

На правах рукописи

**Дайнеко Сергей Владимирович**

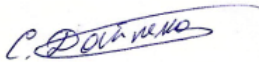
**ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ  
ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И  
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe**

01.04.21 – лазерная физика  
01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2014

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

**Научный руководитель:**

Чистяков Александр Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры № 81 «Физика микро- и наносистем»

**Официальные оппоненты:**

д.ф.-м.н. **Лебедев Владимир Сергеевич**  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

к.ф.-м.н. **Ефимов Антон Евгеньевич**  
Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов имени академика В.И. Шумакова

**Ведущая организация:**

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Защита состоится «21» января 2015 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел. 8(495)788-56-99 доб. 95-26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета МИФИ и на сайте: <http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.130.05

доктор физ.-мат. наук



Р. С. Стариков

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследований**

В последнее десятилетие физика наноматериалов и наноструктур является бурно прогрессирующим направлением науки. Многие нанотехнологические достижения объединили несколько научных направлений для создания новых материалов с заданными свойствами. Развитие технологии химического синтеза привело к созданию нового класса оптических материалов, называемых квантовыми точками (КТ). Полупроводниковые КТ появились в качестве альтернативы органическим красителям и флуоресцентным белкам, они более яркие и значительно более устойчивы к фотодegradации. Благодаря эффекту размерного квантования оптические параметры КТ (спектры поглощения и люминесценции) зависят от размеров нанокристаллов [1]; поэтому, меняя размеры квантовых точек, можно получить спектры их излучения в широкой области длин волн: весь видимый, иногда инфракрасный и ультрафиолетовый диапазоны. Спектр люминесценции КТ представляет собой узкую полосу, положение максимума которой зависит от их размера, а ширина определяется разбросом нанокристаллов по размерам [2]. Обычно характерный разброс по размерам не превышает 5-10%, в результате чего полоса люминесценции значительно уже, чем у большинства люминесцирующих органических молекул.

В настоящее время большой интерес уделяется не только изучению квантовых точек, но также разработке и исследованию наногибридных материалов на их основе. Особое место в этом направлении занимают наногибридные материалы на основе КТ и органических полупроводников (ОПП). Использование органических полупроводников является одним из перспективных подходов к созданию недорогих, гибких и компактных солнечных батарей [3, 4]. Внедрение полупроводниковых КТ в органический полупроводник может существенно повысить эффективность фотовольтаического преобразования в солнечных ячейках.

Эффективность конверсии зависит от диссоциации экситонов (электронно-дырочных пар), а также транспорта носителей заряда в гибридной системе. Ключевыми параметрами, определяющими эффективность процессов в наногибридной системе, являются

энергетические спектры и взаимная аффинность ее компонентов. Таким образом, правильный выбор органического полупроводника, КТ и их поверхностных модификаторов является залогом повышения эффективности фотовольтаических преобразований и требует изучения процессов, происходящих на границе раздела ОПП и КТ. Разработка наногибридных материалов на основе различных ОПП и КТ позволит изучить влияние расположения энергетических уровней, относительных концентраций и аффинности на эффективность преобразования в солнечных элементах.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является создание наногибридных материалов для применения в перспективных солнечных ячейках на основе квантовых точек CdSe и органических полупроводников и исследование их оптических и электрофизических свойств.

### **Задачи работы**

1. Разработка наногибридных материалов для перспективных солнечных элементов на основе органических полупроводников полиимидного (ПИ) типа и квантовых точек CdSe.
2. Изучение механизмов переноса заряда между органическим полупроводником полиимидного типа и квантовыми точками CdSe с помощью лазерно-люминесцентной методики.
3. Определение оптимальных параметров наногибридного материала на основе органических полупроводников полиимидного типа и квантовых точек CdSe с помощью лазерно-люминесцентной спектроскопии для создания оптимизированного фотовольтаического элемента на их основе.
4. Сопоставление результатов, полученных с помощью лазерно-люминесцентной спектроскопии, с электрофизическими характеристиками фотовольтаической ячейки на основе наногибридного материала ПИ: CdSe.
5. Разработка наногибридных материалов на основе высокоэффективных узкозонных органических полупроводников и КТ CdSe.

6. Определение оптимальных параметров наногибридного материала на основе узкозонных органических полупроводников и КТ CdSe для создания высокоэффективных солнечных ячеек.

### **Научная новизна**

1. Изготовлены наногибридные структуры на основе квантовых точек CdSe и органических полупроводников полиимидного типа для фотовольтаических устройств.
2. Экспериментально обнаружен эффект значительного (более чем в 2 раза) увеличения квантового выхода люминесценции квантовых точек CdSe в матрице органического полупроводника полиимидного типа при изменении концентрации от 60% до 80% (по массе).
3. Разработан фотовольтаический элемент на основе созданных наногибридных материалов – ИТО/CuPc/ПИ: CdSe/Al. Оптимизированы параметры элемента по концентрации квантовых точек в активном слое.
4. Изготовлены наногибридные структуры на основе квантовых точек CdSe и органических полупроводников PCDTBT и PTB7 для перспективных солнечных элементов.
5. Созданы фотовольтаические ячейки на основе наногибридных структур CdSe:PCDTBT и CdSe:PTB7. Показано, что оптимальные фотовольтаические характеристики достигаются при концентрации КТ 80% (по массе) и толщине наногибридного слоя 100 нм.

### **Практическая значимость работы**

1. Созданы наногибридные материалы для солнечных ячеек на основе квантовых точек CdSe и органических полупроводников полиимидного типа. На основании результатов лазерно-люминесцентных исследований установлена оптимальная для разработки фотовольтаических элементов концентрации квантовых точек в полиимидной матрице, которая составляет 60% по массе.
2. Разработаны фотовольтаические элементы на основе созданных наногибридных материалов – ИТО/CuPc/PI: CdSe/Al – и исследованы их свойства. Результаты фотовольтаических исследований подтверждают, что оптимальная концентрация квантовых точек в полимерной матрице составляет 60% по массе.

3. Созданы наногибридные материалы на основе квантовых точек CdSe с диаметром 5 и 10 нм и органических полупроводников PCDTBT и PTB7, проведена их характеристикация.
4. На основе созданных наногибридных материалов разработаны фотовольтаические элементы, имеющие структуру ITO/PEDOT:PSS/PTB7: CdSe/LiAl и ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT: CdSe/LiAl, и исследованы их фотовольтаические свойства. Показано, что оптимальные фотовольтаические характеристики достигаются при концентрации КТ 80% (по массе) и толщине наногибридного слоя 100 нм.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Созданы наногибридные материалы для солнечных ячеек на основе квантовых точек CdSe и органического полупроводника полиимидного типа.
2. Исследованы люминесцентные свойства созданных наногибридных материалов. Обнаружено значительное (в 2 раза) возрастание квантового выхода люминесценции КТ при увеличении их концентрации в матрице полиимида от 60% до 80% (по массе). Дана интерпретация этого явления, основанная на кластерообразовании КТ в полиимидной матрице, наблюдаемом на эксперименте.
3. Разработаны фотовольтаические элементы на основе созданных наногибридных материалов ПИ: CdSe и исследованы их свойства. Показано, что максимальные значения фотовольтаических характеристик достигаются при концентрации КТ в полиимидной матрице 60%.
4. Созданы наногибридные материалы на основе квантовых точек CdSe с диаметром 5 и 10 нм и узкозонных органических полупроводников (PCDTBT и PTB7), проведена их характеристикация.
5. Разработаны фотовольтаические элементы на основе созданных наногибридных материалов PTB7: CdSe, PCDTBT: CdSe и исследованы их фотовольтаические свойства. Показано, что оптимальные фотовольтаические характеристики достигаются при концентрации КТ 80% (по массе) и толщине наногибридного слоя 100 нм.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации прошли апробацию на следующих конференциях: IV международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО-2006, Россия, Санкт-Петербург, 2006); «Наноструктурные материалы – 2008» (Беларусь, Минск, 2008); "SPIE Photonic Europe 2008" (Франция, Страсбург, 2008); "SPIE Europe Microtechnologies for the New Millennium" (Германия, Дрезден, 2009); IX Всероссийская конференция «Физикохимия ультрадисперсных систем» (Россия, Ижевск, 2010); "Nano and Giga Challenges in Electronics, Photonics and Renewable Energy" (NGC2011, Россия, Москва, 2011); "Next Generation (Nano), Photonic and Cell Technologies for Solar Energy Conversion III" (SPIE Optics + Photonics, USA, San Diego, 2012); VIII международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2013» (Россия, Санкт-Петербург, 2013); "SPIE Photonics West International Conferenc" (SPIE Photonics West, USA, San Francisco, 2014) – а также на научных сессиях НИЯУ МИФИ (Россия, Москва, 2006–2014).

**Вклад автора.** Все результаты, представленные в работе, получены автором лично либо при его непосредственном участии.

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 12 работ в период с 2006 по 2014 гг. Из них пять работ опубликованы в реферируемых журналах из перечня ВАК, и семь работ опубликованы в журналах, входящих в базы данных "Web of Science" и "SCOPUS". Список публикаций приведен в конце автореферата.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ на Кафедре физики твердого тела и наносистем и Кафедре физики микро- и наносистем.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Объем диссертации составляет 108 страниц, включая 42 рисунка. Список литературы содержит 131 наименование.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации и сформулирована цель работы. Обсуждаются научная новизна, научная и практическая значимость, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме исследования, объеме и структуре диссертации, дана краткая аннотация работы.

**В первой главе** (“Преобразование энергии оптического излучения в электрическую в гетероструктурах на основе органических полупроводников и квантовых точек”) приведен литературный обзор по истории развития фотовольтаики. Рассмотрены основы функционирования и создания солнечных ячеек на основе органических полупроводников. Обоснована перспективность использования в этой области гибридных структур органический полупроводник–квантовая точка. Приведены базовые сведения о методах синтеза и фотофизических свойствах полупроводниковых квантовых точек. Сформулирована цель работы.

**Во второй главе** (“Методы получения и исследования гетероструктур на основе квантовых точек и органических полупроводников”) описана методика создания современных фотовольтаических элементов, которые представляют собой многослойные структуры, состоящие из фотоактивного композита и буферных слоев, сформированные на поверхности прозрачного проводящего электрода ИТО (Indium-Tin-Oxides) (рис. 1). Детально описаны методы формирования фотоактивного композита, состоящего из квантовых точек CdSe и матрицы – органического полупроводника. Представлено описание экспериментальной методики исследования и установок, используемых для измерения спектральных и электрофизических характеристик созданных образцов.



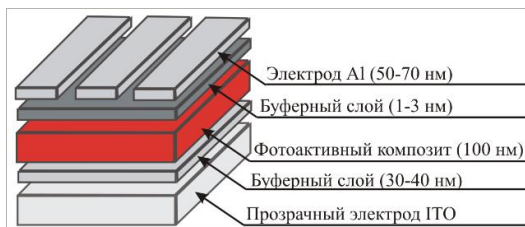


Рис. 1. Схематическое изображение гибридной солнечной ячейки.

В матрицах органических полупроводников с КТ возможно протекание новых и малоизученных фотофизических процессов, связанных в, частности, с пространственным переносом носителей заряда, поэтому для исследования спектральных свойств наногибридных материалов требуется высокочувствительная спектральная методика с лазерным возбуждением. Кроме того, в отличие от люминесценции КТ в растворе и полимере типа полиметилметакрилата, где их квантовый выход достаточно высок и составляет от 40 до 80% [5-8], в матрице органического полупроводника он резко падает. В результате использование стандартных методов исследования спектральных свойств КТ (например, с помощью спектрофлуориметра) не представляется возможным, и необходимо использовать более высокочувствительные лазерно-люминесцентные установки.

Для изучения спектральных свойств разработанных нами наногибридных структур использовалась лазерно-люминесцентная установка. В нее входил YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазер с излучением на второй гармонике ( $\lambda=532$  нм,  $f=50$  Гц,  $\tau=40$  нс, энергия – 6 мДж), ФЭУ-51 для синхронизации, фильтры, линза для фокусировки возбуждающего излучения на образец. Для фокусировки люминесцентного излучения на щель монохроматора МВР-80 использовался сфероцилиндрический конденсор. Спектр люминесценции регистрировался ФЭУ-79, подключенным к цифровому осциллографу В-411, сигнал с которого обрабатывался персональным компьютером. Вторая гармоника

YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера использовалась для селективного возбуждения КТ CdSe в матрице органического полупроводника ПИ типа.

Для измерения электрофизических свойств созданных фотовольтаических элементов использовалась установка, включающая в себя высоко-позиционный источник-измеритель тока и напряжения (Keithley SMU 2400) и симулятор солнечного излучения (LCS-100 Series Small Area Solar Simulators).

Для определения размера квантовых точек и исследования пленок использовались просвечивающий электронный микроскоп (JEOL 2100F TEM) и атомно-силовой микроскоп (АСМ MultiMode V).

**В третьей главе** (“Исследование оптических и спектральных свойств гибридных структур”) приведены исследования лазерно-индуцированной люминесценции квантовых точек в матрицах полиимидного типа при различной концентрации КТ.

При введении КТ в так называемые пассивные полимерные матрицы квантовый выход мало отличается от такового в растворе, оставаясь достаточно высоким. В случае использования матриц органических полупроводников ситуация резко меняется. Как мы увидим, в этом случае могут наблюдаться безызлучательные процессы, существенно снижающие квантовый выход КТ. На первое место среди них выходит пространственный перенос заряда с КТ на органический полупроводник.

На рис. 2а приведен спектр поглощения пленок ПИ и КТ CdSe используемых в работе. Видно, что ПИ не поглощает лазерное излучение с длиной волны 532 нм. Кроме того, уровень энергии ПИ высшей занятой электронами молекулярной орбитали (ВЗМО) выше, чем потолок валентной зоны (ВЗ) квантовых точек (рис. 2б). Следовательно, после возбуждения КТ CdSe на границе раздела ПИ:CdSe может произойти диссоциация экситона и перенос дырки с КТ на органический полупроводник. Таким образом, ПИ является хорошим модельным полимером для изучения процессов переноса между органическим полупроводником и КТ с помощью лазерно-люминесцентной методики.

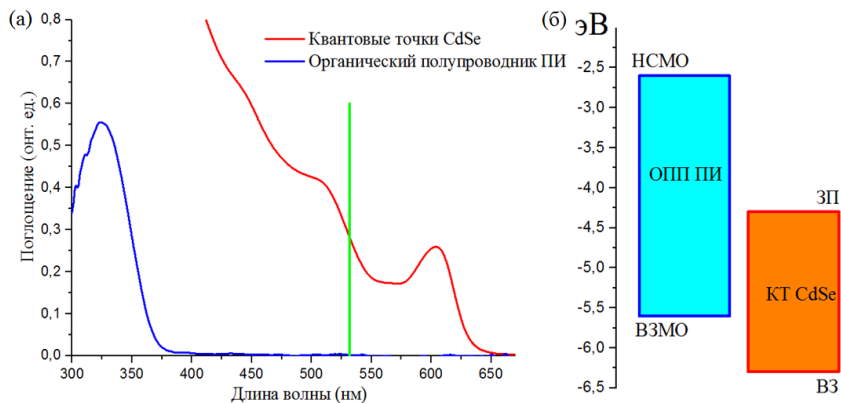


Рис.2. Спектры поглощения КТ CdSe и ПИ (а) и уровни энергии органического полупроводника полиимидного типа и квантовых точек CdSe (б). НСМО – низшая свободная молекулярная орбиталь, ВЗМО – высшая занятая молекулярная орбиталь, ЗП – зона проводимости ( $E_c$ ), ВЗ – валентная зона ( $E_v$ ).

На рис. 3а приведен график зависимости интегральной люминесценции CdSe в ПИ, нормированной на концентрацию КТ, от их концентрации. Из этого графика видно, что интенсивность люминесценции КТ остается постоянной с увеличением концентрации КТ до 60% и резко увеличивается при дальнейшем росте их концентрации. Этот эффект можно объяснить тенденцией к кластеризации КТ при высоких концентрациях. В результате кластерообразования безызлучательная релаксация КТ в матрице ПИ уменьшается, что может приводить к возрастанию квантового выхода их люминесценции. Дальнейшие исследования наногибридного материала ПИ:CdSe в зависимости от концентрации КТ с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали, что доля КТ, объединяющихся в небольшие группы, возрастает с увеличением концентрации КТ от 25 до 80% по массе (рис. 3б,в,г). Наногибридный материал ПИ:CdSe при концентрации КТ ~80% содержит в основном КТ в виде кластеров, как видно на изображении, полученном с помощью просвечивающей электронной микроскопии (рис. 3г).

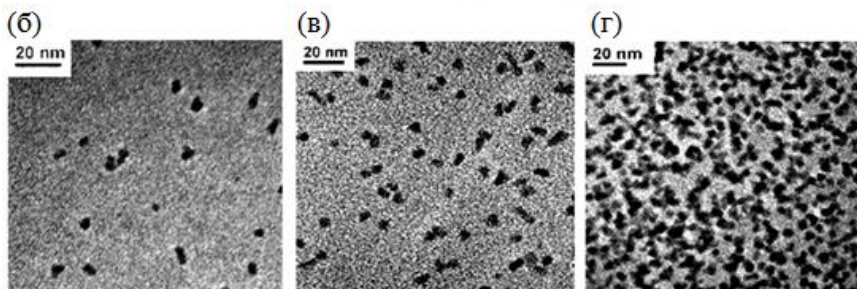
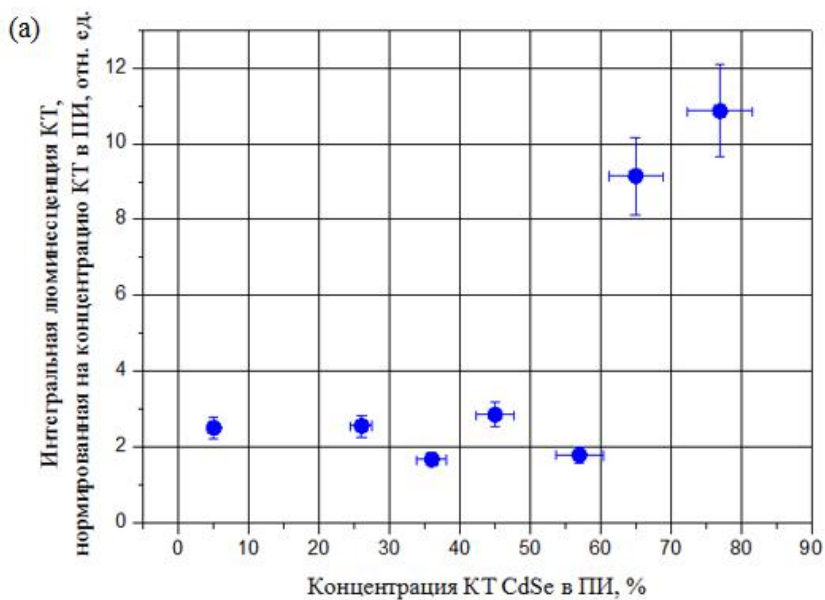


Рис. 3. Интеграл люминесценции КТ в структуре ПИ: CdSe, нормированный на их массовую концентрацию (а). Изображения ПИ, содержащего КТ CdSe в концентрации 25% (б), 60% (в), 80% (г), полученные с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

При образовании кластеров КТ эффективность пространственной передачи дырок уменьшается и, следовательно, вероятность безызлучательного процесса существенно снижается; это проявляется в увеличении квантового выхода люминесценции. Таким образом, на основании данных по лазерно-люминесцентной спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии можно сделать вывод о том, что концентрации КТ в ПИ около 60% является оптимальной для эффективной диссоциации экситона в данной наногибридной структуре.

В этой главе также представлены исследования спектров поглощения фотовольтаических элементов на основе узкозонных органических полупроводников и квантовых точек CdSe (рис. 4). Видно, что спектр поглощения органического полупроводника PCDTBT имеет провал в области  $\lambda = 450$  нм, а РТВ7 вообще слабо поглощает свет в области длин волн меньше 550 нм. КТ компенсируют эти недостатки органических полупроводников, обеспечивая эффективное поглощение наногибридного материала в спектральном диапазоне  $\lambda < 550$  нм. Например, добавление 50% (по массе) КТ с размером 10 нм в органический полупроводник позволяет повысить поглощение света для PCDTBT более чем на 50%, а для РТВ7 – на 140%. Дальнейшее увеличение концентрации КТ для обоих органических полупроводников приведет к еще большему увеличению доли поглощенного излучения в области солнечного спектра.

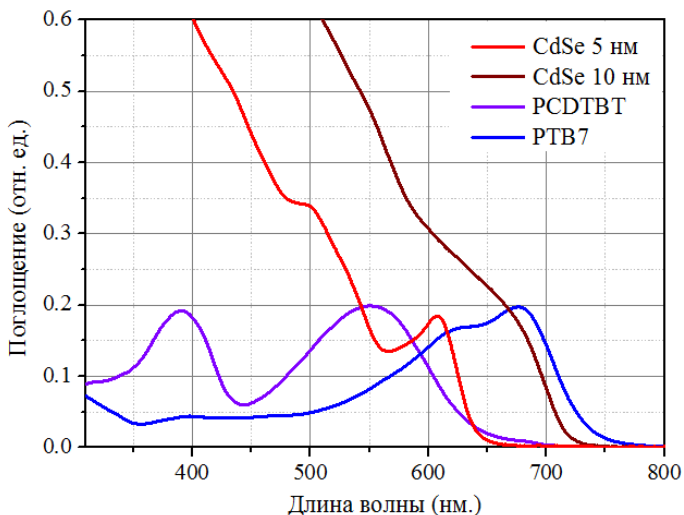


Рис. 4. Спектры поглощения квантовых точек CdSe и органических полупроводников PCDTBT, PTB7 и МЕН-PPV.

**В четвертой главе** (“Фотовольтаические свойства гибридных структур”) представлено описание разработанных фотовольтаических ячеек на основе органических полупроводников и квантовых точек, а также исследование их фотовольтаических свойств.

На рис. 5 подставлена структура солнечной ячейки на основе гибридного материала органический полупроводник–квантовая точка (ОПП:КТ). В качестве нижнего прозрачного электрода солнечной ячейки был использован слой ITO. На поверхность ITO сначала наносился буферный слой в виде CuPc или PEDOT:PSS, которые препятствовали транспорту электронов к ITO. Слой CuPc толщиной 30 нм наносился методом термического напыления в вакууме. PEDOT:PSS наносился методом вращающейся подложки (“спин-коатинг”), из водного раствора (скорость вращения подложки составляла 3000 об/мин), при этом формировался слой толщиной порядка 30 нм. На буферный слой методом “спин-коатинга” наносили смесь ОПП:КТ, растворенную в хлорбензоле. Верхний электрод ячейки формировали методом термического напыления слоя LiF/Al.

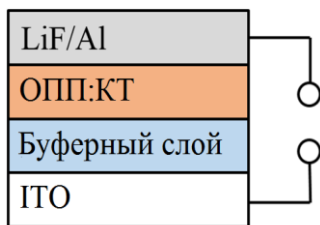


Рис. 5. Структура фотовольтаического устройства на основе органических полупроводников (ОПП) и квантовых точек (КТ).

На рис. 6 приведены вольтамперные характеристики (ВАХ) разработанных структур с различным соотношением концентраций ПИ и КТ. Видно, что фотоэлектрического эффекта не наблюдалось в ячейках без КТ. Действительно, в отсутствие КТ фотоносители может генерировать только слой CuPc, однако на границе раздела CuPc/ПИ есть потенциальный барьер для электронов (рис. 7). Добавление всего лишь 25% КТ в ПИ приводит к появлению фотоотклика. Более того, наклон кривой ВАХ увеличивается, что указывает на уменьшение удельного сопротивления ячейки. Увеличение концентрации КТ до 45% приводит к дальнейшему росту фотоотклика. При увеличении концентрации КТ от 45 до 60% ток короткого замыкания и напряжение холостого хода оставались практически неизменными. Однако коэффициент заполнения солнечного элемента с концентрацией КТ 60% значительно увеличился (до 35%). При дальнейшем увеличении концентрации КТ фотоэлектрические свойства разработанной ячейки ухудшаются. Таким образом, оптимальная концентрация КТ в структуре ПИ:CdSe составляет 60%.

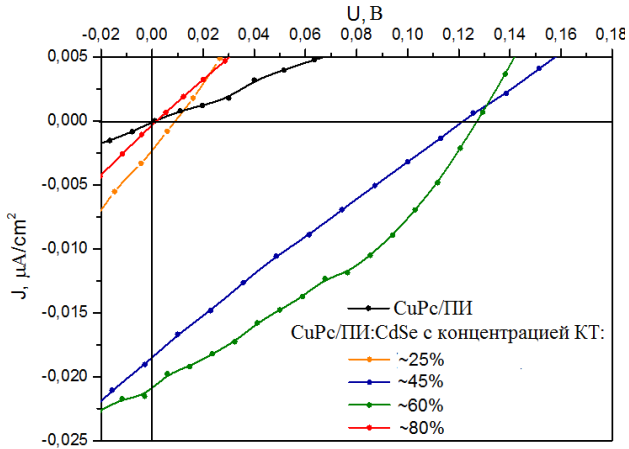


Рис. 6. Вольтамперная характеристика (ВАХ) фотовольтаических элементов ИТО/CuPc/ПИ/Al и ИТО/CuPc/ПИ:CdSe/Al с различной концентрацией КТ CdSe при освещении имитатором солнечного спектра Newport Orial с мощностью 50 мВт/см<sup>2</sup>.

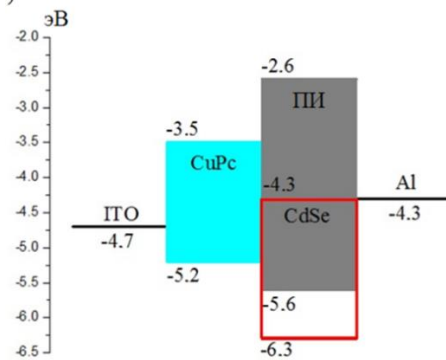


Рис. 7. Энергетическая диаграмма фотовольтаической ячейки, состоящей из ИТО-электрода, тонкого слоя фталоцианида меди (CuPc), слоя ПИ, допированного квантовыми точками CdSe, и верхнего контакта из Al.



Рассмотрим теперь фотовольтаические ячейки на основе новых узкозонных органических полупроводников PCDTBT и PTB7 [9, 10] и квантовых точек CdSe. На рис. 8 приведены вольтамперные характеристики солнечных ячеек на основе гибридных структур PCDTBT:CdSe и PTB7:CdSe в зависимости от концентрации КТ с средним размером 10 нм в матрице органического полупроводника. Видно, что в солнечном элементе на основе PCDTBT с увеличением концентрации КТ до 80% ток короткого замыкания ( $J_{кз}$ ) возрастает от 0.22 до 0.47  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , при этом форма вольтамперной кривой не меняется. В солнечном элементе на основе PTB7 при увеличении концентрации КТ с 50 до 80% наблюдается не только увеличение  $J_{кз}$ , но и возрастание фактора заполнения ( $FF$ ). Вольтамперные характеристики солнечных ячеек при концентрации КТ 75% имеют  $FF > 0.25$ , что обусловлено формированием эффективного гетероперехода на границе между PTB7 и CdSe. В частности, для концентрации КТ 80% в фотоактивном слое, эффективность преобразования света солнечной ячейки составила 0.2% при значении  $FF = 30\%$ .

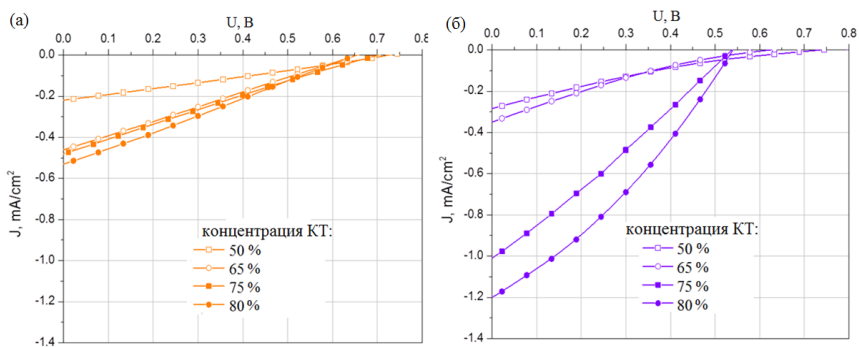


Рис. 8. ВАХ структур на основе полимера PCDTBT (а) или PTB7 (б) с КТ размером 10 нм в зависимости от концентрации КТ.

Обращают на себя внимание низкие значения  $J_{кз}$  и  $FF$  для структур на основе PCDTBT, даже при высокой концентрации CdSe.

Это говорит о том, что эффективный гетеропереход на границе между органическим полупроводником и квантовыми точками не образуется. Причина этого, по всей видимости, заключается в неудачном взаимном расположении энергетических уровней PCDTBT и КТ CdSe (рис. 9). Так, разница  $HCMO(ОПП) - E_c(КТ)$  не превышает  $\sim 0.2$  эВ. Следовательно, разделение зарядов на гетеро-границе за счет переноса электрона от органического полупроводника к КТ будет низкоэффективно. С другой стороны, так как КТ эффективно поглощают свет, возможен перенос дырки от КТ к органическому полупроводнику. Однако  $E_v(КТ) - ВЗМО(ОПП)$  не превышает  $\sim 0.2$  эВ, что сравнимо с энергией связи экситона в КТ CdSe [14], а следовательно, перенос дырки также затруднен. Таким образом, разделение зарядов в объеме активного слоя данной ячейки низкоэффективно, а наблюдаемый фототок, по всей видимости, преимущественно обусловлен разделением заряда на границе гибридной структуры и контактов.

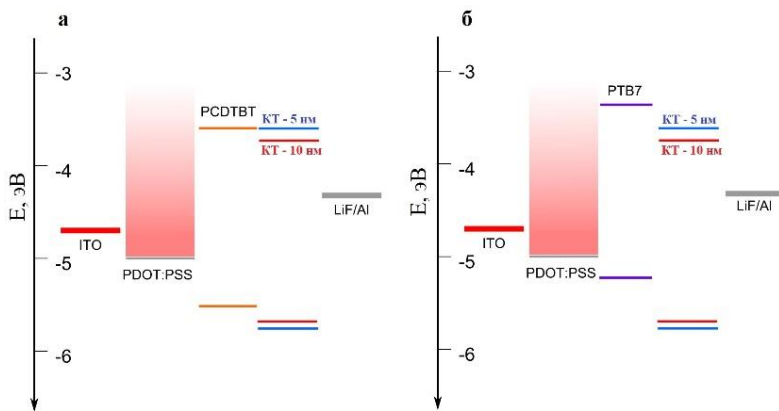


Рис. 9. Энергетические диаграммы солнечных ячеек на основе PCDTBT:CdSe (а) и PTB7:CdSe (б) [11, 12, 13].

В результате установлено, что максимальная эффективность преобразования оптического излучения в электричество в фотовольтаической ячейке на основе наногибридных материалов ПИ:CdSe достигается при концентрации КТ в ПИ-матрице на уровне

60% (по массе), что согласуется с лазерно-люминесцентными исследованиями (глава 3). Было показано, что максимальный коэффициент преобразования оптического излучения в электричество в фотовольтаической ячейке на основе наногибридных материалов РТВ7:CdSe и PCDTBT:CdSe достигается при концентрации КТ 80% (по массе).

Таким образом, на основании электрофизических исследований можно сделать вывод, что концентрация КТ в матрице органического полупроводника, а также морфология и толщина наногибридного слоя играют важную роль в создании высокоэффективной солнечной ячейки. Оптимизация этих параметров приводит к значительному повышению эффективности преобразования оптического излучения в электричество в фотовольтаической ячейке.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Созданы наногибридные материалы для солнечных ячеек на основе квантовых точек CdSe и органических полупроводников типа полиимида.
2. Исследованы люминесцентные свойства созданных наногибридных материалов. Обнаружено значительное (в 2 раза) возрастание квантового выхода люминесценции КТ при увеличении их концентрации в матрице полиимида от 60% до 80% (по массе). Дана интерпретация этого явления, основанная на кластерообразовании КТ в полиимидной матрице (наблюдаемом на эксперименте).
3. Разработаны фотовольтаические элементы на основе созданных наногибридных материалов – ИТО/CuPc/PI:CdSe/Al – и исследованы их свойства. Показано, что максимальные значения фотовольтаических характеристик достигаются при концентрации КТ в полиимидной матрице, равной 60%.
4. Созданы наногибридные материалы на основе квантовых точек CdSe с размером 5 и 10 нм и узкозонных органических полупроводников PCDTBT и РТВ7, проведена их характеристикация.
5. На основе созданных наногибридных материалов разработаны фотовольтаические элементы, имеющие структуру

ITO/PEDOT:PSS/PTB7:CdSe/LiAl и ITO/PEDOT:PSS/PCDTBT:CdSe/LiAl, и исследованы их фотовольтаические свойства. Показано, что оптимальные фотовольтаические характеристики достигаются при концентрации КТ на уровне 80% (по массе) и толщине наногибридного слоя 100 нм.

### **Цитируемая литература.**

1. Л. Е. Воробьев, Е. Л. Ивченко, Д. А. Фирсов, В. А. Шалыгин/ Оптические свойства наноструктур: учебное пособие для вузов по направлению "техническая физика"// Под общ. ред. В. И. Ильина и А. Я. Шика; Под ред. Е. Л. Ивченко и Л. Е. Воробьева. - СПб.: Наука, 2001. –С. 188.
2. В. О. Dabbousi, J. Rodriguez-Viejo, F. V. Mikulec, J. R. Heine, H. Mattoussi, R. Ober, K. F. Jensen, M. G. Bawendi/ (CdSe)ZnS core-shell quantum dots: synthesis and characterization of a size series of highly luminescent nanocrystallites// J. Phys. Chem. B., -1997, -Vol. 101, -P. 9463-9475.
3. Н. Hoppea, N. S. Sariciftci/ Organic solar cells: an overview// J. Mater. Res., -2004. -Vol. 19. - № 7. -P. 1924-1945.
4. P. E. Shaw, A. Ruseckas, I. D. W. Samuel/ Exciton diffusion measurements in poly(3-hexylthiophene)// Adv. Mater., -2008. -Vol. 20. -P. 3516–3520.
5. А. А. Chistyakov, I. L. Martynov, К. Е. Mochalov, V. А. Oleinikov, and K. V. Zakharchenko/ Laser-induced photoprocesses in solutions and films of the CdSe/ZnS nanoparticles// Laser Phys., -2008, -Vol. 18, -P. 925–938.
6. H. Song and S. Lee/ Photoluminescent (CdSe)ZnS quantum dot–polymethylmethacrylate polymer composite thin films in the visible spectral range// Nanotechnology, -2007, -Vol. 18, -P. 055402.
7. D. V. Talapin, J. H. Nelson, E. V. Shevchenko, S. Aloni, B. Sadler, and A. P. Alivisatos/ Seeded growth of highly luminescent CdSe/CdS nanoheterostructures with rod and tetrapod morphologies// Nano Lett., -2007, - Vol. 7, -P. 2951–2959.
8. K. V. Zakharchenko, E. A. Obraztcova, K. E. Mochalov, M. V. Artemyev, I. L. Martynov, D. V. Klinov, I. R. Nabiev, A. A. Chistyakov, and V. A. Oleinikov/ Laser-induced luminescence of CdSe/ZnS nanoparticles in solution and condensed phase// Laser Phys., -2005, -Vol. 15, -P. 1150–1153.
9. S. J. Lou, J. M. Szarko, T. Xu, L. Yu, T. J. Marks, and L. X. Chen/ Effects of additives on the morphology of solution phase aggregates formed by active

layer components of high-efficiency organic solar cells// J. Am. Chem. Soc., -2011, -Vol. 133, -P. 20661–3.

10. F. Liu, W. Zhao, J. R. Tumbleston, C. Wang, Y. Gu, D. Wang, A. L. Briseno, H. Ade, and T. P. Russell/ Understanding the morphology of PTB7:PCBM blends in organic photovoltaics// Adv. Energy Mater., -2014, -Vol. 4, -P. 1301377.

11. Y. Liang, Z. Xu, J. Xia, S.-T. Tsai, Y. Wu, G. Li, C. Ray, and L. Yu/ For the bright future-bulk heterojunction polymer solar cells with power conversion efficiency of 7.4%// Adv. Mater., -2010, -Vol. 22, -P. E135–8.

12. N. Blouin, A. Michaud, and M. Leclerc/ A low-bandgap poly(2,7-carbazole) derivative for use in high-performance solar cells// Adv. Mater., -2007, -Vol. 19, -P. 2295–2300.

13. V.V. Malov, A.G. Kazanskii, M.V. Khenkin, and A.R. Tameev/ Determining the optical absorption edge in organic semiconductor composites with a bulk heterojunction by the constant-photocurrent method// Tech. Phys. Lett., -2014, -Vol. 40, -P. 755–758.

14. R. W. Meulenber, J. R. I. Lee, A. Wolcott, J. Z. Zhang, L. J. Terminello, and T. van Buuren/ Determination of the exciton binding energy in CdSe quantum dots// ACS Nano, -2009, -Vol. 3, -P. 325–30.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации, индексируемые в базах Scopus и Web of Science:

1. **Dayneko S.**, Tameev A., Tedoradze M., Martynov I., Linkov P., Samokhvalov P., Nabiev I., Chistyakov A. Hybrid bulk heterojunction solar cells based on low band gap polymers and CdSe nanocrystals / Proceedings of SPIE, -2014, -Vol. 8981, -P. 898113-1 – 898113-8.
2. **Dayneko S.**, Tameev A., Tedoradze M., Artemyev M., Chistyakov A., Nabiev I. Hybrid heterostructures based on aromatic polyimide and semiconductor CdSe quantum dots for photovoltaic applications / Applied Physics Letters, -2013, -Vol. 103, -P. 063302-1 – 063302-4.
3. Chistyakov A.A., **Dayneko S.V.**, Kolesnikov V.A., Mochalov K.E., Oleinikov V.A., Tedoradze M.G., Zakharchenko K.V. Laser-induced luminescence of multilayer structures based on polyimides and CdSe and CdSe/ZnS nanocrystals / Laser Phys. Lett. -2009, -P. 1-5.
4. Chistyakov A.A., **Dayneko S.V.**, Oleinikov V.A., Tameev A.R., Tedoradze M.G., Zakharchenko K.V., Zolotarevskiy V.I. Luminescence and photovoltaic

- effect of multilayer structures based on CdSe and CdSe/ZnS nanoparticles embedded into organic semiconductors / Proceedings of SPIE, -2009, -Vol. 7364.
5. Chistykov A.A., **Daineko S.V.**, Helmut A.O., Oleinikov V.A., Tedoradze M.G., Zaharchenko K.V. Nanostructures based on organic semiconductors and thin films of CdSe and CdSe/ZnS nanoparticles: new materials for optoelectronics / Proceedings of SPIE, -2008, -Vol. 6988.
  6. Artemyev M.V., Chistyakov A.A., **Daineko S.V.**, Oleinikov V.A., Zaharchenko K.V. Laser induced photoprocesses in solid thin films of CdSe/ZnS nanoparticles / Proceedings of SPIE, -2007, -Vol. 6728.
  7. Artemyev M.V., Chistyakov A.A., **Daineko S.V.**, Martynov I.L., Nabiev I.R., Oleinikov V.A., Zaharchenko K.V. Laser induced luminescence of dense films of CdSe/ZnS nanoparticles / Proceedings of SPIE, -2007, -Vol. 6613.

Публикации в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК:

8. Артемьев А.М., **Дайнеко С.В.**, Набиев И.Р., Тедорадзе М.Г., Чистяков А.А. Солнечные ячейки на основе гибридных гетероструктур из органических полупроводников и квантовых точек / Нано- и микросистемная техника, -2012, -Т. 9, -С.2-6.
9. **Дайнеко С.В.**, Захарченко К.В., Караванский В.А., Мочалов К.Е., Олейников В.А., Чистяков А.А. Фотофизические свойства нанокристаллов CdSe в растворах и матрицах органического полупроводника / Ядерная физика и инженеринг, -2011, -Т. 2.
10. **Дайнеко С.В.**, Захарченко К.В., Золотаревский В.И., Мочалов К.Е., Тедорадзе М.Г., Тамеев А.Р., Чистолинов А.В., Чистяков А.А. Лазерно индуцированная люминесценция в гетероструктурах на основе органических полупроводников и наночастиц CdSe и CdSe/ZnS / Наноматериалы и наноструктуры, -2010, -Т. 1.
11. **Дайнеко С.В.**, Захарченко К.В., Олейников В.А., Тедорадзе М.Г., Чистяков А.А. Лазерно-индуцированная люминесценция многослойных структур на основе органических полупроводников и наночастиц CdSe и CdSe/ZnS / приложение к журналу Физическое образование в вузах, - 2009, -Т. 15, -С. 21-22.
12. **Дайнеко С.В.**, Тедорадзе М.Г., Чистяков А.А. Многослойные структуры на основе органических полупроводников и наночастиц CdSe и CdSe/ZnS.

Фотовольтаические и люминесцентные свойства / Нано- и  
микросистемная техника, -2009, № 8, -С. 32-34.