194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А
Телефон (факс): (812) 297-2145
www.spbau.ru
ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879
ИНН КПП 7804161723 780401001

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова

д.ф.-м.н., проф.

Мухин И.С.

«22» 12 2025

м.п.

Заключение организации, в которой выполнена работа

федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» о диссертационной работе

Ваулина Никиты Васильевича «Исследование ионного и молекулярного транспорта в биосенсорах на основе твердотельных нанопор из нитрида кремния»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики» (ранее 01.04.01)

Диссертация «Исследование ионного и молекулярного транспорта в биосенсорах на основе твердотельных нанопор из нитрида кремния», выполненная в лаборатории Возобновляемых источников энергии федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Ваулин Никита Васильевич работал в должности лаборанта в лаборатории Возобновляемых источников энергии федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-

Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук».

В 2021 г. Ваулин Н.В. защитил квалификационную работу на соискание степени магистра по направлению подготовки 11.04.04 «ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА», и получил диплом магистра Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж.И. Алферова Российской академии наук.

По результатам рассмотрения диссертации «Исследование ионного и молекулярного транспорта в биосенсорах на основе твердотельных нанопор из нитрида кремния» принято следующее заключение:

1. Актуальность диссертационной работы.

Работа Ваулина Н.В. посвящена изготовлению одиночных нанопор в тонких свободноподвешенных SiN_x мембранах, модифицированных плазмонными Au антеннами, а также исследованию ионного и молекулярного транспорта в биосенсорах на основе одиночных SiN_x нанопор.

На сегодняшний день, в мире существует потребность в развитии высокоточных методов исследования биологических молекул, разработке новых видов биологических сенсоров, а также совершенствовании инструментов генетического анализа. Технологии point-of-care диагностики, методы АСМ и SERS, а также микроэлектродные тест системы активно применяются для селективного детектирования и исследования малых концентраций биологических молекул. Однако, данные технологии и методы характеризуются как недостатком чувствительности для реализации детектирования одиночных молекул, так и сложностью измерительной системы и высокой трудоемкостью проведения экспериментов. Биологические сенсоры на основе одиночных наноразмерных пор (нанопор), в тонких непроницаемых мембранах, являются перспективной платформой, объединяющей высокую чувствительность для реализации принципа одномолекулярного детектирования, а также возможность проведения исследований широкого класса биологических соединений без их предварительной модификации.

Общий принцип детектирования в одиночных нанопорах заключается в транспорте через их внутренний объем молекул исследуемого вещества под действием внешних сил. При прохождении через нанопору, молекула модулирует нанопоровый ионный ток, вызывая изменения регистрируемого электрического сигнала (сигнала транслокации). Амплитуда и продолжительность сигнала транслокации определяются размерами и физико-

химическими свойствами детектируемой молекулы, что позволяет не только обнаруживать, но и исследовать свойства проходящих через нанопору одиночных молекул.

Разделяясь на биологические и твердотельные, нанопоровые сенсоры представлены большим количеством материалов мембран, способов формирования пор и методов исследования молекулярных соединений. Биологические поры представлены классом порообразующих белков, встраиваемых в липидные мембраны. Благодаря низкому уровню электрических шумов, малому диаметру канала поры и возможностью интеграции с моторными белками, биологические поры характеризуются высокими сенсорными свойствами и активно применяются для секвенирования ДНК. Тем не менее, биологические поры обладают рядом недостатков, включая сложность модификации структуры поры, короткий срок службы и низкую эффективность в приложениях исследования крупных биологических молекул.

Твердотельные нанопоры, представляющие собой наноразмерные отверстия в тонких диэлектрических мембранах, являются перспективным направлением развития нанопоровых сенсоров. Преимуществами твердотельных пор перед биологическими аналогами является высокая стойкость к внешним воздействиям, широкие возможности формирования мембран и пор с заданными размерами и свойствами поверхности, а также возможность модификации пор различными наноразмерными объектами для улучшения их сенсорных свойств. Наиболее распространенными материалами твердотельных мембран являются аморфные пленки SiN_x, использующиеся и в данной работе, кремниевые композитные мембраны (Si/TiO_2, Si/HfO_2), а также двумерные мембраны (графен, $MoS2$) и пористые мембраны (Al_2O_3). К недостаткам твердотельных пор относятся низкое по сравнению с биологическими аналогами пространственное разрешение детектирования, высокий уровень электрических шумов и высокая скорость транслокации молекул через внутренний объем поры.

Твердотельные нанопоры активно используются для безметочного детектирования одиночных объектов и молекул, а также для исследований динамики транслокаций крупных биологических соединений (белков). Активно развивающимися направлениями применения являются: изучение специфических механизмов связывания; моделирование трансмембранного транспорта; преобразование энергии; использование в качестве ионных диодов.

Существует несколько направлений работ по улучшению сенсорных свойств твердотельных нанопоровых сенсоров. В первую очередь это оптимизация толщины мембраны и диаметра поры для наилучшего соответствия целям применения. Далее следуют варианты реализации управляемого ионного и молекулярного транспорта в

нанопорах с помощью внешних воздействий (например, оптического излучения) или функционализации поры поверхностно активными веществами. Наконец, улучшения сенсорных свойств можно добиться путем модификации области поры наноразмерными объектами (плазмонными антеннами), способными улучшать ее транспортные свойства.

Исходя из того, работы по реализации управляемого ионного транспорта в твердотельных порах, а также работы по интеграции нанопор с другими наноразмерными структурами крайне важны для повышения эффективности работы нанопоровых сенсоров. Поиск и развитие новых вариантов применения твердотельных нанопор также является перспективным направлением работ в области нанопоровых технологий. Относительная простота формирования твердотельных пор с требуемыми характеристиками открывает широкие перспективы в областях исследования свойств белковых соединений и их функциональной динамики, без необходимости предварительной модификации таких структур.

Таким образом, исследования методов управления ионным транспортом в одиночных плазмонных SiN_x нанопорах, а также разработка методов фиксации белковых молекул в области нанопоры, являются **актуальными** направлениями научно-исследовательской деятельности.

Целью диссертации является исследование методов оптического управления ионной проводимостью твердотельных нанопор при создании сенсора для регистрации одиночных молекул белков.

Для достижения данной цели в рамках диссертации были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Отработка методики изготовления тонких свободноподвешенных SiN_x мембран, толщиной 25-200 нм, с интегрированными одиночными нанопорами и плазмонными оптическими Au антеннами-бабочками.

2. Исследование влияния лазерного излучения λ = 632 нм мощностью $P_{опт}$ = 10 кВт/см^2 на ионную проводимость одиночных SiN_x нанопор и одиночных SiN_x нанопор с плазмонными Au оптическими антеннами в растворе KCl.

3. Исследование метода управления ионной проводимостью одиночных SiN_x нанопор с плазмонными Au оптическими антеннами при помощи широкополосного λ = 400-1000 нм излучения низкой интенсивности $P_{опт}$ = 35 мВт/см^2 в растворе KCl.

4. Определение диапазона применимости метода управления ионной проводимостью одиночных SiN_x нанопор путем изучения влияния оптического излучения на KCl ионный транспорт, объемный нагрев электролита и локальный нагрев в области нанопоры.

5. Исследование способа фиксации одиночных молекул белков в области SiN_x нанопоры для возможности дальнейшего изучения функциональной активности белков в реальном времени с помощью нанопорового биосенсора.

6. Апробация способа фиксации одиночных молекул белков 20S-протеасомы длиной 15 нм и диаметром 11,5 нм в одиночных SiN_x нанопорах под действием приложенного электрического поля.

2. Научная новизна работы заключается в следующих пунктах:

1. Впервые разработан метод оптического управления ионной проводимостью одиночных SiN_x нанопор и одиночных SiN_x нанопор с плазмонными Au оптическими антеннами в растворе KCl при помощи широкополосного λ = 400 - 1000 нм излучения галогенной лампы $P_{опт}$ = 35 мВт·см$^{-2}$. Метод впервые позволил снизить плотность мощности внешнего оптического излучения для управления ионным транспортом SiN_x нанопор по сравнению с существующими методами воздействия сфокусированным лазерным излучением.

2. Впервые экспериментально продемонстрировано влияние спектрального состава оптического излучения (широкополосное и лазерное излучение) на ионную проводимость одиночных SiN_x нанопор в растворе KCl. Эффект фотовозбуждения поверхностных состояний в аморфных SiN_x мембранах толщиной 30-40 нм, излучением λ = 400-1000 нм, приводит к изменению величины поверхностного заряда на стенках нанопоры и изменению концентрации ионов в её внутреннем объеме.

3. Разработан метод фиксации одиночных белковых молекул в области одиночной SiN_x нанопоры под действием приложенного электрического поля. Впервые продемонстрирована возможность фиксации одиночных молекул 20S-протеасомы под действием приложенного электрического поля.

3. Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработан метод формирования свободноподвешенных SiN_x мембран толщиной 25-200 нм, метод формирования одиночных нанопор заданного диаметра в SiN_x мембранах с помощью литографии сфокусированным электронным пучком, а также метод формирования Au плазмонных антенн-бабочек с размерами $\leq$ 600 нм на поверхности свободно подвешенных SiN_x мембран. Комплекс апробированных методов позволяет формировать устойчивые к агрессивным средам и механическим воздействиям одиночные SiN_x нанопоры и одиночные SiN_x нанопоры с плазмонными Au оптическими антеннами для применения в нанопоровых сенсорах.

2. Разработаны и изготовлены измерительные электрохимические ячейки оригинальной конструкции, обеспечивающие возможность проведения экспериментов по оптическому управлению ионной проводимостью одиночных SiN_x нанопор, а также фиксации одиночных молекул белков в области SiN_x нанопор.

3. Разработан метод фиксации одиночных молекул белков, позволяющий регистрировать молекулу белка в области одиночной SiN_x нанопоры под действием приложенного электрического поля для возможности исследования функциональной активности белковых соединений в реальном времени.

4. Личный вклад автора

Диссертация Вахлина Н.В. является самостоятельной и оригинальной научно-исследовательской работой, вклад автора диссертации в которую был определяющим. Личный вклад автора состоит в проведении исследований по характеризации и анализу свойств одиночных SiN_x нанопор, одиночных SiN_x нанопор с плазмонными Au антеннами-бабочками и пористых мембранах, в то числе в проведении экспериментов по исследованию ионного транспорта в данных структурах при различных концентрациях электролита. Автором были разработаны и апробированы методы управления транспортными характеристиками одиночных нанопор с помощью сфокусированного лазерного и широкополосного излучения. Автором был разработан метод фиксации одиночных белковых молекул в области нанопоры и проведена его апробация на примере молекул 20S-частиц протеасомы. Автором были проведены работы по подготовке, сборке и проведению представленных в работе электрохимических экспериментов, а также работы по обработке и анализу полученных данных. Автор также принимал участие в подготовке научных публикаций по результатам исследований и представлении результатов работы на международных и всероссийских конференциях.

5. Общая оценка диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, благодарностей, обозначений и сокращений, списка использованных источников. Во **введении** сформулированы актуальность, цели и задачи диссертационной работы, указывается научная новизна и практическая значимость выполненных в работе исследований. Формулируются положения, выносимые на защиту, а также приводится личный вклад автора, апробация результатов работы и научные результаты, опубликованные в ходе проведенных исследований. Во введении содержится информация структуре и объёме диссертационной работы.

Первая глава посвящена литературному обзору темы диссертационной работы.

Раздел 1.1 описывает этапы развития нанопорового детектирования, начиная с технологий микрофлюидики и появления концепта одномолекулярного детектирования в одиночной белковой нанопоре, заканчивая перспективами развития сенсоров на основе твердотельных нанопор.

Раздел 1.2 посвящен теоретическим основам ионного и молекулярного транспорта в одиночных нанопорах. Рассмотрены силы, действующие на молекулы в нанопорах, приведено описание строения двойного электрического слоя, возникающего на границе контакта твердого тела с раствором электролита, а также влияние данного слоя на характеристики одиночных нанопор.

Раздел 1.3 описывает основные механизмы молекулярного транспорта в твердотельных нанопорах, а также принципы транслокации и фиксации одиночных молекул в нанопоровых сенсорах. В разделе также представлены факторы, влияющие на эффективность детектирования одиночных молекул, включая физико-химические свойства белков и комплексных молекул на их основе.

Раздел 1.4 посвящен описанию основных видов твердотельных мембран, включая тонкие SiN_x пленки, кремниевые композитные мембраны, пористые и двумерные мембраны, а также описанию методов синтеза одиночных нанопор. В разделе рассматриваются методы нанопорового исследования биологических объектов. Отдельно рассматриваются перспективы развития и применения плазмонных нанопор.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методов, использующихся в диссертационной работе.

Раздел 2.1 подробно описывает процесс формирования тонких свободноподвешенных SiN_x мембран на Si/SiO_2 подложке, а также методику формирования одиночных нанопор заданного диаметра с помощью травления сфокусированным электронным лучом.

Раздел 2.2 посвящен описанию методики формирования Au плазмонных антенн-бабочек на поверхности свободноподвешенных SiN_x мембран, а также исследованию оптических резонансных свойств таких структур.

Раздел 2.3 описывает принципы конструкции, изготовления и сборки измерительных электрохимических ячеек, подробно рассматривая особенности геометрии и функционал ячеек для исследования ионного транспорта, ячеек для проведения экспериментов с оптическим излучением, а также ячеек для проведения экспериментов по детектированию и фиксации одиночных биологических молекул.

Раздел 2.4 представляет собой протоколы подготовки нанопоровых образцов и измерительных ячеек к проведению электрохимических измерений. В разделе также рассматривается метод проведения потенциостатических измерений, метод исследования влияния оптического излучения на проводимость одиночных SiN_X нанопор, метод детектирования и фиксации одиночных молекул в SiN_X нанопорах.

Третья глава посвящена экспериментальным результатам, полученным в ходе работ по теме диссертации.

Раздел 3.1 представляет результаты потенциостатических измерений уровня ионного тока в одиночных SiN_X и одиночных плазмонных SiN_X нанопорах диаметром 5 нм и длиной 40 нм, для различных прикладываемых напряжений и концентраций электролита KCl.

Раздел 3.2 посвящен управлению ионной проводимостью одиночных SiN_X нанопор с помощью сфокусированного лазерного излучения λ = 632 нм, мощностью 10 кВт/см^2. Облучение области нанопоры лазерным излучением через оптическое окно измерительной ячейки приводит к росту удельной проводимости на 6%.

Раздел 3.3 представляет результаты численного моделирования характеристик изготовленных плазмонных антенн-бабочек с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics, которые демонстрируют наличие локализованных плазмонных мод на длинах волн λ = 773 и λ = 657 нм.

Раздел 3.4 демонстрирует, что облучение одиночной плазмонной SiN_X нанопоры сфокусированным лазерным излучением приводит к росту удельной проводимости нанопоровой структуры на 10%. Усиление эффекта роста проводимости связано с возбуждением поверхностного плазмонного резонанса в антенне-бабочке.

Раздел 3.5 посвящена работе по управлению ионной проводимостью одиночных SiN_X нанопор с помощью широкополосного λ = 400-1000 нм излучения мощностью 35 мВт/см^2. Облучение широкополосным светом приводит к росту удельной проводимости поры на 21%. Такой подход позволяет более эффективно управлять нанопоровым ионным транспортом в сравнении с лазерным излучением за счет возбуждения локализованных поверхностных электронных состояний в запрещенной зоне SiN_X мембраны.

Раздел 3.6 демонстрирует, что облучение одиночной плазмонной SiN_X нанопоры широкополосным оптическим излучения приводит к росту удельной проводимости структуры на 35%. Вклад в увеличение удельной проводимости структуры вносит возбуждение плазмонных резонансов в антенне-бабочке.

Раздел 3.7 посвящена потенциостатическим исследованиям ионной проводимости пористых Al_2O_3 и C-Al_2O_3 мембран. Экспериментально продемонстрировано, что используемый в диссертационной работе способ проведения потенциостатических

измерений позволяет исследовать ионной транспорт пористых структур в широком диапазоне концентраций электролита KCl.

Раздел 3.8 посвящена разработке метода детектирования и фиксации одиночных биологических молекул в области одиночной SiN_x нанопоры под действием приложенного электрического поля. Апробация данного метода позволила фиксировать одиночные белковые молекулы 20S протеасом длиной 15 нм и диаметром 11,5 нм в нанопорах диаметром 8-10 нм.

Таким образом, структура и содержание работы свидетельствуют, что диссертация представляет собой завершенное научное исследование, в котором показана актуальность, новизна и перспективность применяемых подходов. Выводы и заключения обоснованы и имеют научную и практическую ценность для развития твердотельных нанопоровых биосенсоров.

Основные научные результаты опубликованы в 11 печатных трудах, из которых 5 входят в перечень журналов ВАК, 6 публикаций в международные реферативные базы данных.

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях:

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

7. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Основные научные результаты опубликованы в 11 печатных трудах, из которых 5 входят в перечень журналов ВАК, 6 публикаций — в международные реферативные базы данных:

1. Ultra-Low Intensity Light-Driven Ionic Conductivity through a Plasmonic Nanopore / D. V. Lebedev, N. V. Vaulin, P. K. Afonicheva [et al.] // ACS Applied Nano Materials. 2024. Vol. 7, No. 14. P. 16172-16181. DOI 10.1021/acsanm.4c02108.

В данной работе исследуется зависимость удельной проводимости одиночной SiN_x и плазмонной SiN_x нанопоры, от воздействия сфокусированного лазерного излучения λ = 632 нм мощностью 10 кВт/см^2, и широкополосного излучения λ = 400-1000 нм низкой интенсивности 35 мВт/см^2. Продемонстрировано что воздействие широкополосного излучения позволяет эффективнее управлять ионным транспортом одиночных нанопор по сравнению с лазерным излучением, за счет возбуждения большего числа локализованных поверхностных электронных состояний в запрещенной зоне SiN_x мембраны. Облучение плазмонной SiN_x нанопоры широкополосным излучением приводит к росту её удельной проводимости на 35%.

2. Enhancement of ionic conductivity in electrically conductive membranes by polarization effect / I. A. Kharchenko, N. V. Vaulin, M. M. Simunin [et al.] // Electrochimica Acta. 2024. Vol. 506. P. 144994. DOI 10.1016/j.electacta.2024.144994.

Данная работа посвящена исследованию ионного транспорта пористых Al_2O_3 и C/Al_2O_3 мембран. Продемонстрировано, что представленный в диссертационной работе метод проведения потенциостатических измерений обладает высокой точностью и позволяет исследовать свойства мембран, обладающих порами различного размера, в широком диапазоне концентраций буферного раствора электролита KCl.

3. Solid-State Nanopore-Based Nanosystem for Registration of Enzymatic Activity of a Single Molecule of Cytochrome P450 BM3 / Yu. D. Ivanov, A. V. Vinogradova, E. D. Nevedrova [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2024. Vol. 25, No. 19. – P. 10864. – DOI 10.3390/ijms251910864.

Данная работа демонстрирует пригодность представленного в диссертационной работе метода проведения потенциостатических измерений для детектирования одиночных молекул цитохрома P450 с помощью одиночных SiN_x нанопор.

4. Study of ion transport in single solid state nanopores formed by optical and ion lithography / N. V. Vaulin, P. K. Afonicheva, D. V. Lebedev [et al.] // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Vol. 16, No. S1.1. P. 385-388. DOI 10.18721/JPM.161.165.

В работе исследуется зависимость удельной проводимости одиночных SiN_x нанопор от концентрации буферного электролита KCl.

5. Registration of Functioning of a Single Horseradish Peroxidase Macromolecule with a Solid-State Nanopore / Yu. D. Ivanov, A. N. Ableev, I. D. Shumov [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24. No. 21. – P. 15636.

В данной работе был опробован метод фиксации одиночных молекул пероксидазы хрена в области SiN_x нанопор диаметром 5 нм под действием приложенного электрического поля.

6. Investigation of ion transport in solid-state nanopores upon optical radiation / P. K. Afonicheva, N. V. Vaulin, D. V. Lebedev [et al.] // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. – 2023. – Vol. 16, No. S1.1. – P. 389-392. – DOI 10.18721/JPM.161.166.

Работа посвящена отработке методики формирования плазмонных антенн-бабочек на поверхности SiN_x мембран толщиной ~300 нм и одиночных нанопор диаметром 30-50 нм при помощи травления сфокусированным ионным лучом. В работе также приведено исследование ионного транспорта таких структур и влияния на величину ионного тока лазерного излучения.

7. Исследование фотоиндуцированных процессов в единичных твердотельных нанопорах с интегрированными плазмонными структурами / П. В. Ваулин, П. К. Афоничева, Д. В. Лебедев [и др.] // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, № 12. – С. 2201-2204. – DOI 10.61011/FTT.2023.12.56760.5216k.

В работе проведено исследования влияние сфокусированного лазерного излучения λ = 632 нм на ионный транспорт в одиночных плазмонных SiN_x нанопорах диаметров 5 нм и длиной 25 нм и сплошных SiN_x мембранах без нанопор.

8. Влияние оптического излучения различной длины волны на транспортные характеристики тонких SiN-мембран с интегрированными единичными нанопорами / П. К. Афоничева, П. В. Ваулин, Д. В. Лебедев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2023. – Т. 49, № 23. – С. 35-37. – DOI 10.61011/PJTF.2023.23.56848.153A.

В работе исследуется влияние широкополосного оптического излучения различного спектрального диапазона на уровень ионного тока в одиночных SiN_x нанопорах диаметром 5 нм и длиной 40 нм.

9. Детектирование единичных биомолекул с помощью твердотельного нанопорового SiN/Si-сенсора / П. В. Ваулин, П. К. Афоничева, Д. В. Лебедев [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2024. Т. 58, № 9. С. 471-473. DOI 10.61011/FTP.2024.09.59303.6342A.

В данной работе исследуется метод фиксации одиночных молекул в области нанопоры на примере молекул 26S протеасомы, которые эффективно фиксировались в одиночных SiN_x нанопорах диаметром 8-10 нм под действием приложенного электрического поля.

10. Регистрация активности единичных молекул аспарагиназы с помощью нанопорового детектора / Ю. Д. Иванов, А. П. Аблеев, В. В. Шумянцева [и др.] // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. – 2024. – № 1. С. 20-32. DOI 10.18384/2949-5067-2024-1-20-32.

Работа посвящена регистрации активности одиночных молекул аспарагиназы, фиксированных в области SiN_x нанопоры под действием приложенного электрического поля.

11. Электрохимическое детектирование одиночных молекул ДНК с помощью твердотельной нанопоры / П. К. Афоничева, Н. В. Ваулин, Д. В. Лебедев [и др.] // Научное приборостроение. – 2024. – Т. 34, № 4. – С. 34-42.

В работе демонстрируется принцип одномолекулярного детектирования молекул ДНК различной длины, проходящих через одиночную SiN_x нанопору диаметров 5 нм под действием приложенного электрического поля.

Таким образом, диссертационная работа Ваулина П.В. на тему «Исследование ионного и молекулярного транспорта в биосенсорах на основе твердотельных нанопор из нитрида кремния», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой, представляющей научный и практический интерес. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация полностью отвечает паспорту специальности 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики», что полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание

ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор – Ваулин Никита Васильевич заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Диссертационная работа и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на научном семинаре центра нанотехнологий федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» (Протокол № 1 от 21 мая 2025 г.)

Заключение составил:
м.н.с. лаб. ВПГ
СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова
к.т.н.
Тел.: +7 (812) 247-44-64
e-mail: nikita.filatov@inbox.ru

Филатов Н.А.