

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу
Ненашева Григория Васильевича на тему:

«Электрические и оптические свойства углеродных наноструктур и их композитов с полупроводниковыми полимерами и перовскитами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 «Физика полупроводников»

Рецензируемая диссертация Ненашева Г.В. посвящена исследованию физических свойств композитов на основе металлоорганических перовскитов, углеродных квантовых точек (CQDs) и оксида графена (GO), а также возможностям их применения в энергонезависимой памяти и органической электронике. Работа отличается **высокой степенью новизны, актуальностью и практической значимостью**, что позволяет рассматривать её как значительный вклад в развитие современных технологий.

Особенностью данного исследования является междисциплинарный подход, сочетающий синтез новых материалов, комплексный анализ их структуры, электрических и оптических свойств, а также создание тестовых мемристорных структур, демонстрирующих высокие характеристики. Такой подход позволил автору не только раскрыть физико-химические свойства материалов, но и предложить решения, направленные на их интеграцию в реальную электронику. В работе подчёркивается значение металлоорганических перовскитов, как перспективных материалов микроэлектроники, показана возможность изменения их уникальных свойств путем создания композитов с углеродными наноструктурами, такими как оксид графена и углеродные квантовые точки, что позволило достичь существенного улучшения функциональных характеристик.

Среди ключевых достижений стоит выделить исследование туннельного механизма переноса заряда в композитах с углеродными квантовыми точками, что стало важным вкладом в понимание поведения подобных материалов на наноуровне. В работе также раскрыты уникальные свойства перовскитных структур с оксидом графена, благодаря которым удалось повысить стабильность резистивного переключения и равномерность распределения зарядов. Разработка двухполосного мемристора, основанного на данных материалах, демонстрирует высокий прикладной потенциал работы. Устройство отличается уникальными для органических материалов характеристиками — высокой скоростью переключения, стабильностью при

длительных циклах эксплуатации и устойчивостью к температурным изменениям.

Практическая значимость исследования заключается в создании материалов, которые могут быть использованы для производства энергоэффективных и гибких электронных устройств. Эти материалы имеют потенциал для применения в гибридных сенсорах, энергонезависимых устройствах памяти и системах обработки больших данных. Кроме того, работа является важным шагом в развитии материалов, которые могут быть адаптированы для использования в нейроморфных вычислительных системах, предлагая новое видение на разработку искусственных аналогов биологических сетей.

Структура диссертации хорошо продумана и соответствует логике научного исследования. Диссертация состоит из шести глав, введения, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи, а также сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит детальный обзор современной литературы, посвящённой углеродным наноструктурам, металлоорганическим перовскитам и их композитам. Рассмотрены их оптические и электрические свойства, особенности переноса заряда и потенциальные области применения.

Во второй главе описаны методики синтеза исследуемых материалов, включая углеродные квантовые точки, перовскиты $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3(\text{I}_3)$ и их композиты с полимерами и оксидом графена. Приведены экспериментальные методы исследования, включая импедансную спектроскопию, фотолюминесценцию и анализ вольт-амперных характеристик.

В третьей главе найдены и проанализированы эффекты резистивного переключения в композитах $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3(\text{I}_3):\text{GO}$. Обнаружен эффект фотоиндуцированного переключения в пленках $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3:\text{GO}$. Предложен механизм резистивного переключения, связанный с захватом и накоплением носителей заряда в частицах GO, интегрированных в перовскитные структуры. Полученные структуры демонстрируют значительный потенциал для применения в энергонезависимых ячейках RRAM памяти.

Четвёртая глава посвящена изучению пленок CQDs и их композитов с $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$. Установлен туннельный механизм переноса заряда, а также представлены температурные зависимости сопротивления. Температурные зависимости вольт-амперных характеристик пленки CQDs демонстрируют положительный температурный коэффициент удельного сопротивления, что является редким и уникальным явлением для углеродных структур

В пятой главе исследованы композиты CQDs с PEDOT:PSS. Исследованы морфология, электрические и оптические свойства данных композитов. Показали, что морфология композитов CQDs+PEDOT:PSS характеризуется неоднородностью, шероховатостью по сравнению с чистыми CQD. Обнаружены зависимость электропроводности от концентрации полимера, высокая линейность полученных характеристик и стабильность свойств при внешних воздействиях.

Шестая глава посвящена разработке и исследованию двухполюсного мемристора на основе $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3:\text{GO}$. Изменение проводимости в широком температурном диапазоне объясняется переходом от ионной миграции к электронной проводимости, что может быть связано с фазово-структурным переходом в перовскитной пленке. Проведен анализ рабочих характеристик мемристора, временных параметров, температурной стабильности и возможности использования в нейроморфных системах.

В заключении кратко подводятся итоги всех представленных в диссертации глав.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 12 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, Scopus и входящих в список ВАК. В публикациях полностью раскрыты научные и практические результаты работы. Текст автореферата полно и правильно отражает содержание диссертации.

Как и любая научная работа, представленная диссертация не свободна от некоторых недостатков. **В качестве замечаний** хотела бы отметить следующее:

1. В работе не везде приведены толщины изученных тонких композитных пленок, что не позволяет оценить значения напряженности электрического поля в образцах и соотношения толщины пленок с размером агрегатов и нановключений.
2. За счет чего наночастицы GO работают как ловушки? Если это в основном поверхностные (краевые) эффекты, как влияет размер наночастиц?
3. На стр. 106 названы пики поглощения 610 нм и фотолюминесценции 500 нм образцов CQDs+MAPbBr₃ (рис. 29 и 30). Очевидно, на длине волны 610 нм мы не наблюдаем пика поглощения материала.
4. Чем может объясняться резкое изменение электропроводности композита CQDs+PEDOT:PSS в диапазоне от 3% до 5% PEDOT:PSS? Как это может быть связано с сильным изменением электропроводности этого образца от времени на рис. 47?

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижают общую высокую оценку уровня диссертационной работы.

В целом диссертация Ненашева Г.В. демонстрирует высокий уровень научной проработки, содержит значимые экспериментальные и теоретические результаты, которые подтверждают актуальность, новизну и практическую значимость работы. Автором предложены оригинальные подходы к созданию композитных функциональных материалов, а также разработаны устройства, перспективные для энергонезависимых запоминающих систем, органической электроники и нейроморфных процессоров. Работа полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-Техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ненашев Г.В., несомненно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
доцент, доцент Высшей инженерно-физической школы
Института электроники и телекоммуникаций
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого»

Захарова Ирина Борисовна

Контактные данные:

Раб.тел.: +7 (812) 552-96-71

Моб.тел.: +7(952)268-78-26

E-mail: zakharova@rphf.spbstu.ru

Адрес: 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»