

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Ненашева Г. В. 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»

Диссертационная работа Ненашева Григория Васильевича посвящена созданию и исследованию оптоэлектронных свойств композитных материалов на основе металлоорганических перовскитов, углеродных наноструктур и проводящих полимеров, которые ориентированы на применение в устройствах энергонезависимой памяти, органической электроники и нейроморфных системах. Тематика исследования находится на переднем крае современной науки, поскольку отвечает актуальным вызовам, связанным с разработкой новых материалов для энергоэффективной и устойчивой электроники. Современные тенденции развития микро- и наноэлектроники, включая нейроморфные вычислительные системы и гибкие электронные устройства, требуют создания новых функциональных материалов, обладающих высокой степенью настройки своих свойств. Композитные структуры, сочетающие характеристики металлоорганических перовскитов, углеродных наноструктур и проводящих полимеров, открывают принципиально новые возможности для реализации таких систем. Исследуемые в работе материалы демонстрируют уникальные свойства, такие как эффект резистивного переключения, туннельный перенос заряда и устойчивость к температурным воздействиям, что позволяет рассматривать их как основу для создания устройств нового поколения.

Актуальность исследования подтверждается глобальными научными тенденциями, а также возросшим интересом к металлоорганическим перовскитам и углеродным наноструктурам как перспективным материалам для запоминающих устройств. Особую значимость представляет исследование их синергетических эффектов, позволяющее добиться улучшенных характеристик. Работа демонстрирует глубокий научный подход и включает в себя множество оригинальных результатов, которые имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. Автору удалось установить, что добавление частиц оксида графена (GO) в матрицу перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ позволяет увеличить встроенный потенциал почти в два раза, а также улучшить характеристики резистивного переключения за счёт равномерного распределения носителей заряда. Получены новые данные, которые можно интерпретировать как туннельный перенос заряда в композитах углеродных квантовых точек (CQDs) и перовскитов.

Особого внимания заслуживает разработка двухполюсного мемристора на основе пленки перовскита с частицами GO, который показал время переключения порядка 40 нс, стабильность характеристик в широком температурном диапазоне и способность имитировать кратковременную и долговременную пластичность, что делает его перспективным для нейроморфных вычислений. Практическая значимость работы заключается в демонстрации перспективности разработанных материалов для энергонезависимых запоминающих устройств, гибкой электроники и систем с возможностью оптической и электрической записи данных. Мемристоры на основе $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ с оксидом графена показывают высокую стабильность и скорость

переключения, а композитные слои CQDs и PEDOT:PSS демонстрируют возможность адаптации свойств и линейности характеристик, что особенно важно для применения в гибких сенсорах, транзисторах и оптоэлектронных устройствах.

Содержательная часть диссертации логично структурирована и включает введение, шесть глав, заключение и список литературы. Общий объем диссертации составляет 194 страниц, включая 61 рисунок. Список цитируемых источников содержит 380 наименований.

Введение обосновывает актуальность работы, формулирует её цели, задачи и положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе представлен анализ современного состояния исследований в области углеродных наноматериалов, перовскитов и их композитов, включая их свойства, механизмы переноса заряда и возможности практического применения. **Вторая** глава описывает методы синтеза изучаемых материалов и экспериментальные подходы к их исследованию. **Третья и четвёртая** главы посвящены анализу резистивного переключения в композитах на основе перовскитов с GO и туннельного механизма переноса заряда в пленках CQDs. Получены данные о взаимосвязи концентрации компонентов с их электрическими и оптическими характеристиками. В **пятой** главе исследуются системы на основе PEDOT:PSS, демонстрирующие улучшенные свойства благодаря изменению состава. **Шестая** глава описывает разработку мемристорных устройств, включая анализ их временных и температурных характеристик.

В **Заключении** подведены основные итоги работы.

Все описанные в работе методы являются современными, позволяют получить воспроизводимый результат, что, безусловно, определяет высокий научный уровень проведенных исследований. Обоснованность научных методов и подходов подтверждается наличием обширного списка литературы и большого количества ссылок на авторитетные источники. Результаты исследования опубликованы в 12 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и ВАК, а также были представлены на 10 российских конференциях. Текст автореферата адекватно отражает содержания диссертации.

В качестве замечаний по диссертационной работе Ненашева Г.В. хотел бы отметить следующее:

1.стр.95. Указано, что для перовскита с бромом начало края поглощения находится при длине волны около 540 нм, однако из рис.24 это не очевидно. Необходимы пояснения. Возможно покрытие полимером помогает установить край, тогда на это надо указать

2.стр.106. На рис.28 приведенное распределение наночастиц по размерам надо аппроксимировать логнормальным распределением, поскольку именно это распределение наиболее адекватно экспериментальным данным по распределению частиц по размерам, поскольку оно и несимметрично и определено только для положительных величин

3.стр.111. На рис.34 а и б изображены мнимые и вещественные части импеданса. Из рис. 34 не ясно насколько выполнен закон Ома, когда должно быть $(J_m/Z)^* (J_m/Z) + (Re/Z)^* (Re/Z) = 1$

4.стр. 113 Указано, что пленка с углеродными квантовыми точками обладает низким сопротивлением при комнатной температуре и оно уменьшается с понижением

температуры. Необходимо пояснить какие эффекты могут объяснять такое поведение сопротивления.

5.стр.124 На рис.44 приведены спектры поглощения и фотолюминесценции композитной пленки из углеродных квантовых точек и полимеров и указано, что их оптические свойства могут быть объяснены синергетическим эффектом взаимодействия между квантовыми точками и полимером. Это не объяснение, синергетических эффектов нет, это жаргон. Необходимо пояснение на физическом языке. В целом в диссертационной работе имеется заметное число не вполне устоявшихся терминов, на которые соискателю было указано.

6.стр.147.Приведена формула похожая на выражение для емкости p_n перехода, но формула для емкости p_n перехода содержит при слагаемом kT/e множитель $\ln(p_p/n_n)$. В (9) этого множителя нет и нет пояснений. Тогда вопрос- правильная ли оценка для потенциального барьера V_{bi} ?

Диссертация Ненашева Г.В. «Электрические и оптические свойства углеродных наноструктур и их композитов с полупроводниковыми полимерами и перовскитами» демонстрирует высокую степень новизны и научной проработки, её результаты подтверждены современными методами исследований, а выводы обоснованы экспериментально. 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.

доктор физико-математических наук
профессор, главный научный сотрудник, заведующий сектором
Теории оптических и электрических
явлений в полупроводниках
ФГБУН «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»
Аверкиев Никита Сергеевич

Тел.: +7(921)794-02-02

E-mail: averkiev@les.ioffe.ru

Адрес: 194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26

ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Ученый секретарь ФТИ им.А.Ф.Иоффе

кандидат физико-математических наук Патров М.И.