

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

ИПМАШ 1.3.8.

по диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Аттестационное дело № 2
решение диссертационного совета
от «17» декабря 2025 г. № 4/25

О присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Фомину Максиму Андреевичу, представившему диссертационную работу на тему «Макроскопические квантовые явления в кремниевых наносандвич-структурах, содержащих олигонуклеотиды ДНК» по научной специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа принята к защите 30 сентября 2025 г. (протокол заседания № 3/25) диссертационным советом ИПМАШ 1.3.8.

Соискатель Фомин Максим Андреевич 1995 года рождения является гражданином Российской Федерации. В 2018 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» с присвоением квалификации магистр, направление подготовки 03.04.02 «Физика» (диплом серия 107824, номер 3452167).

В 2022 году окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский университет Петра Великого» (диплом серия 107824, номер 0091331).

Соискатель работает в должности младшего научного сотрудника в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН.

Диссертация выполнена на кафедре физики Физико-механического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук **Баграев Николай Таймуразович**, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории «Атомной радиоспектроскопии» Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН.

Официальные оппоненты:

- Доктор физико-математических наук **Буравлев Алексей Дмитриевич**, главный научный сотрудник лаборатории микро- и наноэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения Высшего Образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.
- Доктор физико-математических наук **Захаров Максим Анатольевич**, доцент, профессор кафедры физики твердого тела и микроэлектроники Политехнического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, в своем положительном отзыве, рассмотренном и утвержденном на основании обсуждения диссертации и автореферата на расширенном заседании кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников «Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» с приглашением сотрудников кафедры теоретической физики и квантовых технологий «Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», протокол № 4 от 10 ноября 2025 г., подписанном **Сергеем Ивановичем Диденко**, кандидатом физико-математических наук, доцентом, заведующим кафедрой полупроводниковой электроники и физики полупроводников, утвержденном доктором технических наук **Филоновым Михаилом Рудольфовичем**, профессором, проректором по науке и инновациям НИТУ МИСИС, указала, что диссертационная работа Фомина Максима Андреевича по актуальности, научной новизне, практической и теоретической значимости соответствует требованиям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, утвержденном приказом директора от 19.03.2025 г. № 01-042, а ее автор, Фомин Максим Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их соответствием требованиям, установленным в пп. 3.11 и 3.13 «Положения о присуждении

ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук», утвержденном приказом директора № 01-042 от 19.03.2025 г., в том числе соответствии их научно-профессионального профиля тематике диссертационной работы и высокими научными компетенциями в сфере исследования.

Официальные оппоненты не имеют совместных проектов и совместных публикаций по теме диссертации с соискателем. Ведущая организация не имеет договорных отношений с соискателем.

Основные положения и выводы диссертационного исследования изложены в 6 научных работах, опубликованных соискателем, в том числе в 4 публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах данных, и в 6 публикациях, индексируемых в базе данных РИНЦ.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science:

1. Fomin M.A. Dielectric properties of oligonucleotides on the surface of Si nanosandwich structures / M.A. Fomin, A.L. Chernev, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.K. Emelyanov, M.V. Dubina. – ФТП, 2018. – V. 52. – №5. – P. 512, DOI: 10.21883/FTP.2018.05.45856.45

Индексируемая переводная версия в Scopus:

Fomin M.A. Dielectric properties of oligonucleotides on the surface of Si nanosandwich structures / M.A. Fomin, A.L. Chernev, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.K. Emelyanov, M.V. Dubina. – Semiconductors, 2018. – V. 52. – №5. – P. 612-614, <https://doi.org/10.1134/S106378261805007X>

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, проведение эксперимента с помощью СТМ, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

2. Taranets K.B. Terahertz resonance response of biological tissue placed on a silicon nanostructure / K.B. Taranets, M.A. Fomin, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, N.T. Bagraev, A.L. Chernev. – Journal of Applied Physics, 2019. – V. 125. - №22. – P. 225702-225702-7, DOI: 10.1063/1.5083805

Личный вклад автора: весь цикл работ в части статьи, посвященной исследованию олигонуклеотидов ДНК: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

3. Fomin M.A. Terahertz response from oligonucleotides deposited on silicon nanostructures / M.A. Fomin, N.T. Bagraev, A.L. Chernev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko. – International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2019. – P. 8874337, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874337

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, облучение олигонуклеотидов ДНК излучением в ТГц диапазоне, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

4. Фомин М.А. Магнитные свойства краевых каналов кремниевых наносандвич-структур с осажденными олигонуклеотидами ДНК / М.А. Фомин, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов, Н.Т. Баграев. – ЖТФ, 2022. – Т. 92. – №7. – С. 963-967, DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52651.5-22

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), снятие полевых зависимостей магнитной восприимчивости, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ:

1. Фомин М.А. Диэлектрические свойства олигонуклеотидов ДНК на поверхности кремниевых наноструктур / М.А. Фомин, А.Л. Чернев, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.К. Емельянов, М.В. Дубина. – Неделя науки СПбПУ, 2017. – P. 292-295, EDN: YCGHKV, eLIBRARY ID: 31797494

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

2. Fomin M.A. Dielectric properties of oligonucleotides on the surface of Si nanosandwich structures / M.A. Fomin, A.L. Chernev, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.K. Emelyanov, M.V. Dubina. – ФТП, 2018. – V. 52. – №5. – P. 512, DOI: 10.21883/FTP.2018.05.45856.45

Индексируемая переводная версия в Scopus:

Fomin M.A. Dielectric properties of oligonucleotides on the surface of Si nanosandwich structures / M.A. Fomin, A.L. Chernev, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.K. Emelyanov, M.V. Dubina. – Semiconductors, 2018. – V. 52. – №5. – P. 612-614, <https://doi.org/10.1134/S106378261805007X>

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, проведение эксперимента с помощью СТМ, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

3. Taranets K.B. Terahertz resonance response of biological tissue placed on a silicon nanostructure / K.B. Taranets, M.A. Fomin, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, N.T. Bagraev, A.L. Chernev. – Journal of Applied Physics, 2019. – V. 125. - №22. – P. 225702-225702-7, DOI: 10.1063/1.5083805

Личный вклад автора: весь цикл работ в части статьи, посвященной исследованию олигонуклеотидов ДНК: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

4. Fomin M.A. Terahertz response from oligonucleotides deposited on silicon nanostructures / M.A. Fomin, N.T. Bagraev, A.L. Chernev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko. – International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2019. – P. 8874337, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874337

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, облучение олигонуклеотидов ДНК излучением в ТГц диапазоне, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

5. Фомин М.А. Магнитные свойства краевых каналов кремниевых наносандвич-структур с осажденными олигонуклеотидами ДНК / М.А. Фомин, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, В.В. Романов, Н.Т. Баграев. – ЖТФ, 2022. – Т. 92. – №7. – С. 963-967, DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52651.5-22

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, снятие полевых зависимостей магнитной восприимчивости, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

6. Фомин М.А. Макроскопические квантовые явления в условиях осаждения олигонуклеотидов ДНК в краевые каналы кремниевой наносандвич-структуры / М.А. Фомин, П.А. Головин, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, А.К. Емельянов, Н.Т. Баграев. – ЖТФ, 2024. – Т. 94. – №9. – Р. 1588-1596.

Личный вклад автора: подготовка экспериментальных образцов, нанесение олигонуклеотидов ДНК, снятие вольт-амперных характеристик, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научной степени работах.

Во введении представлена актуальность темы диссертационного исследования, поставлены цели и задачи, приведены научная новизна и практическая значимость работы, описана степень ее проработки, представлены выносимые на защиту положения, достоверность, апробация и личный вклад автора.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертации, описаны наблюдаемые в рамках диссертационной работы макроскопические квантовые явления, такие, как квантовый эффект Холла, осцилляции Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена, квантовая лестница продольной проводимости. Обусловлен выбор олигонуклеотидов ДНК в качестве биообъекта для попытки создания прообраза системы полупроводниковая наноструктура – биообъект. В конце поставлены цель и задачи работы.

Вторая глава описывает выбранную в качестве топологической полупроводниковой наноструктуры в данной работе кремниевую наносандвич-структуру (КНС). Приведены последовательность алгоритм синтеза и свойства КНС, представляющей собой сверхузкую кремниевую квантовую яму р-типа проводимости на поверхности п-типа, ограниченную сильно легированными бором δ -барьерами. Также освещены использованные в настоящей работе олигонуклеотиды ДНК, способ их осаждения на поверхность краевых каналов КНС и метод снятия вольт-амперных характеристик.

Третья глава посвящена описанию экспериментальной части работы, затрагивающей электрические и магнитные свойства КНС, в том числе после осаждения олигонуклеотидов ДНК на ее поверхность. Так, приведена концепция электромагнитной индукции Фарадея, позволяющей интерпретировать наблюдаемые явления как электрические аналоги квантового эффекта Холла и осцилляций Шубникова – де Гааза. Также в рамках изучения магнитных свойств КНС были зафиксированы осцилляции де Гааза – ван Альфена и влияние на них олигонуклеотидов ДНК. В частности, это позволило сделать вывод о влиянии осажденных олигонуклеотидов ДНК на эффективную площадь краевых каналов КНС, на которых происходит захват квантов магнитного потока.

Четвертая глава содержит результаты эксперимента, демонстрирующие самосогласованный одномоментный вклад различных контуров в квантовую интерференцию в КНС с олигонуклеотидами ДНК на ее поверхности. Данные вклады проявляются в серии вложенных друг в друга резких периодических биений ВАХ КНС. В частности, была зафиксирована квантовая интерференция на участке между контактами «хх», на одиночном гармоническом осцилляторе, из последовательности которых состоит

краевой канал КНС, а также на олигонуклеотиде ДНК, что было продемонстрировано впервые.

В заключении перечислены основные результаты.

На диссертацию и автореферат **поступили отзывы:**

Отзыв **ведущей организации положительный**, содержит следующие замечания:

1. В разделе про электрический аналог квантового эффекта Холла представлена квантовая лестница сопротивления в зависимости от величины тянущего тока исток – сток. В этом случае длина квантовой ступеньки и, соответственно, интервал между пиками продольной проводимости определяются размером области бездиссипативного транспорта, который взаимосвязан с двумерной плотностью носителей в краевом канале КНС. Однако информация об этой величине в диссертации не приведена. Соответствует ли значение двумерной плотности носителей согласно данным исследований электрического аналога квантового эффекта Холла полевым зависимостям квантового эффекта Холла?
2. Исследования осцилляций проводимости, полученных при нанесении олигонуклеотидов, демонстрируют их вклад в квантовую интерференцию. При этом в этих осцилляционных зависимостях выделяется амплитуда первой осцилляции с наибольшим периодом, которую автор относит к вкладу интерференции носителей на контактах. Однако возможный вклад в поведение амплитуды осцилляций проводимости может вносить эффект перезарядки областей между контактами, содержащими одиночные носители (эффект транзистора на одиночных электронах). Возникает вопрос об относительном вкладе одноэлектронного транспорта и квантовой интерференции в наблюдаемое поведение квантованной проводимости.
3. В диссертации не приведена точная геометрия КНС, которая важна для понимания результатов эксперимента.
4. Отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие расположение и ориентацию фрагментов ДНК относительно краевых каналов КНС, которые можно определять с помощью, к примеру, атомно-силовой микроскопии.
5. Нет точных данных по технологии создания краевых каналов, механизме образования таких структур (диффузия? имплантация?) и механизмам устойчивости таких структур.
6. Каким образом рассчитывали двумерную концентрацию дырок?

7. Как изменятся результаты работы при замене ДНК на порошок из её составляющих: азотистое основание, дезоксирибоза, соли фосфорной кислоты. Насколько результат работы зависит от структуры ДНК?
8. Если важна спиральная структура, то как изменятся результаты работы при замене ДНК на спиральный полипептид?

Отмечается, что указанные замечания не снижают общей положительной оценки.

Отзыв официального оппонента, **доктора физико-математических наук Буравлева Алексея Дмитриевича положительный**, содержит следующие замечания:

1. Во многих местах диссертации указывается несколько противоречивая информация о месте нахождения олигонуклеотидов в ходе исследований после проведения технологических операций по их осаждению. Например, в оглавлении диссертации на странице 2 параграф 3.1 озаглавлен «Вольт-амперные характеристики КНС после осаждения олигонуклеотидов ДНК в краевые каналы», а уже на странице 3 приведено следующее название главы 4: «Квантовая интерференция в условиях присутствия олигонуклеотида ДНК на поверхности КНС».
2. Для проведения исследований использовались олигонуклеотиды только с числом оснований равным пятьдесят. Несмотря на то, что другие подобные объекты, например, с другим числом оснований, в работе не исследовались, выводы о потенциальной возможности разработанных подходов как по управлению транспортом носителей тока, так и исследованию свойств подобных объектов, отдельно не приведены.
3. Все подписи рисунков, приведенных в первой и второй главе, не содержат ссылки на источники, из которых они были взяты. Инфографика приведена как на русском, так и английском языках.
4. В диссертационной работе не приведен отдельный список используемых сокращений, что затрудняет восприятие и работу с текстом.

Отмечается, что указанные замечания не снижают общей положительной оценки.

Отзыв официального оппонента, **доктора физико-математических наук Захарова Максима Анатольевича положительный**, содержит следующие замечания:

1. Не обсуждается взаимосвязанность величины амплитуды осцилляций проводимости с ее возможным значением в рамках электростатической перезарядки «пиксел», а также в зависимости от режима размерного квантования;

2. Зависимости восприимчивости от величины магнитного поля показывают изменения режимов квантования Ландау при осаждении олигонуклеотидов в краевые каналы, однако при этом не обсуждается вопрос о возможном усилении диамагнетизма;
3. Квантовая лестница сопротивления в зависимости от величины электрического поля при исследовании электрического аналога квантового эффекта Холла показывает изменения длины «ступеньки» с увеличением ее номера. Однако механизм этого изменения в работе не обсуждается.

Отмечается, что указанные замечания не снижают общей положительной оценки.

На автореферат поступило **2 отзыва** (оба отзыва **положительные**):

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук**, г. Санкт-Петербург. Отзыв подписал заведующий лабораторией физики фазовых переходов в твердых телах Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, доктор физико-математических наук Шадрин Евгений Борисович. Отзыв не содержит замечаний.
2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт цитологии Российской академии наук**, г. Санкт-Петербург. Отзыв подписала ведущий научный сотрудник Центра клеточных технологий Института цитологии РАН, кандидат биологических наук Нащекина Юлия Александровна. Отзыв содержит следующие замечания:
 - На стр 3, Автор пишет, что «известны некоторые особенности электрических характеристик олигонуклеотидов...», что может быть причиной «проявления в соответствующих условиях квантового характера поведения олигонуклеотида, как нанообъекта, обладающего электрическими и магнитными свойствами». Чем обусловлены магнитные свойства олигонуклеотидов?
 - В разделе «Практическая значимость работы» Автор описывает эффекты, которые были обнаружены на исследуемых объектах. Какое практическое значение могут иметь данные эффекты, если говорить об альтернативе секвенированию?

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований получены существенные результаты, обладающие научной новизной:

- Зафиксированы электрические аналоги квантового эффекта Холла и осцилляций Шубникова – де Гааза в ВАХ КНС с олигонуклеотидами ДНК на поверхности краевых каналов КНС;
- Обнаружены осцилляции де Гааза – ван Альфена в полевых зависимостях магнитной восприимчивости КНС с осажденными на поверхность ее краевых каналов олигонуклеотидами ДНК;
- Впервые продемонстрирована квантовая интерференция одиночных носителей заряда, обусловленная нахождением олигонуклеотидов ДНК на поверхности КНС.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что:

- Представлена модель на основе концепции электромагнитной индукции Фарадея, позволяющей описывать электрические аналоги макроскопических квантовых явлений в системе полупроводниковая наноструктура – биообъект;
- Обнаружен самосогласованный одномоментный вклад разных интерференционных контуров в явление квантовой интерференции в полупроводниковой наноструктуре с олигонуклеотидами ДНК на поверхности.

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

- Показано, что наличие тригональных дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией в КНС позволяет изучать влияние биообъектов на макроскопические квантовые явления при комнатной температуре;
- Осаждение олигонуклеотидов ДНК на поверхность краевых каналов меняет эффективную площадь захвата квантов магнитного потока;
- Исследование электрических свойств КНС позволяет определять вклад в квантовую интерференцию как одиночных носителей в краевых каналах, так и олигонуклеотидов ДНК, осажденных на поверхность краевых каналов КНС.

Оценка достоверности результатов исследований выявила, что:

- При проведении исследований соискателем были использованы общепризнанные подходы и методы исследований;
- Был получен большой объем данных;
- Результаты исследования воспроизводимы;
- Использованы современные высокоточные приборы, апробированные методики сбора и обработки исходной информации;

- Результаты работы согласуются с литературными данными в тех случаях, когда такое сопоставление возможно.

Личный вклад соискателя определяется непосредственным участием автора на всех этапах исследования: в подготовке и проведении эксперимента, в написании публикаций по результатам эксперимента, в апробации результатов исследования и в обработке и интерпретации экспериментальных данных.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании полученных экспериментальных результатов представлено влияние олигонуклеотидов ДНК на макроскопические квантовые явления в полупроводниковой наноструктуре, получено большое количество инновационных результатов, которые представляют большой интерес для инженеров и исследователей, занимающихся разработкой устройств в сферах полупроводниковой промышленности и медицинской диагностики.

Диссертация М. А. Фомина на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Результаты, выносимые на защиту, являются новыми и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку.

На заседании 17 декабря 2025 г. Диссертационный совет ИПМАШ 1.3.8. принял единогласное решение, что диссертационная работа Фомина Максима Андреевича «Макроскопические квантовые явления в кремниевых наносандвич-структурах, содержащих олигонуклеотиды ДНК» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной научной задачи. Диссертационная работа полностью соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем машиноведения Российской академии наук, а ее автор М. А. Фомин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек (в удаленном интерактивном режиме присутствовало 0 человек), из них 13 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, дополнительно выведены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение ученой степени – 13, против присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.



Председатель
диссертационного совета ИПМАШ 1.3.8.,
доктор физико-математических наук
МП

Ученый секретарь
диссертационного совета ИПМАШ 1.3.8.,
доктор физико-математических наук

Гуткин Михаил Юрьевич

Скиба Николай Васильевич

Дата оформления заключения 18 декабря 2025 года.