

**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»**

Диссертационная работа Савина Константина Антоновича «Электрические и фотоэлектрические свойства композита поли(3-гексилтиофена) с наночастицами кремния» посвящена одному из весьма интенсивно развивающихся направлений органической фотовольтаики – гибридным (органо-неорганическим) композитам. Приборы на основе гибридных композитов (солнечные батареи и фотоприемники) обладают всеми плюсами, характерными для органических структур: гибкость, легкость, простота и дешевизна производства, возможность получения приборов неограниченной площади методами струйной и рулонной печати. При этом, добавление неорганических наночастиц позволяет существенно улучшить такие характеристики гибридных приборов, как квантовая эффективность и КПД. Однако, физические механизмы, стоящие за таким улучшением изучены слабо, что и определяет **актуальность** работы Савина К.А.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 125 ссылок. Введение дает краткую информацию об актуальности темы, постановке целей/задач диссертационного исследования, новизне, личном вкладе автора, достоверности и практической значимости работы. В первой главе представлен литературный обзор, дающий представление об органических полупроводниковых полимерах (в частности РЗНТ) и гибридных композитах РЗНТ с неорганическими наночастицами, их энергетической структуре,

переносу носителей тока и оптической генерации носителей заряда. Также в первой главе выделен пункт, посвященный органическим и гибридным фотоприемникам.

Во второй главе представлено описание методов получения и характеристики наночастиц кремния, а также методов формирования композитных образцов и фотоприемников на их основе. Кроме того, дано краткое описание методик исследования образцов.

Глава 3 посвящена изучению проводимости композитов PЗНТ/nc-Si, предложена модель транспорта носителей заряда в композитном материале. Установлено, что носители заряда в композите переносятся прыжками по локализованным состояниям полимера, распределенным по закону Гаусса. При этом наночастицы кремния влияют на параметры данного распределения. Также, установлено, что в электрических полях выше 10 кВ/см проводимость композита подчиняется закону Пула-Френкеля.

В четвертой главе приведены результаты исследования фотопроводимости композита PЗНТ/nc-Si. Продемонстрировано колоссальное увеличение фотопроводимости PЗНТ после добавления в него nc-Si, а также изменение спектрального диапазона фоточувствительности композита в зависимости от концентрации nc-Si.

В заключении собраны полученные в диссертационной работе научные результаты.

Отметим следующие важные результаты данной работы:

- 1) Показано, что перенос заряда в композите с небольшой концентрацией nc-Si (до порога перколяции) протекает по полимерной матрице прыжками. Наночастицы влияют на распределение носителей по состояниям полимера.
- 2) Обнаружена экспоненциальная зависимость проводимости от квадратного корня из напряженности электрического поля при высоких полях (больше 10 кВ/см).

- 3) Показано, что добавлением небольшого количества  $nc-Si$  можно в широких пределах изменять проводимость и фотопроводимость композитного материала, а также спектральный диапазон fotocувствительности.
- 4) Получено аналитическое выражение для зависимости проводимости от температуры в случае Гауссова распределения плотности состояний верхних заполненных молекулярных орбиталей.

Представленные результаты и положения, выносимые на защиту, **обладают достаточной новизной**, получены соискателем впервые. Также, их **новизна и достоверность** подтверждается апробацией работы на 11 докладах на научных конференциях, в 3 публикациях в рецензируемых научных журналах и патенте на полезную модель фотоприемника.

**Автореферат** в полной мере отражает материал диссертации.

Представленные в работе результаты и выводы являются **достаточно обоснованными**.

Вместе с тем, работа не избавлена от недостатков. Основными на мой взгляд являются:

- 1) В диссертации исследовались наночастицы размерами 10-100 нм. Как известно, свойства наночастиц в серьезной степени определяется их размерами. В этой связи крайне желательным было бы рассмотреть композиты с наночастицами различных размеров или, по крайней мере, обсудить возможные зависимости проводимости системы от размеров наночастиц.
- 2) Образцы в настоящей работе отжигались при 150 °C в течение 3-х часов. Не очень понятно, чем был мотивирован выбор данных параметров отжига.
- 3) На рисунках 3.8 и 4.2 приведены сравнения температурных зависимостей проводимости спектров фотопроводимости для образцов с

концентрацией наночастиц 4 и 17 об.%. Стоило бы провести сравнение и для других образцов.

4) Интересно было бы провести обсуждение возможности туннельного механизма подвижности носителей заряда.

Вместе с тем, указанные замечания, которые скорее во многом являются пожеланиями, 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:

Доктор физико-математических наук, Профессор  
главный научный сотрудник лаборатории функциональных нанокмполитов  
Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н.  
Семёнова Российской академии наук  
Трахтенберг Леонид Израйлевич

Контактные данные:

тел.: 7(903)008-8535, e-mail: litrakh@gmail.com

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных  
состояний вещества»

Адрес места работы:

119334, г. Москва, ул. Косыгина, 4, корп. 1,  
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н.  
Семёнова Российской академии наук, лаборатория функциональных  
нанокомпозитов

Тел.: +7 499 137-29-51; e-mail: icp@chph.ras.ru

Личную подпись Трахтенберга Л. И. заверяю:

Врио ученого секретаря

Семенова Ирина Сергеевна

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

МП