

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук **Савина Константина Антоновича** на тему: «Электрические и фотоэлектрические свойства композита поли(3-гексилтиофена) с наночастицами кремния» по специальности 1.3.11. – «физика полупроводников»

Органические полупроводники на сегодняшний день находят широкое применение в светочувствительных элементах, транзисторах, светодиодах, дисплеях, лазерах. Они обладают как существенными достоинствами (стоимость, простота использования) так и недостатками (низкая проводимость и фотопроводимость) по сравнению с неорганическими полупроводниками.

В то же время, гибридные материалы на основе полупроводниковых полимеров, в том числе РЗНТ, и неорганических наночастиц (Si, Ge, CdS, CdSe, PbS, ZnO) считаются перспективными для третьего поколения солнечных элементов, так как сочетают в себе преимущества как органических, так и неорганических полупроводников. Несмотря на это, до сих пор идут споры относительно процесса переноса носителей заряда, а также их оптической генерации в таких композитах. Изучение фундаментальных механизмов, определяющих данные процессы, представляется интересной и **актуальной** задачей. Этому и посвящена диссертационная работа Савина К.А.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 107 страниц, включая 34 рисунка, 2 таблицы и 125 наименований в библиографии.

Во введении изложены актуальность, новизна, цели и задачи, практическая ценность, обоснованность и достоверность работы, а также выносимые на защиту положения, информация о личном вкладе автора.

В **Главе 1**, являющейся обзором литературы, собраны актуальные сведения об органических полупроводниках, их классификации, электрических и фотоэлектрических свойствах. Особый упор сделан на описание свойств полимера РЗНТ и композитов на его основе.

Глава 2 отражает экспериментальную часть работы и дает полное представление об изученных образцах, способах их получения, методиках исследования.

Глава 3 посвящена исследованию проводимости исследуемого гибридного материала. Показано, что проводимость материала немонотонно зависит от концентрации наночастиц. При этом механизм проводимости при добавлении в полимер наночастиц кремния не изменяется. Ток течет по полимерной матрице, а наночастицы лишь влияют на распределение плотности электронных состояний полимера. Полученные выводы также подтверждаются исследованиями проводимости в сильных полях.

В **Главе 4** показано влияние внедрения наночастиц кремния на фотопроводимость материала. Показано, что на гетеропереходе полимер-наночастица происходит эффективная диссоциация оптически возбужденных экситонов полимера на свободные носители заряда, дающие вклад в фотопроводимость. Также показаны перспективы использования материала в качестве основы оптических датчиков.

Заключение содержит основные результаты работы, сформулированные в виде 6 положений.

Хотелось бы выделить следующие важнейшие результаты диссертационной работы, отражающие ее **научную новизну**:

1. В работе проделано комплексное исследование композитного материала, основанного на полимере РЗНТ, с внедренными наночастицами кремния. Собраны системные результаты по зависимости проводимости и фотопроводимости композита от концентрации наночастиц, получены новые фундаментальные

знания, важные и с практической точки зрения. Композитный материал впервые был исследован настолько подробно.

2. Используемые в образцах наночастицы формировались двумя различными способами: электрохимическое травление и лазерная абляция. Показано, что влияние наночастиц на свойства композита не зависит от способа их получения. Данный факт демонстрирует универсальность предложенных в диссертации механизмов влияния наночастиц кремния на свойства РЗНТ.
3. Получены полезные сведения практического характера, разработаны прототипы гибридных фотоприемных устройств с хорошими характеристиками. Полученные в диссертационной работе результаты способствуют расширению области применения полимерных материалов в фотовольтаике.

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях – имеется 3 статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых WoS и Scopus. Проведена апробация работы на широко известных российских и международных конференциях. Имеется также патент на полезную модель фоторезистора на основе изученного автором работы композита РЗНТ/nc-Si. Последнее подтверждает **практическую значимость** работы, в особенности в области гибридной фотоэлектроники.

Достоверность и обоснованность результатов работы также не вызывает сомнения. Используемые в диссертации экспериментальные методы являются современными и взаимодополняющими, а полученные с их помощью результаты – надежными и воспроизводимыми. Экспериментальные результаты работы анализировались теоретически путем численных расчетов с применением глубоких знаний в области физики полупроводников, что свидетельствует о достоверности сделанных в работе выводов.

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

При общей высокой оценке диссертационной работы, необходимо сделать **несколько замечаний**:

1. Обозначения образцов выбраны несколько неудачно. Так, образцы, содержащие наночастицы кремния, сформированные различными методами, следовало обозначить по-разному, что облегчило бы чтение диссертации. Для большей достоверности результатов все исследованные серии образцов должны были быть равнозначны (в исследовании различное число образцов в каждой серии).
2. На зависимостях проводимости композитов P3HT/nc-Si и других величин от объемной доли внедренных наночастиц кремния выявляются экстремумы, но они не прописаны достаточно точно. При выявлении максимума/минимума на некоторой концентрации следовало изготовить образцы с близкими к ней концентрациями, тем самым увеличив число точек вблизи интересующей области. Это позволило бы определить оптимальную концентрацию кремния с большей точностью.
3. В диссертации получены новые фундаментальные знания о механизмах проводимости в композитах P3HT/nc-Si. На мой взгляд, в работе не хватает рассуждений автора о потенциальной практической применимости этих знаний.
4. Многие рисунки, представленные в работе, имеют низкое качество и плохо читаемые надписи (в особенности, в Главе 1). Оформление как формул, так и текста в целом, содержит недочеты. Присутствуют орфографические и пунктуационные ошибки.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. 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, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Савин Константин Антонович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. – «физика полупроводников».

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник
Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий
Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
кандидат физико-математических наук
МИННЕХАНОВ Антон Анурович

«28» сентября 2022 г.

Контактные данные:

тел.: +7(499)1967100, доб. 6801,
e-mail: Minnekhanov_AA@nrcki.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защита диссертация:

01.04.10 (1.3.11.) – «Физика полупроводников»

Адрес места работы:

123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1;

ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

Курчатовский комплекс НБИКС-природоподобных технологий

тел.: +7(499)1967100, доб. 6801; e-mail: Minnekhanov_AA@nrcki.ru

Подпись Миннеханова Антона Ануровича заверяю:

Главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



К.А. Сергунова