

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

**24.1.029.01 (Д002.034.01) НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

**ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от «08» апреля 2026 г. № 4

о присуждении Лебедеву Денису Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Методы управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах: неупругое туннелирование электронов и твердотельные нанопоровые мембраны» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 26.12.2025 г., протокол № 20, диссертационным советом 24.1.029.01 (Д002.034.01) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.31-33, лит. А, приказ от 02.11.2012 № 714/нк.

Соискатель: Лебедев Денис Владимирович, 1985 года рождения, в 2009 г. окончил Государственное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина» по специальности/направлению «Физика». Диплом магистра № 120 06 1/09, выдан 30.06.2009.

С 2009 по 2012 год Лебедев Денис Владимирович проходил обучение в аспирантуре в Казанском физико-техническом институте им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН. В 2012 году Лебедев Д.В. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности № 01.04.17, Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества, диплом - серия ДКН №183182 (решение диссертационного совета при Казанском физико-техническом институте им. Е.К. Завойского №9 от 23 ноября 2012г.).

В настоящее время Лебедев Д.В. работает старшим научным сотрудником лаборатории Возобновляемых источников энергии ФГБУВОН «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» (СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова).

Диссертация выполнена в СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова.

Научный консультант: Мухин Иван Сергеевич, доктор физико-математических наук, в настоящее время проректор по научной работе и заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова.

Официальные оппоненты:

Мошников Вячеслав Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. В разделе 3.3.1 показано, что интенсивность СТМ-индуцированной люминесценции максимальна вблизи краев дисковой золотой наноантенны. Вместе с тем известно, что при сканировании СТМ в области резких топографических границ, особенности работы системы обратной связи могут приводить к локальным скачкам туннельного тока. В этой связи представляется целесообразным дополнительно прокомментировать в какой степени наблюдаемое увеличение интенсивности СТМ-люминесценции на краях наноструктуры обусловлено именно локальным усилением оптических мод, а в какой — возможными вариациями туннельного тока, связанными с режимом работы обратной связи СТМ. Такое обсуждение позволило бы более однозначно интерпретировать полученные экспериментальные результаты.
2. В диссертационной работе, в разделе 3.3.3 рассматривается возможность создания наноразмерного источника оптического излучения с перестраиваемыми спектральными характеристиками в видимой и ближней инфракрасной областях. При этом основные экспериментальные данные по

интенсивности излучения представлены для видимого диапазона, тогда как для ближней ИК области приводится преимущественно качественное обсуждение, связанное с особенностями регистрации сигнала. Представляется, что дополнительное пояснение ограничений экспериментальной детекции и условий наблюдения излучения в ближней ИК области, а также более четкое разграничение экспериментально подтвержденных и ожидаемых спектральных характеристик, сделало бы изложение результатов еще более ясным и наглядным для читателя.

3. В диссертационной работе (в частности, разделе 4) увеличение ионной проводимости нанопор связывается с изменением поверхностного заряда. Представляется, что более развернутое обсуждение взаимосвязи между величиной поверхностного заряда и наблюдаемыми изменениями ионной проводимости, включая качественное или модельное описание соответствующих механизмов, сделало бы интерпретацию данного эффекта более наглядной и полной. Такое дополнение способствовало бы более глубокому пониманию физической природы наблюдаемого явления.

Казанцев Дмитрий Всеволодович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физического института имени П. Н. Лебедева РАН представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. Вольтамперные характеристики туннельного зазора, а также карты светимости/проводимости поверхности образца во многих экспериментах получены в нормальных окружающих условиях, в атмосфере окружающего воздуха. Напряжения между иглой и образцом в этих экспериментах достигают 10В, что позволяет заподозрить возможность химических превращений неизвестных веществ, адсорбированных на поверхностном слое, стимулированных доставкой дополнительных электронов на энергетические уровни в этих слоях, или наоборот, оттоком электронов с каких-то поверхностных уровней. Автор осознает упомянутую в замечании опасность, и принимает вполне достойные меры к тому, чтобы проверить отсутствие артефактов такого рода. Однако, рассуждая об идеале, следует отметить, что

перенос исследований в высокий вакуум, сопровождаемый полноценной очисткой поверхности (отжиг, бомбардировка образца пассивными ионами) был бы вполне ожидаемым шагом при дальнейшем развитии описанной в диссертации экспериментальной техники.

2. Эффективность преобразования электричества в свет, достигаемая в описанных автором эксперименте, составляет ничтожный процент. Оппонент понимает, что в этом не вина автора диссертации, и что не прямые/неупругие оптические переходы вообще весьма маловероятная вещь. Это замечание не снижает впечатления о высоком качестве работы, это скорее сетование на несовершенство мира, доставшегося нам всем для исследований.

Скорб Екатерина Владимировна, доктор химических наук, ведущий профессор, директор Мегафакультета наук о жизни Университета ИТМО представила на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. В работе показано, что после процесса lift-off на поверхности SiN_x мембраны могут сохраняться остаточные наночастицы золота, что проиллюстрировано, в частности, на рисунке 4.9. В связи с этим представляется целесообразным более подробно обсудить возможное влияние остаточных Au-наночастиц на распределение и фокусировку оптического излучения в области нанопоры и, как следствие, на измеряемую ионную проводимость. В частности, представляет интерес вопрос о том, могут ли такие металлические наночастицы вносить дополнительный вклад в локальные электромагнитные поля и приводить к вариациям наблюдаемого эффекта.
2. В диссертационной работе при обсуждении электрических свойств нанопористых мембран на основе Nafen и C-Nafen не приводятся численные значения их поверхностного удельного сопротивления, при этом отмечается, что низкое сопротивление C-Nafen мембраны является характерным для проводящих углеродных слоев. Вместе с тем представляется целесообразным дополнить данный вывод обсуждением конкретных экспериментальных проявлений или особенностей измерительной методики, которые позволяли бы качественно или наглядно идентифицировать высокую

электропроводность C-Nafen мембраны. Такое дополнение сделало бы интерпретацию полученных данных еще более убедительной и наглядной.

3. В диссертационной работе при проведении СТМ - и СТМ - люминесцентных экспериментов использовались зонды из различных материалов, в частности вольфрамовые и платиновые. Представляется целесообразным более подробно обсудить особенности работы с каждым типом зондов, а также возможные различия в их влиянии на характеристики туннельного контакта, стабильность измерений и параметры регистрируемого оптического излучения. Такое обсуждение позволило бы более полно оценить воспроизводимость результатов и область применимости используемых экспериментальных подходов.

Ведущая организация – Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» в своем **положительном заключении**, утвержденном проректором, начальником Управления научной политики, чл.- корр. РАН, профессором, доктором физико-математических наук Федяниным Андреем Анатольевичем, подписанном Хохловым Алексеем Ремовичем, Академиком РАН, профессором, доктором физико-математических наук, заведующим кафедрой физики полимеров и кристаллов и Яминским Игорем Владимировичем, профессором, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником кафедры физики полимеров и кристаллов, указала, что диссертация Лебедева Д.В. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2, и отметила следующие замечания:

1. В разделе 3.3.1 рассматривается распределение локальной плотности оптических состояний дисковой наноантенны. При этом утверждается, что усиление оптического СТМ-Л сигнала на краях антенны связано именно с плотностью состояний. Возможно ли такое усиление сигнала за счет повышения туннельного тока при нестабильности работы системы обратной связи на развитом рельефе на границе диска?

2. В разделе 2.3 рассматривается методика изготовления пористых мембран из материала Алуминан или Nafen. Однако, не совсем ясно для чего необходимо проводить этап ультразвуковой гомогенизации материала при формировании мембран. Почему нельзя использовать данный материал в исходном виде?
3. В таблице 1 на странице 100 допущена неточность в порядке величин квантовой эффективности.
4. На рисунке 2.7 представлено изображение чипа с четырьмя свободно подвешенными SiN мембранами. Не совсем ясно, почему используется именно геометрия с четырьмя образцами? Чем обусловлен такой выбор?

Соискатель имеет **71 (семьдесят одну)** опубликованную работу, индексируемую в базах РИНЦ, SCOPUS и Web of Science, из них по теме диссертации **30 (тридцать): 19** статей в журналах, входящих в базы данных Web of Science или Scopus и **11** в журналах, рекомендованных ВАК для защиты диссертаций.

К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся 11 (одиннадцать) публикаций:

1. Indirect Detection of the Light Emission in the Local Tunnel Junction / D. V. Lebedev [et al.] // Phys. Status Solidi RRL. — 2020. — Vol. 14, no. 3. — P. 1900607.
2. Femtosecond Laser-Printed Gold Nanoantennas for Electrically Driven and Bias-Tuned Nanoscale Light Sources Operating in Visible and Infrared Spectral Ranges / D. V. Lebedev [et al.] // J. Phys. Chem. Lett. — 2023. — Vol. 14, no. 22. — P. 5134—5140.
3. Scanning Tunneling Microscopy-Induced Light Emission and I(V) Study of Optical Near-Field Properties of Single Plasmonic Nanoantennas / D. V. Lebedev [et al.] // J. Phys. Chem. Lett. — 2021. — Vol. 12, no. 1. — P. 501—507.
4. Nanoscale Electrically Driven Light Source Based on Hybrid Semiconductor/ Metal Nanoantenna / D. V. Lebedev [et al.] // J. Phys. Chem. Lett. — 2022. — May. — Vol. 13, no. 20. — P. 4612—4620.

5. Electrically-Driven Light Source Embedded in a GaP Nanowaveguide for Visible-Range Photonics on Chip / D. V. Lebedev [et al.] // *Adv. Opt. Mater.* — 2024. — July. — Vol. 12, no. 25. — P. 2400581.
6. Carbon Coated Alumina Nanofiber Membranes for Selective Ion Transport / V. S. Solodovnichenko, D.V. Lebedev [et al.] // *Adv. Eng. Mater.* — 2017. — Vol. 19, no. 11. — P. 1700244.
7. Ultra-Low Intensity Light-Driven Ionic Conductivity through a Plasmonic Nanopore / D. V. Lebedev [et al.] // *ACS Appl. Nano Mater.* — 2024. — Vol. 7, no. 14. — P. 16172—16181.
8. Coupled thermal analysis of carbon layers deposited on alumina nanofibers / V. S. Solodovnichenko, D.V. Lebedev [et al.] // *Thermochim. Acta.* — 2019. — Vol. 675. — P. 164—171.
9. On the origin of membrane potential in membranes with polarizable nanopores / I. I. Ryzhkov, D.V. Lebedev [et al.] // *J. Membr. Sci.* — 2018. — Vol. 549. — P. 616—630.
10. Induced-Charge Enhancement of the Diffusion Potential in Membranes with Polarizable Nanopores / I. I. Ryzhkov [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2017. — Vol. 119, no. 22. — P. 226001.
11. Влияние оптического излучения различной длины волны на транспортные характеристики тонких SiN мембран с интегрированными единичными нанопорами / П.К. Афоничева, Д.В.Лебедев [и др.] // *Письма в журнал технической физики.* — 2023. — Т. 23, № 49. — С. 35—37.
12. Формирование наноструктур Au/Si методом токовой литографии в сканирующем туннельном микроскопе / Д.В. Лебедев [и др.] // *Письма в журнал технической физики.* — 2022. — Т. 12, № 48. — С. 15—18.

На автореферат диссертации поступили следующие отзывы:

- 1) От доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Института физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород) Аладышкина Алексея Юрьевича.

Замечания:

Было бы неплохо сравнить карты локальной туннельной проводимости (зависимости dI/dV от латеральных координат x, y на энергиях, соответствующих началу оптических переходов) с картой интенсивности оптического излучения на заданной длине волны как функции положения СТМ-зонда. Это позволило бы установить соответствие между особенностями томографии, локальных электронных и оптических свойств.

Было бы неплохо изучить вопрос, зависит ли интенсивность оптического излучения от формы СТМ иглы и наличия долгоживущих резонансных состояний в области туннельного перехода. Остроту иглы и наличие резонансных состояний можно было бы легко детектировать по характерному виду спектров гундлаховских осцилляций проводимости dI/dV или скорости смещения иглы dZ/dV при проведении Z-V спектроскопии в режиме заданного тока (см., например, Aladyshkin, *Journal of Physics: Condensed Matter*, V. 32, 435001 (2020); Aladyshkin and Schouteden, *Journal of Physical Chemistry C*, v. 126, 13341 (2022)).

Зависит ли интенсивность оптического излучения в Si/Au наноантеннах от наличия или отсутствия кристаллической фазы в исследуемых образцах? Проводились ли дополнительные исследования (например, спектроскопия комбинационного рассеяния и спектроскопия неупругих потерь) для подтверждения наличия разных фаз в сформированных наноструктурах?

- 2) От доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой оптики и нанофотоники института физики ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (г. Казань) Харинцева Сергея Сергеевича.

Замечания:

В работе демонстрируется генерация излучения посредством неупругого туннелирования, однако не приведено сравнение квантовой эффективности данных наноисточников с традиционными миниатюрными светодиодами.

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.

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?

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?

- 3) От доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника лаборатории физики и химии поверхности КФТИ КазНЦ РАН (г. Казань) Бухараева Анастаса Ахметовича и от кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории физики и химии поверхности КФТИ КазНЦ РАН (г. Казань) Нургазизова Нияза Ильгизовича.

Замечания:

Известно, что на достоверность результатов в режиме сканирующей туннельной спектроскопии в сверхвысоком вакууме существенно влияет слой загрязнений в виде адсорбированных на поверхности иглы СТМ атомов или молекул. Однако, в автореферате ничего не говорится, как контролировалась чистота поверхности иглы и была ли ее предварительная обработка перед началом измерений (например, термоотжиг).

Не совсем удачно сформулирована цель работы, которая состоит из двух не связанных общей идеей частей: «... (1) создание методов и исследование усиления генерации света... и (2) управления транспортом ионов...». Возможно более удачной была бы формулировка как «...является создание методов управления транспортом носителей заряда через различные среды и исследование связанных с этим эффектов для создания функциональных наносистем оптоэлектроники...».

Некоторые формулировки новизны не совсем корректны:

А) В пункте 1 не указано на каких системах были установлены «... соответствие между напряжением на локальном туннельном спектре...и длиной волны излучения...» насколько это понятно из автореферата, это было сделано на золотых пленках и структурах, изготовленных на их основе.

Б) В пункте 3 не упоминается, что результаты получены на наноструктурах в виде золотых полусфер, а не на каких-либо еще.

При обсуждении полученных экспериментальных результатов не всегда проводится полный анализ полученных данных. Например, при анализе рис. 1 с ВАХ, полученными на золотых пленках, автор сосредотачивается только на диапазоне 1.6-1.8 В. При этом приведенные ВАХ ограничены величиной в 2 В (рис. 1 а, б), а оптический сигнал исследуется до 3 В (рис. 1 в) и достигает регистрируемых значений при значениях больше 1.8 В, что находится на границе диапазона полученных ВАХ. При этом особенности зависимости d^2I/dV^2 , наблюдаемые в области 0.5 В, не обсуждаются. На них обращают внимание только при анализе ВАХ, полученных на наноструктурах типа нанобамп (рис. 6, 7).

При обсуждении создания Si/Au наноантенн (рис. 4, 5) ничего не сказано о возможности переноса материала (Au) не только из-под пленки кремния, покрывающего золото, но и с поверхности используемого для создания импульса тока PtIr зонда. Это может привести к созданию нанодисков с более сложным химическим составом и свойствами отличными от обсуждаемых дисков из золота и кремния.

Список публикаций автора по теме диссертации недостаточно информативен. Не во всех публикациях присутствует фамилия диссертанта (иногда указана только фамилия первого автора и «др.»). Желательно также было привести DOI публикаций.

4) От кандидата технических наук, ведущего специалиста АО «Светлана

Электронприбор» (г. Санкт-Петербург) Смирнова Александра Дмитриевича:

1. В разделе, посвященном нитевидным кристаллам, при обсуждении спектров фотолюминесценции (ФЛ) GaP:Be и GaP:Si было бы полезно привести более

четкое объяснение, почему сигнал СТМ-индуцированной люминесценции в GaP:Be локализован лишь в определенных областях, при этом не обсуждается локализация ФЛ сигнала.

2. При описании методики создания единичных нанопор с помощью ПЭМ следовало бы указать разброс геометрических параметров получаемых пор (диаметр, конусность), так как это критически важно для воспроизводимости результатов по ионной проводимости.

5) От кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории сканирующей спектроскопии поверхности полупроводников ФГБУН Института физики твердого тела им. Ю.А.Осипьяна РАН (г. Черноголовка) Божко Сергея Ивановича.

Замечания:

В автореферате недостаточно подробно раскрыта методика учета влияния рельефа поверхности на сигнал СТМ-Л при картировании ЛПОС (локальной плотности оптических состояний) (Глава 3), а также отсутствуют данные о долговременной стабильности работы созданных источников излучения и нанопоровых мембран, что важно для оценки их практического потенциала.

Экспериментальная часть работы выполнена с использованием PtIr иглы в качестве зонда СТМ. Следовало бы провести эксперименты с другими зондами СТМ, например, вольфрамовым, для выяснения роли зонда в наблюдаемых явлениях.

Есть недостатки в оформлении автореферата. Так на стр. 16, рис.3(б) в правом верхнем углу надпись «позиция 1, без зонда», «позиция 1, с зондом», «позиция 2, без зонда», «позиция 2, с зондом» непонятно к чему относится, никаких пояснений нет. В подписи к рис.6 отсутствует подпись к панели (в).

Все отзывы на автореферат диссертации положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловлен их значительным опытом в таких областях, как нанофотоника, физика полупроводниковых наноструктур, химия и физика нанообъектов, электрохимия, синтез твердотельных наноразмерных структур, проведение электрических измерений, а также разработка материалов и приборов для электроники и фотоники.

Этот опыт подтверждается публикациями, затрагивающими вопросы, соответствующие теме диссертации соискателя.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

обоснованы и экспериментально **продемонстрированы** методы формирования и исследования функциональных наноструктур, включающие: метод непрямого детектирования оптического излучения, индуцированного при неупругом туннелировании электронов (НТЭ), основанный на анализе вольт-амперных характеристик туннельного контакта; метод СТМ-наноитографии, позволяющий создавать и исследовать гибридные Si/Au наноантенны с контролируемыми размерами (минимальный радиус порядка 30 нм), а также метод создания твердотельных нанопоровых мембран, декорированных оптическими наноантеннами.

показаны возможности: увеличения более, чем на порядок, внешней квантовой эффективности процесса излучения света при НТЭ при введении оптических наноантенн в туннельный зазор; создания наноразмерного электроуправляемого источника излучения, интегрированного в полупроводниковый нановолновод на основе нитевидных нанокристаллов GaP:Be; управления ионным транспортом через нанопористые мембраны с помощью внешнего электрического поля.

выявлено излучение при НТЭ на различных длинах волн от массивов золотых полусфер диаметром 500 нм, период 1,5 мкм, полученных методом фемтосекундной лазерной печати, а также изменение селективных свойств нанопористой мембраны при нанесении углеродного покрытия методом газофазного осаждения материала.

подтверждена возможность создания наноразмерных электроуправляемых источников оптического излучения на основе эффекта НТЭ с использованием различных типов наноантенн (золотые нанодиски, гибридные Si/Au наноантенны, массивы наносфер), работающих в видимом и ближнем ИК-диапазонах, а также возможность контроля ионного транспорта через единичную твердотельную нанопору с помощью оптического излучения.

определено влияние характеристик наноантенны на эффективность излучения света из туннельного контакта; а также влияние спектра оптического излучения на ионную проводимость одиночных нанопор в SiNx мембранах.

предложены метод создания наноразмерного источника оптического излучения, интегрированного непосредственно в полупроводниковый волновод на основе нитевидных нанокристаллов GaP:Be, а также метод существенного (более чем на 3 порядка) снижения требуемой интенсивности внешнего оптического излучения широкого спектра (в сравнении с опубликованными данными при использовании лазерного излучения) для управления ионной проводимостью нанопор.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

На основе предложенного метода визуализации локальной плотности излучательных оптических состояний поверхности с субволновым пространственным разрешением **расширены** фундаментальные представления о пространственном распределении оптических мод в наноантеннах различной геометрии. Разработанные подходы к управлению ионным транспортом в нанопорах с помощью внешних электрического и оптического полей **позволили** улучшить понимание физических механизмов (фотоиндуцированное изменение поверхностного заряда, переключение селективности за счёт поляризации), лежащих в основе транспорта заряда в наноразмерных системах;

выдвинута и **подтверждена** гипотеза о возможности создания наноразмерного источника оптического излучения, интегрированного в полупроводниковый нановолновод, что вносит вклад в теоретические основы нанофотоники и интегральной оптоэлектроники;

разработан подход к управлению ионным транспортом через единичную твердотельную нанопору с помощью оптического излучения, при этом **установлено**, что доминирующим механизмом является фотоиндуцированное изменение поверхностного заряда стенок поры.

Обоснованно **отвергнута** гипотеза о значимости локального нагрева, как основного механизма ионного транспорта.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. Реализована методика непрямого детектирования оптического излучения, индуцированного неупругим туннелированием электронов, с помощью регистрации и анализа вольт-амперных характеристик туннельного контакта.

Практическое применение: разработанный подход может быть использован при создании компонентов интегральной фотоники и оптоэлектронных схем, а также для экспресс-диагностики работоспособности наноразмерных источников излучения без оптической системы сбора сигнала.

Преимущество: метод позволяет исследовать генерацию фотонов и пространственное распределение локальной плотности излучательных оптических состояний без прямого детектирования излучения, что существенно упрощает экспериментальную схему.

2. Разработана методика СТМ-нанолитографии, с помощью которой созданы гибридные Si/Au наноантенны. Показано, что полученные структуры могут эффективно генерировать оптическое излучение при контакте с СТМ-зондом в двух режимах: при низких напряжениях смещения (менее 3 В) — за счёт эффекта НТЭ, а при высоких (более 3 В) — за счёт электролюминесценции наноструктурированного кремния.

Практическое применение: методика позволяет в едином вакуумном цикле формировать наноструктуры заданной геометрии и непосредственно исследовать их электрофизические и оптические свойства, что особенно ценно при создании новых материалов и архитектур для оптоэлектроники.

Преимущество: исключается необходимость в отдельных технологических этапах литографии и последующей характеризации на другом оборудовании; появляется возможность работы с материалами КМОП-технологии (кремний, золото).

3. Реализован наноразмерный электроуправляемый источник оптического излучения, интегрированный в полупроводниковый волновод на основе нитевидных нанокристаллов GaP:Be с гексагональными вюрцитными вставками GaP.

Практическое применение: предложенное техническое решение позволяет решить ключевую проблему эффективного ввода излучения от наноисточника в

волноводную структуру без дополнительных элементов связи (дифракционных решёток, сужающихся переходов), что важно для создания фотонных и оптоэлектронных интегральных схем.

Преимущество: использование стандартных полупроводниковых материалов и методов молекулярно-пучковой эпитаксии обеспечивает совместимость с существующей технологической базой производства чипов.

4. Реализован способ управления ионным транспортом в нанопористых мембранах с проводящим углеродным покрытием (C-Nafen) с помощью приложения внешнего электрического поля.

Практическое применение: разработанные мембраны могут быть использованы в системах управляемой нанофильтрации, переключаемых ионообменных процессах, а также в микрофлюидных устройствах для дозирования реагентов.

Преимущество: одна и та же мембрана может обратимо менять свои селективные свойства от катион-селективных до анион-селективных при изменении внешнего поляризирующего потенциала, что позволяет управлять её характеристиками без замены самого элемента.

5. Реализован способ управления транспортом ионов через единичную твердотельную нанопору (мембрана SiNx, диаметр 5 нм, длина 40 нм) с помощью оптического излучения широкого спектрального диапазона (галогенная лампа, 400–1000 нм) при рекордно низкой интенсивности 35 мВт/см².

Практическое применение: способ перспективен для создания нанопоровых биосенсоров, где требуется контролируемое воздействие на молекулу аналита без её разрушения или нагрева.

Преимущество: управление ионным транспортом с помощью широкополосного излучения позволяет минимизировать воздействие на биологические объекты.

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть востребованы в научных и образовательных организациях, занимающихся разработкой и производством устройств нанопотоники, биосенсоров и исследованием наноразмерных структур, таких как:

1. Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург);

2. Санкт-Петербургский государственный университет (г. Санкт-Петербург);
3. Институт биоорганической химии им. Академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН (г. Москва);
4. Институт аналитического приборостроения РАН (г. Санкт-Петербург);
5. Научно-производственная компания СИНТОЛ (г. Москва);
6. Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого (г. Санкт-Петербург);
7. АО «Светлана-Электронприбор» (г. Санкт-Петербург);
8. ООО «Троицкий инженерный центр» (г. Москва, г. Троицк);
9. Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» (г. Санкт-Петербург).

Оценка достоверности результатов:

Достоверность результатов исследования обеспечивается корректным выбором методик измерения и процедур анализа экспериментальных данных, а также применением современных взаимодополняющих методов диагностики и создания объектов исследования, включающих сканирующую туннельную микроскопию и спектроскопию, растровую и просвечивающую электронную микроскопию, оптическую и электронную литографию, методы оптической спектроскопии (темнопольная спектроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния, ИК-Фурье спектроскопия) и электрохимические методы анализа (потенциометрия, циклическая вольтамперометрия, хроноамперометрия). Научные положения и выводы базируются на результатах, полученных с использованием широко применяемых и верифицированных программных пакетов для численного моделирования (COMSOL Multiphysics). Экспериментальные данные характеризуются высокой воспроизводимостью и хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов, а также с данными других исследователей в тех случаях, когда такое сравнение возможно. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с применением статистических методов, что обеспечивает их обоснованность и надежность.

Результаты работы прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях, в частности докладывались на таких конференциях как:

- Ежегодный международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» (Нижний Новгород, 2022, 2023, 2024, 2025 гг.);
- Всероссийская конференция «Особенности применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах» (Черноголовка, 2020, 2022, 2023, 2025 гг.);
- International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'24) (Владивосток, 2024 г.);
- Ежегодная всероссийская молодежная конференция «Методы и приборы для анализа биологических проб» АналитБиоПрибор (Санкт-Петербург, 2023-2024 гг.);
- XVI Российская конференция по физике полупроводников (РКФП-XVI) (Санкт-Петербург, 2024 г.);
- Международная научная конференция «Мембраны» (2016, 2019, 2022 гг.);
- Международная конференция «Ионный перенос в органических и неорганических мембранах» (Сочи, 2016, 2017, 2019, 2021, 2023 гг.);
- The international conference membrane and electromembrane processes MELPRO (Прага, Чехия, 2020 г.);
- Всероссийская конференция по электрохимии с международным участием «Электрохимия» (Москва, 2023 г.);
- IX всероссийская конференция по электрохимическим методам анализа с международным участием и молодежной научной школой «ЭМА 2016» (Свердловская область, 2016 г.).

Личный вклад соискателя состоит в определяющем участии на всех этапах работы: от постановки задач и разработки экспериментальных установок до проведения измерений, обработки и интерпретации результатов. Соискателем лично или под его руководством выполнены все СТМ- и СТМ-Л исследования. Им разработана концепция создания твердотельных образцов, проведена обработка и

интерпретация экспериментальных данных. Автором обнаружены и объяснены основные физические эффекты, описанные в диссертации, а также внесен ключевой вклад в оформление результатов в виде научных статей.

На заседании 08 апреля 2026 года Диссертационный совет принял решение присудить **Лебедеву Денису Владимировичу** ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 16 докторов наук, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета
д.т.н., профессор

В.Е. Курочкин

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н.

А.Л. Буляница

Дата оформления заключения

08 апреля 2026 г.

М.П.

