

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Саитова Шамиля Рашитовича
на тему: «Неравновесные электронные процессы в органических
полупроводниковых композиционных материалах»
по специальности 1.3.11. Физика полупроводников

Гибридные полупроводниковые структуры на основе органической полупроводниковой матрицы с внедренными полупроводниковыми нанокристаллами относятся к уникальной области физики полупроводников, поскольку сочетают в себе особенности как низкоразмерных, так и фотовольтаических эффектов. В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям таких структур, поэтому тема работы безусловно **актуальна**.

Органические полупроводниковые материалы имеют значительные перспективы для широкого применения в производстве фотоэлектрических устройств, поскольку существует возможность их модификации за счёт изменения состава на этапе формирования раствора. В частности, механическая прочность и пластичность готовых плёнок полупроводниковых полимеров позволяют изготавливать на их основе гибкие тонкопленочные солнечные элементы. В то же время, такие особенности, как низкая подвижность носителей заряда и большая энергия связи экситона, возникающая за счёт малой величины диэлектрической проницаемости, накладывают ограничение на применение органических полупроводников. Одним из возможных направлений развития органических полупроводников являются гибридные композиционные материалы на основе органической матрицы с внедрёнными в неё полупроводниковыми кристаллами или наноструктурами. Наличие второй фазы в объёме пленки органического полупроводника при аккуратном подборе параметров энергетической

структуры компонентов позволяет создать объёмный гетеропереход с возможностью разделения носителей заряда. Помимо этого, могут измениться преобладающие механизмы переноса и рекомбинации неравновесных носителей заряда в связи с особенностями взаимодействия органической и неорганической фаз. Таким образом, в области гибридных композиционных полупроводниковых материалов стоит задача исследования электрических и фотоэлектрических свойств для определения механизмов генерации, переноса и рекомбинации носителей заряда. В диссертационной работе Ш.Р. Саитова была адаптирована и применена методика исследования распределения плотности прыжковых состояний в плёнке неупорядоченного органического полупроводника. Также предложен гибридный композиционный материал на основе фотопроводящего полимера и коллоидных нанопластинок CdSe, внедрённых в объём пленки. Исследованы электрические и фотоэлектрические свойства этого материала. Диссертационная работа является актуальной как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения объяснения существующих экспериментов и возможности практических применений.

Диссертационная работа Саитова Ш.Р. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 155 страниц, включая 53 рисунка, 1 таблицу и 55 формул. Список литературы содержит 124 наименования, включая 4 работы автора, опубликованные по теме диссертации.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цель и задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту. Поясняется и обосновывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, личный вклад автора, апробация работы, публикации по материалам диссертации. Приведены сведения о структуре диссертационной работы.

Первая глава, посвящённая обзору литературы, по содержанию разделена на три тематические части. В первой части описаны электрические и оптические свойства фотопроводящих полимеров. Во второй части представлены свойства нанопластинок халькогенидов кадмия. Третья часть посвящена взаимодействию наноструктур из классических неорганических полупроводников с органическими молекулами. Содержание литературного обзора связано с результатами, представленными в последующих главах.

Во **второй главе** описаны экспериментальная установка и методика эксперимента. Подробно описан метод постоянного фототока, применяемый автором для исследования распределения плотности состояний в пленках неупорядоченных полимерных полупроводников, а также условия его применимости. Особое внимание Ш. Р. Саитов уделяет разработке и апробации программ автоматизации эксперимента с применением особенностей объектно-ориентированного языка для грамотной и аккуратной работы с данными.

Третья глава посвящена исследованию электрических и фотоэлектрических свойств и определению распределения плотности электронных состояний пленки полимерного полупроводника PPQ-DBT, который разрабатывался как материал активного слоя солнечного элемента. В этой главе с помощью спектральной зависимости коэффициента поглощения, полученной методом постоянного фототока и температурной зависимости фотопроводимости, были определены форма и основные параметры распределения плотности состояний по энергии в данном материале. Продемонстрированная методика представляет интерес в случае неупорядоченных фотопроводящих полимеров с относительно малой энергией связи экситона как неинвазивный способ исследования плотности состояний в готовых пленках.

В **четвертой главе** объектом исследования является пленка фотопроводящего полимера F8BT, широко используемого для создания органических светодиодов. Основным результатом этой главы является установление отсутствия зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от энергии кванта возбуждающего излучения в исследованном диапазоне. Такой вывод был сделан и обоснован с помощью анализа спектральных зависимостей фотопроводимости и поглощения, полученной методом постоянного фототока.

Пятая глава посвящена исследованию электрических и фотоэлектрических свойств гибридного полупроводникового композита на основе фотопроводящего полимера PCDTBT и нанопластин CdSe. Было установлено, что при определённых величинах температур и электрических полей фотопроводимость пленки композиционного материала превышала фотопроводимость пленки исходного полимера PCDTBT на два порядка величины. Наиболее интересным результатом является то, что при повышении концентрации носителей заряда в пленке композита изменяется характер их переноса. При этом, по-видимому, подвижность этих носителей также возрастает с ростом концентрации, что даёт синергетический эффект увеличения фотопроводимости.

В заключении приведены **основные результаты**, полученные в диссертационной работе. Важно отметить, что все научные результаты, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, а также положения, выносимых на защиту, хорошо **обоснованы**. **Достоверность** результатов обеспечена комплексным подходом к исследованию фотоэлектрических свойств органических полупроводниковых систем, тщательным сопоставлением экспериментальных данных с теоретическими оценками и результатами других научных групп, а также широкой апробацией

результатов работы на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях.

Автором получен ряд **новых** и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

- 1) Была адаптирована методика исследования распределения плотности электронных состояний в пленке неупорядоченного органического полупроводника.
- 2) С помощью анализа спектральных зависимостей фотопроводимости и поглощения, полученной методом постоянного фототока, было установлено отсутствие зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от энергии кванта возбуждающего излучения.
- 3) Был создан гибридный полупроводниковый композиционный материал, состоящий из полимерной пленки с внедрёнными в неё нанопластинками CdSe и позволяющий в определённом диапазоне температур получить увеличение фотопроводимости до двух порядков величины по сравнению с пленкой исходного фотопроводящего полимера.

Однако при ознакомлении с диссертационной работой возник ряд **вопросов и замечаний**:

- 1) Надо обосновать, почему конечным состоянием для фотовозбуждённых электронов в полимерном полупроводнике PPQ-DVT (гл. 3) считаются низшие свободные молекулярные орбитали (НСМО, они же LUMO), поскольку известно, что во многих полимерах первичными возбуждениями являются молекулярные возбуждения (экситоны).
- 2) Каким физическим механизмом определяется время жизни фотогенерированных носителей заряда в полимере F8BT (гл. 4)?

3) Из того, что в полимере F8BT преобладает аморфная фаза, ещё не следует, что в этом материале должны быть экспоненциальные «хвосты» состояний (гл. 4), поскольку гауссово распределение состояний по энергии, полученное в модели гауссова беспорядка и считающееся общепринятым для органических полупроводников, относится к аморфным материалам.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертации, которая является оригинальным и законченным научным исследованием. Полученные результаты являются новыми и представляют существенный научный интерес. Актуальность, практическая значимость, новизна диссертационной работы, а также личный вклад автора и достоверность полученных результатов не вызывают сомнения. Диссертационная работа аккуратно оформлена, материал представлен понятно и логически последовательно. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.11. Физика полупроводников (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Работа оформлена в соответствии с требованиями Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Сайтов Шамиль Рашитович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

профессор, кафедра физики конденсированных сред, Институт нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике (ИНТЭЛ), ФГАОУВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

НИКИТЕНКО Владимир Роленович

21 октября 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7(495)7885699 (доб. 8019), e-mail: VRNikitenko@mephi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 31,

ФГАОУВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Институт нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике (ИНТЭЛ), кафедра физики конденсированных сред.

Тел.: +7(495)7885699; e-mail: info@mephi.ru

Подпись сотрудника ФГАОУ
«МИФИ»

В.Р. Никитенко удостоверяю