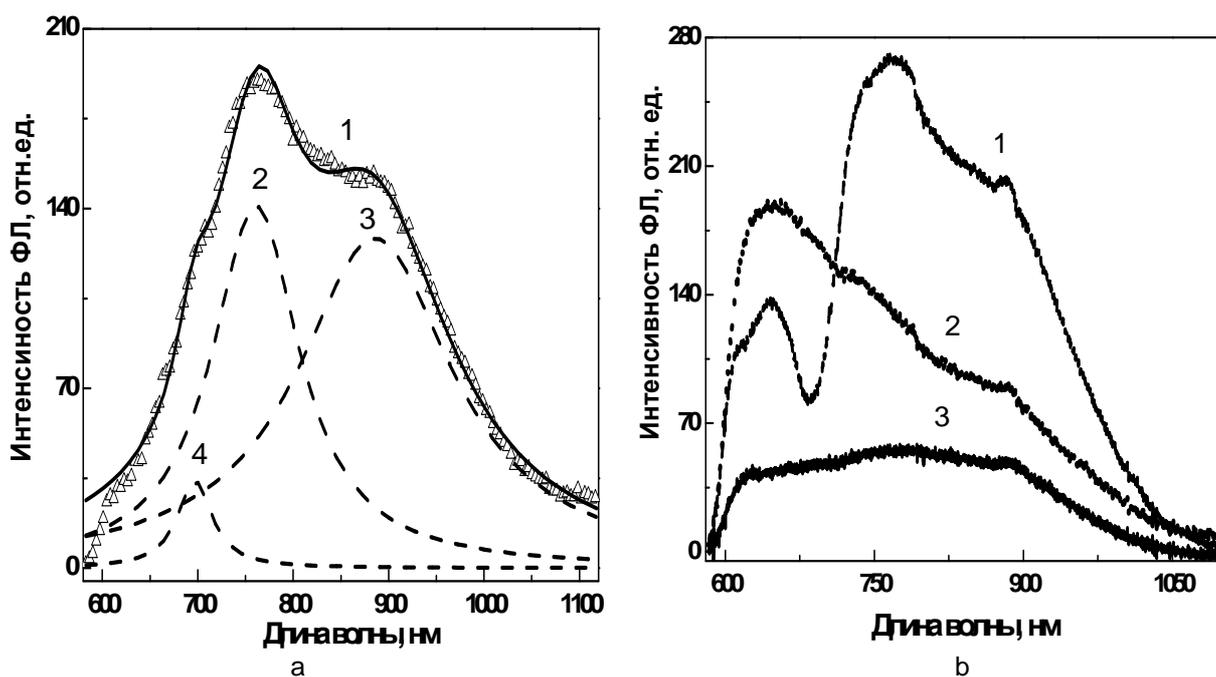


Рис.5. Спектры фотолюминесценции полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов: а – результат теоретической подгонки экспериментального спектра ФЛ бутилзамещенного монофталоцианина: кривая 1 – теоретическая спектральная зависимость ФЛ; кривые 2,3,4 – подгоночные кривые Лоренца; б – спектры ФЛ полупроводниковых структур на основе бутилзамещенных фталоцианиновых комплексов, содержащих эрбий: кривая 1 – монофталоцианин; кривая 2 – бисфталоцианин; кривая 3 – трифталоцианин.

В ходе работы показано, что при переходе от планарной структуры монофталоцианина к сэндвичеобразной структуре типа бис- и трифталоцианина наблюдается резкое ухудшение сигналов люминесценции, связанных с экситонными состояниями самой молекулы (рис. 5. б). Из приведенных на рисунке 5 (б) спектральных зависимостей сигнала ФЛ видно, что в структурах типа бисфталоцианина интенсивность максимумов на 888 нм (1.4 эВ), 760 нм (1.6 эВ) уменьшается в 1.80 и 2.24 раза соответственно (рис. 5.б, кривая 2). Однако интенсивность максимума, обусловленного электронными переходами между энергетическими уровнями иона эрбия (1.87 эВ), увеличивается в 1.4 раза. Наличие бутильных комплексов в молекулярной структуре всех трех типов органических молекул

исключает возможность влияния алькильных периферийных заместителей на наблюдаемые люминесцентные свойства.

Следует также отметить, что в спектрах фотолюминесценции сэндвичеобразных структур типа бис- и трифталоцианина эрбия максимум на 708 нм (1.75 эВ) отсутствует также как и в случае внедрения комплексообразователя.

Шестая глава посвящена оптическим и электрическим свойствам полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов с несимметричным распределением плотности заряда. Полупроводниковые структуры, состоящие из молекул бис- и трифталоцианина, в которых на параллельных лигандах фталоцианина находятся периферийные заместители, содержат соединения или атомы с большой разницей в электроотрицательности. Такие комплексы интересны своими свойствами, поскольку в них изначально в процессе синтеза создается несимметричное распределение зарядовой плотности, что превращает сложную молекулу в большой диполь. Данные соединения являются новыми, поскольку схему их синтеза удалось отработать сравнительно недавно. В представленной работе изучались образцы бис- и трифталоцианина, содержащие лютеций и европий в качестве комплексообразователя, а на периферии двух плоскопараллельных фталоцианиновых колец были расположены атомы хлора и молекулы бутила (трифталоцианин) или терт-бутила (бисфталоцианин). Для краткости по ходу дальнейшего изложения материала образцы бисфталоцианина лютеция с хлором и терт-бутилом будут носить название «заряженного бисфталоцианина», а образцы из трифталоцианина с лютецием и европием назовем «заряженный трифталоцианин».

Исследования указанных полупроводниковых структур с помощью методов ИК-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния показали, что в случае полупроводниковой структуры на основе заряженного бисфталоцианина в области $2500\div 3000\text{ см}^{-1}$ можно наблюдать только три минимума из стандартных четырех с координатами 2953 , 2914 , 2846 см^{-1} . Принимая во внимание тот факт, что замена атома комплексообразователя и периферийных молекул (группы терт-бутила замещены на атомы хлора у одного из фталоцианиновых колец) – могут послужить причиной сдвига спектрального положения пиков поглощения, поэтому в спектральном диапазоне $2600\div 3100\text{ см}^{-1}$ мы наблюдаем одну ассиметричную моду (2953 см^{-1}) и две симметричные моды (2914 см^{-1} и 2846 см^{-1}) колебаний углерод-водородных связей. Однако здесь следует отметить то обстоятельство, что линия поглощения на 2953 см^{-1} может иметь более сложную структуру, имея второй минимум на 2960 см^{-1} . Структурные углерод-водородные группы также отвечают за присутствие в спектрах поглощения линии на 1463 см^{-1} , соответствующей симметричной $-\text{C}-\text{H}_3$ моде [8]. Было показано, что внедрение в

молекулярную структуру молекулы трифталоцианина двух комплексообразователей разной природы (в нашем случае это металлы лютетия и европия) приводит к тому, что в области $1400\text{--}1450\text{ см}^{-1}$ изоиндольная группа может проявлять вибронные свойства в виде серии линий поглощения на 1410 см^{-1} [9], 1423 см^{-1} [7], 1440 см^{-1} [9], 1444 см^{-1} [7]. Здесь следует отметить, что обычно в спектрах полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов в указанном диапазоне проявляется не более двух линий, соответствующих колебаниям изоиндольной группы.

Проведенные исследования температурных зависимостей проводимости на постоянном токе показали, что в органических полупроводниковых структурах на основе заряженных фталоцианиновых комплексов может наблюдаться несколько вкладов от электронных переходов в проводимость. Данное явление характеризуется появлением второго участка на активационной зависимости сигнала проводимости от температуры. Величины энергий активации, определенные согласно формуле (1), равны 0.48 эВ и 0.16 эВ . Напомним, что, согласно данным главы 4, в полупроводниковых структурах на базе нейтральных трифталоцианиновых молекул величина энергии активации составляет 0.12 эВ , а на участке активационной зависимости наблюдается лишь один участок. Наличие второго участка на активационной зависимости проводимости от температуры может доказать тот факт, что природа периферийных заместителей в значительной степени влияет на электрические свойства органических полупроводников на основе фталоцианиновых структур. Указанная особенность заряженных фталоцианиновых полупроводниковых комплексов может быть использована при создании многокомпонентных солнечных батарей, а также других преобразователей энергии.

Седьмая глава диссертации посвящена проблеме теоретического моделирования оптических свойств полупроводниковых систем на основе фталоцианиновых комплексов. Для теоретического описания процессов диссипации энергии во фталоцианиновых ансамблях было привлечено несколько теоретических моделей. Согласно одной из них, оптические свойства фталоцианиновых комплексов можно представить с помощью подхода М.И. Штокмана, В.М. Шалаева и В.А. Маркеля, примененного для расчета оптических свойств фрактальных структур [11,12] и оптимизированного С.В. Перминовым, С.Г. Раутианом и В.П. Сафоновым для описания оптических свойств неупорядоченных полупроводниковых наносистем [13]. Этот подход мы можем использовать в наших целях, потому что в рамках выбранной модели изучаются свойства сложных неупорядоченных систем, состоящих из металлических частиц, внедренных в аморфную диэлектрическую матрицу. Исследуемые ансамбли органических полупроводников можно представить как частицы, связанные друг с другом обычным

электростатическим взаимодействием диполей. Наличие координационных взаимодействий в исследуемой системе вызывает вопрос о детальном исследовании парных взаимодействий двух органических макромолекул. Оптические свойства такой системы могут быть описаны системой уравнений [13]:

$$kd_{1n}^r - 2\xi d_{2n}^r = a_1^{3/2} \varepsilon_h E_{0n}, \quad (2)$$

$$-2\xi d_{1n}^r + kd_{2n}^r = a_2^{3/2} \varepsilon_h E_{0n}, \quad (3)$$

или:

$$\xi d_{2r}^r + kd_{1r}^r = a_1^{3/2} \varepsilon_h E_{0r}, \quad (4)$$

$$\xi d_{1r}^r + kd_{2r}^r = a_2^{3/2} \varepsilon_h E_{0r}, \quad (5)$$

где a_1 и a_2 – радиусы диполей; $\xi = (a/r)^3$ – приведённый радиус рассматриваемой системы зарядов; ε_h – диэлектрическая проницаемость системы; E_0 – внешнее монохроматическое поле; для обратной удельной восприимчивости используем соотношение $k = -X - i\delta$. Для удобства решения системы уравнений (2)–(5) сделаем замену переменных $2\xi \rightarrow -\xi$ и разложим напряженность внешнего поля на составляющие: $E_{0n} = E_0 \cos(\theta)$ и $E_{0r} = E_0 \sin(\theta)$. Приводя подобные члены в уравнениях (17)–(20), получим следующую систему уравнений:

$$(k - 2\xi)(d_{1n}^r + d_{2n}^r) = (a_1^{3/2} + a_2^{3/2}), \quad (k + 2\xi)(d_{1n}^r - d_{2n}^r) = (a_1^{3/2} - a_2^{3/2}), \quad (6)$$

$$(k + 2\xi)(d_{1r}^r + d_{2r}^r) = (a_1^{3/2} + a_2^{3/2}), \quad (k - 2\xi)(d_{1r}^r - d_{2r}^r) = (a_1^{3/2} - a_2^{3/2}), \quad (7)$$

Решения системы (21), (22) можно записать в виде:

$$d_n^r = -\varepsilon_h E_{0n} \left(\frac{A^{3/2}}{(X + 2\xi + i\delta)} + \frac{(a_i^{3/2} - A^{3/2})}{(X - 2\xi + i\delta)} \right), \quad (8)$$

$$d_r^r = -\varepsilon_h E_{0r} \left(\frac{A^{3/2}}{(X - \xi + i\delta)} + \frac{(a_i^{3/2} - A^{3/2})}{(X + \xi + i\delta)} \right), \quad (9)$$

$$\frac{(a_i^{3/2} - A^{3/2})}{A^{3/2}} = \pm B, \quad 2A^{3/2} = a_1^{3/2} + a_2^{3/2}. \quad (9a)$$

Полный индуцированный дипольный момент системы равен:

$$d = d_n^r + d_r^r \text{ или } d = -\varepsilon_h (E_{0n} + E_{0r})(a_1^{3/2} + a_2^{3/2})(f_n(X) + f_r(X)), \text{ где} \quad (10)$$

$$f_n(X) = \frac{(1-C)}{(X + 2\xi + i\delta)} + \frac{C}{(X - 2\xi + i\delta)}, \quad (11)$$

$$f_r(X) = \frac{(1-C)}{(X - \xi + i\delta)} + \frac{C}{(X + \xi + i\delta)}, \quad (12)$$

$$C = \frac{(a_1^3 + a_2^3 - A)}{(a_1^3 + a_2^3)} \quad (13)$$

$$\delta = \frac{Q\gamma w}{(w_p^2 - w^2)^2 + (w\gamma)^2}, \quad X = -1 + \frac{Q(w - w_p)^2}{(w_p^2 - w^2)^2 + (w\gamma)^2}, \quad Q = \frac{Ne^2}{m\epsilon_0} \quad (14)$$

В формулах (14) N - количество носителей заряда, участвующих в процессе, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, m - эффективная масса носителя заряда в исследуемом образце, γ - параметр затухания.

Результаты теоретической подгонки экспериментальной кривой приведены на рисунке 6.

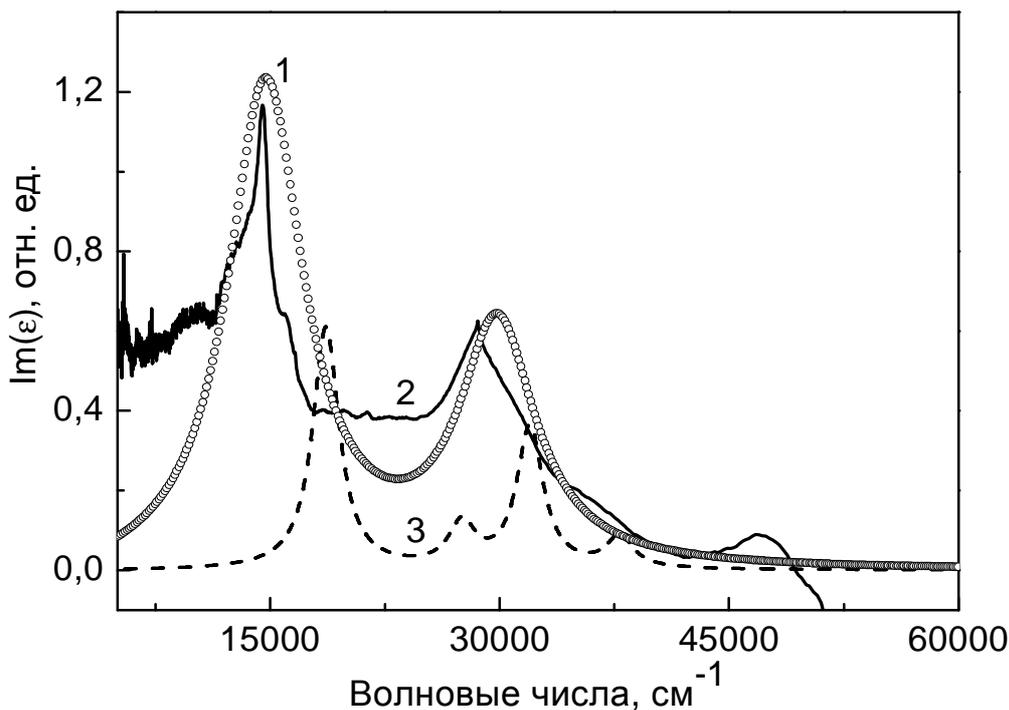


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости от волнового числа для полупроводниковых структур на основе бутилзамещенного монофталоцианина эрбия. Кривая 1 – подгоночная кривая со значениями параметров: $\gamma = 6000 \text{ см}^{-1}$, $Q = 10^6$, $a_1/a_2 = 200$, $\epsilon = 7$; кривая 2 – экспериментальная кривая; кривая 3 – расчетная кривая со значениями параметров $\gamma = 2100 \text{ см}^{-1}$, $Q = 10^8$, $a_1/a_2 = 1100$, $\epsilon = 2$.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

В работе были проведены исследования оптических и электрических свойств полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов, содержащих ионы лантанидов в качестве комплексообразователей. В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Получены спектры пропускания $T(\omega)$ фталоцианиновых комплексов эрбия в диапазоне волновых чисел от 500 см^{-1} до 40000 см^{-1} . Показано, что в исследуемых материалах диссипация энергии излучения ближнего ИК-диапазона происходит

вследствие протекания двух процессов: за счет внутрицентровых переходов в атоме эрбия и за счет переноса заряда в ближайших к центру молекулы фталоцианина атомах углерода.

2. Получены зависимости оптической плотности на длине волны 1.5 мкм от толщины исследуемых образцов. Показано, что коэффициент поглощения для трифталоцианина эрбия на длине волны 1.5 мкм более, чем в 2 раза превышает коэффициент поглощения моно- и бисфталоцианина эрбия в указанном спектральном диапазоне.

3. Методом комбинационного рассеяния света исследованы планарные структуры бутилзамещенного фталоцианина эрбия типа монофталоцианинов и сэндвич-подобные структуры типа трифталоцианина эрбия. Выявлено присутствие четырех пиков в области больших рамановских сдвигов, причем данные спектральные особенности проявляются только в структурах типа трифталоцианина эрбия. В спектре монофталоцианина эрбия аналогичных полос не обнаружено. Установлено, что наблюдаемые четыре линии соответствуют слабым внеплоскостным колебаниям фталоцианиновых колец.

4. Показано, что с увеличением количества органических лигандов в молекулярной структуре величина энергии активации электрической проводимости существенно уменьшается. Обнаружено, что в электропроводность образцов доминирующий вклад вносят энергетические состояния, возникшие в результате взаимодействия нескольких органических лигандов. Показано, что перенос носителей заряда в исследуемых полупроводниковых комплексах может осуществляться непрыжковым способом.

5. Исследованы спектры фотолюминесценции неупорядоченных полупроводниковых структур на основе бутилзамещенных фталоцианиновых комплексов, содержащих ионы эрбия и лютеция в качестве комплексообразователя. Обнаружены пики фотолюминесценции на длинах волн 888 нм (1.4 эВ), 760 нм (1.6 эВ) и 708 нм (1.75 эВ), что может быть обусловлено электронными переходами внутри самих органических комплексов, причем при внедрении металлического комплексообразователя максимум фотолюминесценции на 708 нм не наблюдается.

6. Проведен анализ спектральных особенностей полупроводниковых структур на основе заряженных комплексов фталоцианина. Установлено, что при изменении распределения зарядовой плотности в макромолекулах наблюдается изменение энергии вибронных состояний, что проявляется в виде отсутствия в спектрах некоторых мод (–С–Н–) и изменении спектрального положения остальных. Исследования электропроводности показали, что на активационной зависимости сопротивления от температуры появляется второй участок с энергией активации 0.48 эВ. В результате исследования

люминесцентных свойств полупроводниковых структур на основе заряженных молекул фталоцианина был обнаружен четкий максимум ФЛ в области 529 нм. Выявлена природа появления данного экстремума в спектрах ФЛ и установлено, что это может быть обусловлено электронными переходами в электронной оболочке лантанидов.

7. В рамках теории дипольного квазистатического приближения выполнено теоретическое моделирование дисперсионных зависимостей действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости для группы органических полупроводниковых структур на основе молекул бутилзамещенных моно-, бис- и трифталоцианина, содержащих ионы эрбия в качестве комплексообразователей. Получены значения статической диэлектрической проницаемости для полупроводниковых структур на основе моно-, бис- и трифталоцианина эрбия. Показано, что значение статической диэлектрической проницаемости в исследуемых материалах может изменяться от 2 (монофталоцианин эрбия) до 3 (трифталоцианин эрбия) – это удовлетворительно согласуется с литературными данными.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. Wang, D. Fine, A. Dobadalapur. Nanoscale chemical sensor based on organic thin-film transistors // *Applied Physics Letters*, 2004, vol.85, №26, pp.6386-6388.
2. A. Salleo. Charge transport in polymeric transistors // *Materialstoday*, 2007, vol.10, №3, pp.38-45.
3. C. D. Dimitrakopoulos, D. J. Mascaro. Organic thin- film transistors: A review of recent advances // *IBM J. RES. & DEV.*, 2001, vol.45, №1, pp.11-27.
4. A. Facchetti. Semiconductor for organic transistors // *Materialstoday*, 2007, vol.10, №3, pp.28-37.
5. C. Reese, B. Zhenan. Organic single-crystal field-effect transistors // *Materialstoday*, 2007, vol.10, №3, pp.20-27.
6. F. Lu, L. Zhang, H. Liu, X. Yan. Infrared spectroscopic characteristics of phthalocyanine in mixed [tetrakis(4-chlorophenyl)porphyrinato](phthalocyaninato) rare earth double-deckers // *Vibrational Spectroscopy*, 2005, vol.39, pp.139–143.
7. F. Lu, J. Cui, X. Yan. Infrared spectroscopic characteristics of octa-substituted bis(phthalocyaninato) rare earth complexes peripherally substituted with (4-methoxy)phenoxy derivatives // *Spectrochimica Acta Part A*, 2006, vol.63, pp.550–555.
8. M. Bao, Y. Bian, L. Rintoul, R. Wang, D. P. Arnold, C. Ma, J. Jiang. Vibrational spectroscopy of phthalocyanine and naphthalocyanine in sandwich-type (na)phthalocyaninato and porphyrinato rare earth complexes (Part 10) The infrared and Raman characteristics of phthalocyanine in heteroleptic bis(phthalocyaninato) rare earth complexes with decreased molecular symmetry // *Vibrational Spectroscopy*, 2004, vol.34, pp.283–291.
9. F. Lu, Q. Yang, J. Cui, X. Yan. Infra-red and Raman spectroscopic study of tetra-substituted bis(phthalocyaninato) rare earth complexes peripherally substituted with *tert*-butyl derivatives // *Spectrochimica Acta Part A.*, 2006, vol.65, pp.221–228.
10. Г. Л. Пахомов, Д. М. Гапонова, А. Ю. Лукьянов, Е. С. Леонов. Люминесценция в тонких пленках фталоцианина // *ФТТ*, 2005, т.47, стр.164-167.
11. В. А. Маркель, Л. С. Муратов, М. И. Штокман. Теория и численное моделирование оптических свойств фракталов // *ЖЭТФ*, 1990, т.98, 3,9, стр. 819-837.

12. А. В. Бутенко, В. М. Шалаев, М. И. Штокман. Гигантские примесные нелинейности в оптике фрактальных кластеров // ЖЭТФ, 1988, т.94, 1, стр.107-124.
13. С. В. Перминов, С. Г. Раутиан, В. П. Сафонов. Оптические свойства агрегатов наночастиц // Электронный журнал “Исследовано в России”, 2003, стр.2311 – 2340.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Оптические свойства органических полупроводников на основе фталоцианиновых комплексов эрбия в ближней и средней ИК- областях спектра” // ФТП, 2007, т.41, №10, стр.1221–1225.
- A2. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, А.В. Зотеев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Комбинационное рассеяние света в полупроводниковых структурах на основе молекул моно- и трифталоцианина, содержащих ионы эрбия” // ФТП, 2007, т.41, №11, стр.1381–1383.
- A3. И.А. Белогорохов, М.Н. Мартышов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, П.А. Форш, А.В. Зотеев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Вибронные и электрические свойства полупроводниковых структур на основе бутилзамещенных моно- и трифталоцианина, содержащих ионы эрбия” // Письма в ЖЭТФ, 2007, т.85, №12, стр.791–794.
- A4. И.А. Белогорохов, Ю.В. Рябчиков, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Фотолюминесценция полупроводниковых структур на основе бутилзамещенных фталоцианинов эрбия” // ФТП, 2008, т.42, №3, стр.327–330.
- A5. И.А. Белогорохов, М.Н. Мартышов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, П.А. Форш, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Особенности механизмов переноса носителей заряда в сформированных на поверхности кремния ансамблях полупроводниковых комплексов бутилзамещенного трифталоцианина, содержащих атомы эрбия” // Известия ВУЗов. Материалы Электронной Техники, 2008, №1, стр.71–74.
- A6. И.А. Белогорохов, М.Н. Мартышов, А.С. Гаврилюк, М.А. Дронов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, Ю.В. Рябчиков, П.А. Форш, А.В. Зотеев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Оптические и электрические свойства полупроводниковых структур на основе бутилзамещенных фталоцианинов, содержащих ионы эрбия” // Известия ВУЗов. Материалы Электронной Техники, 2008, №3, стр.23–33.
- A7. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, В.Е. Пушкарев, М.О. Бреусова, Л.И. Рябова, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Оптические свойства органических полупроводников на основе фталоцианиновых комплексов, легированных атомами эрбия, в ближней, средней и дальней ИК- областях спектра” // мат. конф. «XII Национальная конференция по росту

кристаллов, НКРК-2006», 2006, стр.344.

A8. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, В.Е. Пушкарев, М.О. Бреусова, Л.И. Рябова, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Дисперсионные зависимости мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости в ансамблях органических полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов, легированных атомами эрбия” // мат. конф. «XII Национальная конференция по росту кристаллов, НКРК-2006», 2006, стр.345.

A9. Е.В. Тихонов, И.А. Белогорохов, В.Е. Пушкарев, М.О. Бреусова, Д.Р. Хохлов Л.Г. Томилова “Оптические свойства органических полупроводников на основе фталоцианиновых комплексов, легированных атомами эрбия, в ближней и средней ИК-областях спектра” // мат. конф. «Восьмая всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и нанoeлектронике», 2006, стр.10.

A10. I.A. Belogorokhov, E.V. Tikhonov, M.O. Breusova, V.E. Pushkarev, A.V. Zoteev, L.G. Tomilova, D.R. Khokhlov “Raman scattering in organic semiconductors based on alkyl-substituted phtalocyanine complexes impregnated with erbium ions” // 2nd International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured materials, 9-11 July 2007, Alvor, Algarve, Portugal. P. 160.

A11. I.A. Belogorokhov, E.V. Tikhonov, M.O. Breusova, V.E. Pushkarev, L.G. Tomilova, D.R. Khokhlov “Absorption of electromagnetic radiation in the near and middle infrared regions in organic semiconductors based on alkyl -substituted phtalocyanine complexes of erbium” // 2nd International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured materials, 9-11 July 2007, Alvor, Algarve, Portugal. P. 200.

A12. I.A. Belogorokhov, Yu. V. Ryabchikov, E.V. Tikhonov, M.O. Breusova, V.E. Pushkarev, L.G. Tomilova, D.R. Khokhlov “Photoluminescence of organic semiconductor structures contained phtalocyanine molecules doped with lanthanide ions” // International Conference «Functional materials», ICFM 2007, Ukraine, Crimea, Partenit, p. 382.

A13. Е.В. Тихонов, И.А. Белогорохов, М.Н. Мартышов, М.О. Бреусова “Вибронные и электрические свойства полупроводниковых структур на основе бутилзамещенных моно- и трифталоцианина эрбия” // Мат. межд. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2007», МГУ, Москва, Россия, апрель 2007 г., с. 106–107.

A14. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, А.В. Зотеев, Л.Г.Томилова, Д.Р. Хохлов “Исследование вибронных свойств полупроводниковых структур на основе молекул бутилзамещенного моно-, бис-, и трифталоцианина эрбия” // Тезисы докладов VIII Российской конференции по физике полупроводников. «Полупроводники-2007», Екатеринбург, 30 сентября – 5 октября, 2007, с. 332.

- A15. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, А.В. Зотеев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Комбинационное рассеяние света в полупроводниковых двухкомпонентных структурах на основе оксида кремния и органических комплексов моно- и трифталоцианина эрбия” // Тезисы докладов Четвертой Российской конференции с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе (Кремний 2007). 3 июля – 6 июля 2007, «Московский институт стали и сплавов», с. 221.
- A16. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, М.О. Бреусова, В.Е. Пушкарев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов “Оптические свойства фталоцианиновых комплексов эрбия, нанесенных на кремниевые подложки, в средней и дальней ИК - областях спектра” // Тезисы докладов Четвертой Российской конференции с международным участием по физике, материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния и приборных структур на их основе (Кремний 2007). 3 июля – 6 июля 2007, «Московский институт стали и сплавов», с. 222.
- A17. I.A. Belogorokhov, Yu.V. Ryabchikov, E.V. Tikhonov, M.A. Dronov, M.O. Breusova, V.E. Pushkarev, L.G. Tomilova, D.R. Khokhlov “The photoluminescence of semiconductor structures containing butyl-substituted phthalocyanine complexes” // Extended Abstracts of the 6-th Intern. Conf. On Porous Semiconductors – Science and Technology, Sa Coma-Mallorca, Spain, 10–14.03.2008, 443–444.
- A18. I.A. Belogorokhov, E.V. Tikhonov, M.A. Dronov, M.O. Breusova, V.E. Pushkarev, L.I. Belogorokhova, L.G. Tomilova, D.R. Khokhlov “Vibronic properties of semiconductor structures containing charged bisphthalocyanine complexes, doped with lutetium” // Extended Abstracts of the 6-th Intern. Conf. On Porous Semiconductors – Science and Technology, Sa Coma-Mallorca, Spain, 10–14.03.2008, 445–446.
- A19. I. Belogorokhov, E. Tikhonov, M. Breusova, V. Pushkarev, L. Belogorokhova, L. Tomilova, D. Khokhlov “Structural features of semiconductor structures based on charged bisphthalocyanine and triphthalocyanine complexes, doped with lutetium” // Mat. of the 17th International Conference of the Israel Society for Quality, Jerusalem, Israel, 2008, с. 160.
- A20. И.А. Белогорохов, М.Н. Мартышов, Е.В. Тихонов, А.А. Добровольский, В.Е. Пушкарев, П.А. Форш, Г.Л. Пахомов, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов, Л.И. Рябова “Исследование механизмов проводимости в кристаллических и аморфных полупроводниковых структурах на основе фталоцианиновых комплексов” // Мат. XIII Национальной Конференции по Росту Кристаллов, Москва, 17–21 ноября, 2008, стр. 363.
- A21. И.А. Белогорохов, Е.В. Тихонов, В.Е. Пушкарев, Л.Г. Томилова, Д.Р. Хохлов

“Диэлектрическая проницаемость и оптические свойства в ИК-диапазоне длин волн полупроводниковых структур на основе фталоцианиновых комплексов” // Мат. XIII Национальной Конференции по Росту Кристаллов, Москва, 17–21 ноября, 2008, стр. 364.

A22. Ivan A. Belogorokhov, Dmitry A. Mamichev, Victor E. Pushkarev, Andrei V. Zoteev, Larisa G. Tomilova, Dmitry R. Khokhlov “Vibronic properties of heteroleptic triple-decker lutetium phthalocyanine complexes” // Abstracts of the Fifth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines, ICPP-5, Russia, Moscow, July 6–11, 2008, p. 302.

A23. Ivan A. Belogorokhov, Mikhail N. Martyshov, Alexandr A. Dobrovolsky, Maria O. Breusova, Victor E. Pushkarev, Pavel A. Forsh, Georgy L. Pakhomov, Larisa G. Tomilova, Ludmila I. Ryabova, Dmitry R. Khokhlov “Conductivity of erbium phthalocyanine complexes in the AC and DC regimes” // Abstracts of the Fifth International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines, ICPP-5, Russia, Moscow, July 6–11, 2008, p. 303.

A24. Е. В. Тихонов, И. А. Белогорохов, В. Е. Пушкарев, Д. Р. Хохлов, Л. Г. Томилова “Исследование проводимости фталоцианиновых структур на постоянном и переменном токе” // Тезисы докладов Десятой Всероссийской Молодежной Конференции по Физике Полупроводников и Наноструктур, Полупроводниковой Опто- и Нанoeлектронике, Санкт-Петербург, 1-5 декабря, 2008, стр. 12.