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 КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «12» ноября 2025 г. № 14

о присуждении Ваулину Никите Васильевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование ионного и молекулярного транспорта в биосенсорах на основе твердотельных нанопор из нитрида кремния» по специальности 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 14.07.2025 г., протокол №10, 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: Ваулин Никита Васильевич, 1997 года рождения, в 2021 г. окончил «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» по специальности/направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника». Диплом магистра № 107824 4758522, выдан 28.06.2021.

Ваулин Никита Васильевич обучался в аспирантуре с 01.09.2021 по 31.08.2025 в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» (СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова) по специальности 1.3.11 (01.04.10) Физика полупроводников.

С 2021 года по настоящее время Ваулин Никита Васильевич работает лаборантом в лаборатории возобновляемых источников энергии СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова.

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

Научный руководитель: Лебедев Денис Владимирович, кандидат физико-математических наук, в настоящее время старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова.

Официальные оппоненты:

Соколовский Григорий Семенович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией интегральной оптики на гетероструктурах Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе представил на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. В работе недостаточно обсуждается проблема локального нагрева – автор признает риск перегрева мембраны при лазерном воздействии, что может исказить результаты, однако геометрия эксперимента не обеспечивала одновременное измерение температуры термопарой и проведение электрохимических измерений. Косвенное измерение температуры по сдвигу рамановского спектра одиночной Si наночастицы проводилось до облучения мембраны излучением, а также после облучения области частицы сфокусированным лазерным излучением. Учитывая микроскопические размеры нагреваемой области и, соответственно, быстрый (за доли миллисекунд) отвод тепла в раствор, эти измерения необходимо было проводить одновременно. В любом случае, в работе не приведены результаты измерений температуры, хотя и приведена фотография экспериментальной установки.
2. В работе уделено немало внимания обсуждению более эффективного воздействия широкополосного облучения по сравнению со сфокусированным лазерным при разнице в плотности мощности на 5-6 порядков. Однако было бы уместно исследовать этот контр-интуитивный эффект еще более подробно. В частности, помимо подробно обсужденного в

работе влияния облучения на поверхностный заряд SiN_x нанопор, свой вклад могли внести утечки при облучении галогенной лампой, засвечивающей весь образец, а не фокусное пятно диаметром 10 мкм, как при лазерном облучении. Последнее, в свою очередь, могло оказать дополнительное влияние за счет давления света как на исследуемые частицы, так и на тонкую мембрану.

3. В работе присутствует немалое количество опечаток, большинство из которых можно объяснить невнимательностью автора. Однако неоднократное употребление словосочетания «в течении» по отношению ко времени, по-видимому, требует внимания научного руководителя.

Ермакова Людмила Эдуардовна, доктор химических наук, профессор кафедры коллоидной химии института химии Санкт-Петербургского государственного университета представила на диссертацию и автореферат **положительный отзыв**, в котором содержатся следующие замечания:

1. Несколько странными выглядят словосочетания типа «одиночные наноразмерные поры в тонких непроницаемых мембранах». Понятно, что речь идет о нанопоре в твердом непроницаемом материале, а материал даже с одной порой – вполне проницаемая мембрана, по крайней мере, в физико-химическом смысле.
2. Постоянно встречаются словосочетания типа «буферный раствор электролита, даже тогда, когда речь идет об использованных в работе водных или спирто-водных растворах KCl (буферные растворы, о которых реально идет речь при исследованиях фиксации макромолекул, конечно, тоже электролиты). Почему все-таки для проведения измерений выбран именно хлорид калия, поскольку обычно для измерений хоть как-то связанных с биологическими объектами, используют хлорид натрия. Чем обусловлен выбор изопропанола как одного из компонентов спирто-водной смеси? Про воду написано ее удельное сопротивление (18 МОм×см), которое обычно пишут в паспорте производящей эту воду установки, а реальную – на момент приготовления растворов и промывки ячеек и пор – удельную электропроводность этой воды измеряли? И проводили ли измерения pH использованных жидких сред?

3. Так ли необходимо все сушить воздухом? И как проверялась его чистота? (Из опыта собственных экспериментов – полностью гидрофильная поверхность кварцевого стекла, мытая серной кислотой, кипящей сместью аммиака и перекиси водорода, бидистиллятом при кипячении после 20 минут на воздухе становится частично несмачиваемой).
4. Несколько странно выглядит уравнение (4) – активность компонента равна его мольной доле? На этой же странице – «валентность раствора» – валентность (а лучше заряд) есть только у ионов, а про электролиты иногда пишут z-z – электролит, то есть симметричный. А для описания потоков при нескольких действующих силах используют уравнения неравновесной термодинамики.
5. Уравнение (6), действительно, можно писать только в том случае, когда удельная электропроводность порового и свободного раствора одинаковы. Но дело не в том, что «влиянием заряда поверхности мембраны (стенок поры), можно пренебречь». При 0.1 М концентрации 1:1- зарядного электролита толщина ДЭС при 20 ^{o}C составляет ~ 1 нм и для слабозаряженных систем (практически все, кроме ионитов) при C ≥ 0.1 М можно пренебречь влиянием ионов ДЭС на электропроводность порового раствора. И еще – в уравнении (6) 2-е слагаемое в скобках, относящееся к сопротивлению на входе и выходе равно 1/d, а в уравнении (8) R_{access} = r/2d. Далее на стр. 26 – «…формуле (6), поскольку в ней не учитывается поверхностный заряд стенок поры» – снова дело не только и не столько в заряде стенок, а, в первую очередь, в количестве и подвижности противоионов в порах, которая может быть настолько снижена для специфически сорбирующихся ионов, что электропроводность в поровом канале будет меньше, чем в свободном растворе.
6. Знак и величина поверхностного заряда на границе контакта твердого тела с раствором электролита определяется изоэлектрической точкой данного материала, и может регулироваться подбором уровня pH раствора» – абсолютно неверное утверждение (стр. 23). Знак и величина заряда на границе раздела определяются химическим составом контактирующих фаз, а изоэлектрическая точка – это такой состав электролита, при котором электрокинетический потенциал равен нулю – может наблюдаться при любом

заряде поверхности. Далее на стр. 23 – «слоем Стерна» – принятое написание слой Штерна. О каких изменениях конфигурации ДЭС идет речь (стр. 77)?

7. Не очень понятно, как «Транспорт молекул под действием градиента концентрации электролита (диффузионный механизм), подобно электроосмосу, формирует направленный поток ионов … (см. рисунок 10 – в.) [39]» (стр. 37) – о каких молекулах идет речь? На рис. 10 – в приведено нечто вроде начального состояния системы, состоящей из заряженного отрицательно канала, разделяющего растворы электролита разной концентрации. Преимущественный поток противоионов вызовет возникновение мембранного диффузионного потенциала, который будет тормозить противоионы и ускорять коионы. При разных концентрациях электролита по сторонам канала будет также наблюдаться осмос и электроосмос в поле мембранного потенциала, другое дело, что вклады этих потоков в реальных системах зависят от геометрии и состава жидкой фазы.
8. При какой температуре проводили измерения ионной проводимости? Табличное значение удельной электропроводности 0.5 М раствора KCl 5,12 См/м при 18 ^{o}C, температурный коэффициент изменения удельной электропроводности раствора (у автора 7 См/м)?
9. Необходимы пояснения к уравнениям (20,21). Если L – длина, на входе z = 0, а выходе z = 1, то как становится безразмерной Lz? Если $c_{\pm}$ – концентрации ионов, а C_0 – концентрация электролита (см. стр. 24), то как стала безразмерной $C_{\pm} = C_0 c_{\pm}$ и т.д. Уравнения (27,28) – одинаковость с на входе и выходе – эти с внутри канала или снаружи? При прохождении тока, если канал меняет числа переноса ионов (а в разбавленных растворах для нанопор это точно наблюдается), то происходят изменения концентрации в объемном растворе в областях, прилегающих ко входу и к выходу из канала.
10. Автор пишет, что «медленный рост температуры раствора под действием излучения позволяет предположить, что значительный вклад в наблюдаемый рост уровня удельной проводимости поры вносит эффект фотовозбуждения дополнительного поверхностного заряда на стенках нанопоры», не делая реальной оценки роста проводимости просто за счет увеличения температуры и не приводя соображений о том, за счет каких групп происходит появление

дополнительного заряда. Касаясь «химической» природы поверхностного заряда для исследованных нанопор, автор упоминает поверхностные состояния, соответствующие «оборванным состояниям Si», и состояния «связанные с N центрами», как влияет соотношение этих состояний на поверхности на абсолютную величину поверхностного заряда не обсуждается.

11. Для оксида алюминия известно, что заряд поверхности (для чистой поверхности) вплоть до pH 8-8.5 в растворах KCl положительный, нанесение углерода на поверхность, может, по-видимому, снижать величину заряда, возможно, вплоть до перемены знака, но для таких образцов особенно важна величина pH контактирующего с поверхностью электролита. Все эти подробности автор при анализе вольт-амперных кривых не обсуждает.
12. Про белковую молекулу нельзя писать, что она обладает «отрицательным поверхностным зарядом», поскольку при исследованиях границ раздела фаз термин поверхность относят к частицам, являющимся минимально возможным по объему коллективом молекул, могущим находиться в равновесии с окружающей средой, поэтому обычно пишут молекула отрицательно заряжена.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" в своем **положительном заключении**, утвержденном первым проректором – проректором по научной деятельности, заведующим кафедрой общей физики, доктором физико-математических наук, профессором Таюрским Дмитрием Альбертовичем, подписанном Юсуповым Романом Валерьевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии института физики и Харинцевым Сергеем Сергеевичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой оптики и нанофотоники института физики указала, что диссертация Ваулина Н.В. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а соискатель заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2, и отметила следующие замечания:

1. Насколько правомерным, по мнению автора, является применение такой макроскопической характеристики, как «удельная проводимость», к порам диаметром в единицы нанометров с очевидно неоднородными свойствами по сечению поры?
2. В главе 1 диссертации (литературном обзоре), на наш взгляд, не хватает описания энергетической структуры тонких пленок SiN_x, в частности, ширины запрещенной зоны. Вопрос связан с эффективностью поглощения материалом мембраны света, стимулирующего ионный транспорт, с задействованными длинами волн.
3. Из текста диссертации неясно, проводят ли электрический ток сплошные, номинально свободные от пор, мембраны, и каковы величины этих «токов утечки» по сравнению с характерными для проводимых экспериментов токами в 1 нА.
4. На стр. 83 и 94 приводятся значения параметров k и d модели, описывающей зависимость проводимости поры от концентрации буферного раствора KCl, но не приводятся погрешности определения этих величин.
5. Несколько удивительно, что автор ограничивает спектр излучения галогеновой лампы диапазоном 400 – 1000 нм, в то время как известно, что основная часть спектра тепловых источников излучения приходится на инфракрасную область.
6. В защищаемом положении 1 почему-то не упоминается плазмонный резонанс золотой антенны-бабочки на длине волны ~ 1430 нм, хотя упоминается в тексте на стр. 89 и является наиболее сильным на рис. 29(а).
7. В обзоре (стр. 27), на наш взгляд, используется неудачный перевод с английского «ion current rectification» как «ионное выпрямление тока», в то время как корректным будет «выпрямление ионного тока».

Соискатель имеет **18 (восемнадцать)** опубликованных работ, индексируемых в базах SCOPUS и Web of Science, из них по теме диссертации **11 (одиннадцать)**, в т.ч. из Перечня ВАК **5 (пять)**.

К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся 11 (одиннадцать) публикаций, опубликованных в журналах, состоящих в Перечне ВАК:

1. Lebedev D.V., **Vaulin N.V**., Afonicheva P.K., Vorobyov A.A., Mozharov A.M., Sharov V.A., Mikhailovskii V.Yu., Kirilenko D.A., Permyakov D.V., Logunov L.S., Ivanov Yu.D., Ryzhkov I.I., Bukatin A.S., Evstrapov A.A., Makarov S.V., Mukhin I.S. Ultra-Low Intensity Light-Driven Ionic Conductivity through a Plasmonic Nanopore // ACS Applied Nano Materials, 2024. Vol. 7, № 14. P. 16172–16181.
2. **Vaulin, N. V.**, Afonicheva, P. K., Lebedev, D. V., Bukatin, A. S., Mukhin, I. S. Study of ion transport in single solid state nanopores formed by optical and ion lithography // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 2023. №1. P. 385.
3. **Ваулин Н.В**., Афоничева П.К., Лебедев Д.В., Букатин А.С., Мухин И.С., Евстрапов А.А. Исследование фотоиндуцированных процессов в единичных твердотельных нанопорах с интегрированными плазмонными структурами // Физика твердого тела, 2023. Т. 65, № 12. С. 2201–2204.
4. **Ваулин Н.В**., Афоничева П.К., Лебедев Д.В., Букатин А.С., Мухин И.С., Евстарпов А.А. Детектирование единичных биомолекул с помощью твердотельного нанопорового SiN/Si-сенсора // Физика и техника полупроводников, 2024. Т. 58, № 9. С. 471-473.
5. Афоничева П.К., **Ваулин Н.В**., Лебедев Д.В., Букатин А.С., Мухин И.С., Евстрапов А.А. Влияние оптического излучения различной длины волны на транспортные характеристики тонких SiN-мембран с интегрированными единичными нанопорами // Письма в Журнал технической физики, 2023. Т. 49, № 23. С. 35-37.
6. Kharchenko I.A., **Vaulin N.V**., Simunin M.M., Mareev S.A., Nemtsev I.V., Goltaev A.S., Lebedev D.V., Ryzhkov I.I. Enhancement of ionic conductivity in electrically conductive membranes by polarization effect // Electrochimica Acta, 2024. Vol. 506. P. 144994.
7. Афоничева П.К., **Ваулин Н.В**., Лебедев Д.В., Букатин А.С., Кириленко Д.А., Аблеев А.Н., Иванов Ю.Д., Мухин И.С., Евстрапов А.А. Электрохимическое

детектирование одиночных молекул ДНК с помощью твердотельной нанопоры // Научное приборостроение, 2024. Т. 34, № 4. С. 34-42.

8. Afonicheva, P. K., **Vaulin, N. V**., Lebedev, D. V., Bukatin, A. S., Mukhin, I. S., Evstrapov, A. A. Investigation of ion transport in solid-state nanopores upon optical radiation. // St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics, 2023. Vol. 63, № 1.1. P. 389–392.
9. Ivanov YU.D., Vinogradova A.V., Nevedrova E.D., Ableev A.N., Kozlov A.F., Shumov I.D., Ziborov V.S. Afonin O.N., **Vaulin N.V**., Lebedev D.V., Bukatin A.S., Afonicheva P.K., Mukhin I.S., Usanov S.A., Archakov A.I. Solid-State Nanopore-Based Nanosystem for Registration of Enzymatic Activity of a Single Molecule of Cytochrome P450 BM3 // International Journal of Molecular Sciences, 2024. Vol 25, № 19. P. 10864.
10. Ivanov YU.D., Ableev A.N., Shumov I.D., Ivanova I.A., **Vaulin N.V**., Lebedev D.V., Bukatin A.S., Mukhin I.S., Archakov A.I. Registration of Functioning of a Single Horseradish Peroxidase Macromolecule with a Solid-State Nanopore // International Journal of Molecular Sciences, Vol. 24, № 21. P. 15636.
11. Иванов Ю.Д., Аблеев А.Н., Шумянцева В.В., Жданов Д.Д., Покровская М.В., Александрова С.С., Иванова И.А., Виноградова А.В., Неведрова Е.Д., Зиборов В.С., **Ваулин Н.В**., Лебедев Д.В., Букатин А.С., Мухин И.С., Арчаков А.И. Регистрация активности единичных молекул аспарагиназы с помощью нанопорового детектора //Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика, 2024. № 1. С. 20-32.

На автореферат диссертации поступили следующие отзывы:

1) От кандидата технических наук, ведущего специалиста АО «Светлана-Электронприбор» (г. Санкт-Петербург) Смирнова Александра Дмитриевича.

Замечания:

1. На рисунке 1 используются термины «электронный луч» и «электронный пучок», необходимо выбрать что-то одно.
2. В тексте не приводится расшифровки аббревиатуры ВАХ.

2) **От кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника физического факультета Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург) Зуева Дмитрия Александровича.**

Замечания:

1) Каков размер формируемых плазмонных наноантенн-бабочек. На странице 10 говорится, что наноантенна представляет собой 2 треугольника длиной 200 нм. Относится ли данный размер ко всей антенне целиком или только к одному из треугольников.
2) В тексте автореферата говорится, что с помощью ПЭМа удается изготавливать поры заданного диаметра, однако диапазон возможных диаметров пор не приводится

3) **От кандидата химических наук, доцента кафедры физической химии факультета химии и высоких технологий ФГБОУ ВО «КубГУ» (г. Краснодар) Мареева Семёна Александровича**

Замечания:

1) Не раскрыты причины выбора водного раствора сильного электролита KCl для проведения экспериментов.
2) Всегда ли формируемые образцы нанопоры обладали круглой формой, то каким образом форма поры будет влиять на результаты эксперимента?

4) **От кандидата технических наук, доцента Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (г. Москва, г. Зеленоград) Симунина Михаила Максимовича**

Без замечаний

5) **От доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки**

«Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (г. Казань) Бухараева Анастаса Ахметовича

Замечания:

1) В тексте автореферата желательно приводить ссылки на публикации по теме диссертации. Для этого ввести для них отдельную нумерацию в виде [А1], [А2] и так далее. Это позволило бы легче понять, где какой результат опубликован.
2) На рисунках (за исключением рис.10), иллюстрирующих схему эксперимента по измерению характеристик одиночной молекулы белка, отсутствует изображение фиксации молекулы в нанопоре.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их большим опытом работы в областях физики полупроводниковых наноструктур, химии нанообъектов и электрохимии, исследования методов синтеза твердотельных наноразмерных объектов, проведения электрических измерений, разработки материалов и приборов электронной техники и фотоники, что подтверждается публикациями, в которых рассматриваются вопросы, связанные с тематикой диссертационного исследования соискателя.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

описаны методы формирования сплошных свободноподвешенных SiN_x мембран толщиной от 25 до 200 нм, а также наноразмерных Au плазмонных антенн-бабочек размерами ≤ 600 нм на их поверхности, включающие в себя оптическую и электронную литографии в сочетании с многоступенчатым жидкостным и плазмохимическим травлением;

показана возможность формирования одиночных наноразмерных пор диаметром 5 – 10 нм в SiN_x мембранах методом травления сфокусированным электронным лучом;

путем численного моделирования и экспериментальных измерений спектров рассеяния сформированных антенн **выявлено** наличие локализованных плазмонных мод на длинах волн λ = 773 и λ = 657 нм;

подтверждена возможность оптического управления ионной проводимостью одиночных SiN_x нанопор при помощи сфокусированного лазерного излучения λ = 632 нм;

проведены исследования влияния спектра оптического излучения на ионную проводимость SiN_x нанопор, в результате чего **выявлен** рост удельной проводимости плазмонных SiN_x нанопор на 35% при их облучении широкополосным излучением λ = 400 - 1000 нм;

предложен метод электрохимического детектирования и фиксации одиночных молекул в SiN_x нанопорах с диаметром 8-10 нм, а также экспериментально подтверждена его эффективность при удерживании молекулы 20S протеасом в области поры под действием приложенного электрического поля.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

предложен метод оптического управления ионной проводимостью одиночных SiN_x нанопор с помощью несфокусированного излучения галогенной лампы $P_{опт}$ = 35 мВт/см^2, в водных растворах KCl, позволяющий значительно (более, чем на 2 порядка) снизить мощность внешнего оптического излучения по сравнению с существующими подходами, использующими сфокусированное лазерное излучение;

подтверждена выдвинутая в ходе работы гипотеза о влиянии падающего излучения на ионную проводимость SiN_x нанопор за счет фотовозбуждения поверхностных состояний, приводящего к изменению поверхностного заряда стенок поры и изменению концентрации носителей заряда в её внутреннем объеме;

разработан метод удерживания одиночных молекул 20S протеасом в области SiN_x нанопор, что открывает возможности по исследованию функциональной активности зафиксированных белков в реальном времени без необходимости их

физической и химической модификации или использования флуоресцентных меток.

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

1. Апробирован метод формирования свободноподвешенных SiN_x мембран толщиной 25-200 нм, наноразмерных плазмонных Au антенн на их поверхности, а также одиночных наноразмерных пор диаметрами 5-10 нм в SiN_x мембранах и подтверждена его эффективность.

Практическое применение: одиночные SiN_x нанопоры с плазмонными антеннами могут быть использованы при создании сенсоров для детектирования и анализа одиночных биологических молекул и разработке методов оптического управления ионным и молекулярным транспортом в нанопорах, для применения в областях молекулярной биологии и медицины.

Преимущество: получаемые нанопоровые структуры обладают размерами достаточными для детектирования одиночных биологических молекул, а также устойчивостью к агрессивным средам и внешним воздействиям. Интегрированные плазмонные антенны позволяют эффективно применять внешнее оптическое воздействие для управления свойствами нанопоровых структур.

2. Разработаны и изготовлены измерительные ячейки, позволяющие проводить электрохимические измерения ионной проводимости нанопоровых структур, эксперименты по оптическому управлению ионной проводимостью, а также эксперименты по фиксации одиночных белковых молекул в области SiN_x нанопор.

Практическое применение: Использование ионного транспорта в одиночных нанопорах и пористых мембранах и методов оптического управления ионным и молекулярным транспортом в нанопоровых структурах.

Преимущество: Примененные решения позволяют получать измерительные биосовместимые ячейки с оптическим доступом, а также обеспечивают герметичность системы и поддерживают чистоту используемых растворов электролитов для получения воспроизводимых экспериментальных результатов.

3. Разработан метод детектирования и фиксации одиночных белковых молекул в области SiN_x нанопор под действием приложенного электрического поля.

Практическое применение: метод может быть использован для исследования функциональной активности и конформационных изменений одиночных белковых молекул в реальном времени.

Преимущество: применяемый подход позволяет регистрировать сигнал одиночной белковой молекулы в течение длительного времени без необходимости её физической или химической модификации, а также без использования флуоресцентных меток.

Полученные в ходе выполнения работы результаты могут быть востребованы в научных и образовательных организациях, занимающихся разработкой и производством сенсоров биологических молекул и исследованием наноразмерных полупроводниковых структур, таких как:

1. Научно-исследовательский институт биомедицинской химии им. В.Н. Ореховича (г. Москва);
2. Институт биоорганической химии им. Академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН (г. Москва);
3. Институт аналитического приборостроения РАН (г. Санкт-Петербург);
4. Научно-производственная компания СИНТОЛ (г. Москва);
5. ООО «Нанопорус» (г. Серпухов);
6. АО «Светлана-Электронприбор» (г. Санкт-Петербург);
7. ООО «Троицкий инженерный центр» (г. Москва, г. Троицк).

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что научные положения, выводы и результаты, содержащиеся в диссертации, подтверждаются использованием признанных, апробированных и обоснованных физических методов, комплексным характером выполненных экспериментов и расчетов с использованием лицензионных программных пакетов, а также воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Достоверность экспериментальных данных обеспечена использованием метрологически

поверенного оборудования. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими оценками и результатами других исследователей в тех случаях, когда такое сравнение возможно.

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная конференция "ФизикА.СПб" 17–21 окт. 2022 (СПб, Россия);
2. I ежегодная всероссийская молодежная конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов «АналитБиоПрибор-2022» (СПб, Россия);
3. Всероссийская конференция по электрохимии с международным участием «ЭЛЕКТРОХИМИЯ-2023» 23-27 Октября 2023 (Москва, Россия);
4. Международная конференция "ФизикА.СПб" 23–27 окт. 2023 (СПб, Россия);
5. II ежегодная всероссийская молодежная конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов «АналитБиоПрибор-2023» (СПб, Россия);
6. Международная конференция "ФизикА.СПб" 21–25 окт. 2024 (СПб, Россия);
7. III ежегодная всероссийская молодежная конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов «АналитБиоПрибор-2024» (СПб, Россия).

Личный вклад соискателя:

- Анализ литературных источников по теме диссертации;
- Характеризация и анализ свойств SiN_x мембран, одиночных SiN_x нанопор и пористых мембран;
- Подготовка и проведение электрохимических экспериментов по измерению ионного тока в одиночных нанопорах и пористых мембранах;
- Разработка и апробация методов управления транспортными характеристиками одиночных нанопор с помощью сфокусированного лазерного и широкополосного излучения;
- Разработка и апробация метода фиксации одиночных белковых молекул в области SiN_x нанопоры;
- Обработка и анализ полученных данных;

- Подготовка научных публикаций по тематике исследования совместно с соавторами;
- Представление результатов работы на конференциях.

На заседании 12 ноября 2025 года Диссертационный совет принял решение присудить **Ваулину Никите Васильевичу** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **17** человек, из них **17** докторов наук, участвовавших в заседании, из **21** человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за – **17**, 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
12 ноября 2025 г.
М.П.