

О Т З Ы В

на диссертационную работу Лебедева Дениса Владимировича «Методы управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах: неупругое туннелирование электронов и твердотельные нанопоровые мембраны», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

Диссертационная работа Д.В. Лебедева посвящена одной из наиболее перспективных и динамично развивающихся областей современной экспериментальной физики — нанофотонике и наноионике. В условиях стремительной миниатюризации электронных и оптоэлектронных устройств ключевой проблемой становится управление фундаментальными процессами переноса заряда (электронов и ионов) в наноразмерных системах. Традиционные подходы к генерации и детектированию света сталкиваются с дифракционным пределом и проблемами интеграции с кремниевой электроникой. В этом контексте разработка методов управления оптическим излучением на основе неупругого туннелирования электронов представляет собой принципиально новый путь создания компактных, энергоэффективных и совместимых с КМОП-технологией источников света. Такие источники способны стать альтернативой традиционным лазерным системам в интегральной фотонике, обеспечивая локальную генерацию излучения непосредственно в области наноразмерных элементов схемы.

Управление ионным транспортом в твердотельных нанопорах является критически важным для развития биоаналитических систем, мембранных технологий и устройств типа «lab-on-a-chip». Возможность селективного пропуска ионов и молекул через нанопоры открывает перспективы для создания высокочувствительных сенсоров для диагностики заболеваний, секвенирования ДНК и мониторинга окружающей среды. Сочетание в одном исследовании двух различных направлений – оптического управления через туннельные контакты и ионного транспорта через мембраны, делает работу междисциплинарной. Актуальность темы подтверждается растущим количеством публикаций в ведущих мировых журналах и интересом со стороны индустрии к фотонным интегральным схемам нового поколения.

Научная новизна диссертации не вызывает сомнений и подтверждается совокупностью результатов, впервые полученных автором совместно с его коллегами.

В частности, автором экспериментально установлено прямое соответствие между напряжением на туннельном контакте, соответствующим открытию неупругого канала туннелирования, и интенсивностью излучения. Этот фундаментальный результат позволил реализовать оригинальную методику непрямого детектирования оптического сигнала по анализу вольт-амперных характеристик, что упрощает диагностику наноисточников в интегральных схемах. Впервые методом СТМ-наноитографии созданы гибридные Si/Au наноантенны. Эти структуры обладают увеличенной локальной плотностью оптических состояний и демонстрируют генерацию излучения в двух режимах (неупругое туннелирование электронов и электролюминесценция), что расширяет функциональность нанофотонных устройств. Кроме того, автор диссертационной работы показал возможность возбуждения как локальных, так и коллективных плазмонных мод в массивах золотых наноструктур, полученных методом фемтосекундной лазерной печати. Это открывает путь к созданию перестраиваемых источников излучения в видимом и ближнем ИК-диапазонах с возможностью динамического управления спектральными характеристиками. В работе впервые реализован наноразмерный электроуправляемый источник излучения, интегрированный в полупроводниковый волновод на основе нитевидных нанокристаллов GaP с контролируемой кристаллической структурой (включения фазы вюрцита). Это достижение является важным шагом к созданию гибридных фотонных интегральных схем.

Лебедев Д.В. обнаружил обратимое изменение ионной проводимости и селективности нанопористых мембран с проводящим углеродным покрытием под действием внешнего электрического поля, а также фотоиндуцированное увеличение проводимости единичной твердотельной нанопоры при облучении светом малой интенсивности. Эти результаты закладывают основу для создания «умных» мембран с адаптивными свойствами.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного поверенного оборудования, корректным применением методов обработки экспериментальных данных и высокой воспроизводимостью результатов. Важным аспектом является согласие экспериментальных данных с численным моделированием (пакет COMSOL Multiphysics) и с результатами независимых исследований, опубликованными в ведущих научных изданиях.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании методик и технологий, которые могут быть непосредственно использованы при разработке оптоэлектронных интегральных схем нового поколения. В частности, разработанные методы непрямого контроля работы наноисточников позволяют упростить процесс тестирования и отладки фотонных чипов. Результаты по созданию гибридных наноантенн и плазмонных структур могут быть применены для повышения эффективности светодиодов и фотодетекторов.

В области ионного транспорта результаты работы имеют прямое отношение к проектированию нанопоровых биосенсоров нового поколения. Возможность управления селективностью мембран внешним полем позволяет создавать фильтры с настраиваемыми свойствами, что важно для задач микрофильтрации и разделения веществ. Фотоиндуцированное изменение проводимости нанопор может быть использовано для создания оптоионных транзисторов и элементов памяти. В целом, совокупность полученных результатов имеет фундаментальное значение для физики наноструктур и открывает новые возможности для создания элементной базы оптоэлектроники, нанофотоники и биоаналитических систем.

Однако в представленной диссертации содержится ряд недостатков, которые не снижают ценности и актуальности работы:

1. В работе демонстрируется генерация излучения посредством неупругого туннелирования, однако не приведено сравнение квантовой эффективности данных наноисточников с традиционными миниатюрными светодиодами.
2. Гибридные Si/Au наноантенны, созданные методом СТМ-наноитографии, демонстрируют отличные характеристики в условиях сверхвысокого вакуума. Однако не вполне ясно, как ведут себя данные структуры при эксплуатации в атмосферных условиях или в среде с повышенной влажностью, что критично для практического применения.
3. Обратимое изменение ионной проводимости мембран продемонстрировано на модельных растворах. Как наличие сложных белковых соединений и биологических загрязнений влияет на стабильность работы углеродного покрытия и сохраняются ли свойства селективности в реальных анализатах.
4. При неупругом туннелировании и ионном транспорте через нанопоры возможно локальное выделение тепла. Были ли проведены исследования температурной стабильности предложенных устройств при работе в режимах повышенной мощности, и как теплоотвод влияет на соседние элементы интегральной схемы?

В заключение следует отметить, что диссертационная работа Лебедева Д.В. выполнена на высоком научном уровне, основные результаты докладывались автором на российских конференциях и были опубликованы в высоко-рейтинговых научных журналах первого квартиля (Phys. Rev. Lett., J. Phys. Chem. Lett., Adv. Opt. Mat., и др.). Это подчеркивает значительный вклад автора в быстро развивающуюся область наноионики и

свидетельствует о признании его достижений. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявленным к кандидатским диссертациям согласно п. 9 положения «О порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор Лебедев Д.В., и может быть рекомендована для защиты с целью присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Доктор физико-математических наук
(специальность 01.03.06-оптика), профессор
Заведующий кафедрой оптики и нанофотоники
института физики ФГАОУ ВО
«Казанский (Приволжский)
федеральный университет»
e-mail: skharint@gmail.com



Харинцев Сергей Сергеевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» Адрес: 420008, Россия, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18.

Телефон: 8 (843) 315214

Электронный адрес: <https://kpfu.ru>

e-mail: public.mail@kpfu.ru

