

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС

М.Р. Филонов

10 » ноября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) на диссертационную работу **Фомина Максима Андреевича**

«Макроскопические квантовые явления в кремниевых наносандвич-структурах, содержащих олигонуклеотиды ДНК»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

В настоящее время для увеличения вычислительной производительности интегральных схем все больше внимания уделяется использованию квантового транспорта носителей, хотя это представляет существенные трудности даже при сверхнизких температурах. Поэтому в технологии микро- и нанoeлектроники обращают внимание на использование наноразмерных объектов, в частности, биомолекул с подходящими размерами для управления параметрами квантовой интерференции. При получении подобных гибридных систем представляет интерес использовать олигонуклеотиды ДНК в рамках кремниевой планарной технологии, поскольку олигонуклеотид представляет собой компактную двойную спираль шириной 2 нм и длиной от 0,34 нм, в зависимости от количества пар оснований в нем.

Целью диссертационного исследования является изучение влияния осажденных олигонуклеотидов ДНК на макроскопические квантовые явления при комнатной температуре в краевых каналах кремниевых наносандвич-структур (КНС), представляющих собой сверхузкие квантовые ямы р-типа проводимости, ограниченные δ -барьерами, сильно легированными бором, на поверхности кремния (100) п-типа. Для исследований с участием олигонуклеотидов ДНК необходимо поддерживать высокую температуру, вплоть до комнатной. Этот аспект накладывает серьезные ограничения на возможность наблюдения макроскопических квантовых явлений, поскольку в данном случае сильно повышается интенсивность электрон-электронного взаимодействия носителей ассоциированной с геномом структуры, что приводит к уменьшению времени релаксации, а это в свою очередь не позволяет выполняться условию сильного поля в рамках квантования Ландау. Таким образом остро встает проблема подавления электрон-электронного взаимодействия при высоких температурах. Вышесказанное представляет собой одну из важнейших задач для реализации цели диссертационного исследования.

Для решения этой задачи в работе исследуются наноструктуры с топологическими проводящими краевыми каналами. Топологические изоляторы, в которых образуются данные краевые каналы, характеризуются наличием поверхностных или же краевых состояний, формирующихся из-за исчезновения запрещенной зоны в энергетическом спектре структуры. Более того, краевые каналы являются аналогами баллистических

проводящих каналов и формируются разделенными в пространстве парами, носители в которых имеют противоположную ориентацию спинов в условиях эффективного отсутствия внешнего магнитного поля, что позволяет наблюдать спинозависимые явления, в частности, электрический аналог квантового эффекта Холла, обнаружение и изучение которого также является одной из задач диссертационного исследования.

На основании вышеизложенного следует заключить, что диссертационная работа Фомина М.А. является **актуальной** и востребованной как с научной, так и с практической точек зрения.

Научная новизна

1. Обнаружены осцилляции де Гааза – ван Альфена в зарегистрированных полевых зависимостях магнитной восприимчивости краевых каналов КНС, содержащими олигонуклеотиды ДНК.

2. Зарегистрированы электрические аналоги квантовой лестницы холловской проводимости и осцилляций Шубникова – де Гааза в ВАХ краевых каналов КНС, содержащими олигонуклеотиды ДНК.

3. Впервые зарегистрирована квантовая интерференция одиночных носителей, обусловленная наличием олигонуклеотида ДНК в краевом канале КНС.

Практическая значимость

Полученные данные об электрических и магнитных свойствах ДНК в составе гибридных структур могут способствовать реализации новых приборов вычислительной техники и медицинской нанoeлектроники, в частности квантовых транзисторов, состоящих из кремниевых наноструктур и помещенных на них одиночных олигонуклеотидов ДНК.

Результаты проведенного диссертационного исследования представляется целесообразным внедрить на предприятиях, занимающихся разработкой и изготовлением терра- и гигагерцовых источников и приемников излучения, таких, как АО НПО «Орион», АО НПП «Исток», АО НПП «Радар ммс», АО «Завод «Электроприбор».

Для дальнейшего развития тематики рекомендуется продолжить исследования в научных коллективах, специализирующихся на исследованиях в области квантового транспорта, таких как ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Университет ИТМО, ИФП СО РАН.

Защищаемые положения

На основании полученных результатов сформулированы защищаемые положения диссертационного исследования.

1. Макроскопические квантовые явления в кремниевых наносандвич-структурах с краевыми каналами, содержащими олигонуклеотиды ДНК, могут исследоваться при высоких температурах, вплоть до комнатных, вследствие наличия оболочек, состоящих из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией.

2. Влияние олигонуклеотидов ДНК на макроскопические квантовые характеристики краевых каналов КНС описывается в концепции электромагнитной индукции Фарадея.

3. Полевые зависимости магнитной восприимчивости краевых каналов КНС демонстрируют изменение периодичности осцилляций де Гааза – ван Альфена в слабых и сильных магнитных полях при внесении олигонуклеотидов ДНК, что свидетельствует об

изменении эффективной площади участка краевого канала с одиночным носителем, на который происходит захват квантов магнитного потока.

4. Вольт-амперные характеристики демонстрируют самосогласованный вклад различных областей квантовой интерференции одиночных носителей в краевых каналах КНС в электрические аналоги квантового эффекта Холла и квантовой лестницы продольной проводимости.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных апробированных методик изготовления и измерения квантово-размерных структур с использованием высокоточной вычислительной техники, а также воспроизводимостью полученных результатов.

Описанные в диссертации результаты были представлены на восьми международных конференциях. В рамках темы диссертационного исследования было опубликовано 6 работ в российских и международных изданиях, рекомендованных ВАК.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснованы актуальность диссертационной работы, научная и практическая значимости, достоверность полученных результатов, описана степень ее проработки, сформулированы ее цель и задачи, а также приведены личный вклад автора и апробация полученных результатов.

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященной описанию используемых в диссертационной работе макроскопических квантовых эффектов и фундаментальных явлений, лежащих в их основе: речь идет об описании осцилляций Шубникова – де Гааза, де Гааза – ван Альфена, целочисленного и дробного эффектов Холла и квантовой лестницы продольной проводимости, обусловленных размерным квантованием, квантованием Ландау. Кроме того, объяснен выбор олигонуклеотида ДНК из всех биомолекул для использования в качестве наночастицы в рамках исследования влияния на упомянутые выше макроскопические квантовые эффекты. В конце главы поставлены цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена обзору использованных образцов кремниевой наносандвич структуры (КНС) и олигонуклеотидов ДНК. Описаны алгоритм синтеза и свойства КНС, представляющей собой сверхузкую самоупорядоченную квантовую яму р-типа проводимости на поверхности кремния n-типа, ограниченную сильно легированным бором нейтральными δ -барьерами, состоящими из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией. Также описано получение олигонуклеотидов ДНК и методика регистрации вольт-амперных характеристик КНС в рамках настоящей диссертации.

Третья глава описывает электрические и магнитные свойства КНС в условиях осаждения олигонуклеотидов ДНК в краевые каналы КНС. Во-первых, описаны зарегистрированные ВАХ КНС, на которых проявляются периодические биения. Также была приведена модель, использующая в своей основе концепцию электромагнитной индукции Фарадея в условиях захвата квантов магнитного потока, что позволило идентифицировать электрические аналоги квантового эффекта Холла и квантовой лестницы продольной проводимости с помощью измерения ВАХ. Во-вторых, были исследованы полевые зависимости магнитной восприимчивости КНС после осаждения олигонуклеотидов ДНК. Характеристики зарегистрированных осцилляций де Гааза – ван Альфена указывают на спаривание и распаривание дырок в краевых каналах в слабых и сильных магнитных полях, соответственно. Кроме того, демонстрируется изменение эффективной площади пикселей, содержащих одиночные носители внутри каналов КНС, на которые происходит захват квантов магнитного потока. Показано, что внесение одиночных олигонуклеотидов ДНК в пиксели приводит к изменению периодичности осцилляций де Гааза – ван Альфена.

В четвертой главе представлены результаты изучения возможности использования олигонуклеотидов ДНК для контроля характеристик квантовой интерференции одиночных

носителей в краевых каналах КНС. Исследование проводилось на примере изучения электрических аналогов квантового эффекта Холла и квантовой лестницы продольной проводимости, которую можно интерпретировать, как осцилляции ШдГ. Полученные ВАХ демонстрируют самосогласованный вклад разных областей интерференции в краевых каналах КНС в упомянутые выше макроскопические квантовые явления.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Показано, что исследованные в работе кремниевые наносандвич структуры (КНС) представляют собой сверхузкую кремниевую квантовую яму р-типа проводимости, ограниченную сильно легированными бором δ -барьерами на поверхности кремния (100) п-типа. δ -барьеры, состоящие из тригональных дипольных центров бора, $V^{++}V^{-}$, с отрицательной корреляционной энергией, $2B_0 \Rightarrow V^{++}V^{-}$, которые сформированы вследствие реконструкции мелких акцепторов бора, экранируют границы квантовой ямы КНС, подавляя тем самым электрон-электронное взаимодействие локализованных одиночных дырок в пространстве между барьерами. Обнаружено, что время релаксации дырок в краевых каналах КНС достаточно длинное ($>10^{-10}$ с) вследствие подавления электрон-электронного взаимодействия. Наличие дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией позволяет наблюдать макроскопические квантовые явления при высоких температурах, вплоть до комнатной.

2. Предложена модель, объясняющая влияние олигонуклеотида ДНК на макроскопические квантовые явления в КНС, которые базируются на концепции электромагнитной индукции Фарадея. В рамках предложенной модели наблюдаемые особенности поведения ВАХ представлены, как электрические аналоги квантового эффекта Холла и квантовой лестницы продольной проводимости, которую можно рассматривать, как аналог осцилляций Шубникова – де Гааза. Показано, что осаждение одиночных олигонуклеотидов ДНК определяет величину периодов осцилляций ВАХ вследствие изменения периодичности захвата квантов магнитного потока в пикселе, содержащей одиночные носители.

3. Получены данные полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости КНС, демонстрирующие осцилляции де Гааза – ван Альфена, которые обусловлены механизмами спаривания одиночных дырок в соседних пикселях в слабых магнитных полях и распариванием пар носителей в сильных полях. Обнаружено, что внесение олигонуклеотида ДНК в систему краевых каналов изменило периоды осцилляций де Гааза – ван Альфена вследствие изменения эффективной площади пикселя, участвующей в захвате квантов магнитного потока: осажденный олигонуклеотид ДНК делит площадь пикселя на части, что приводит к ограничению пространства для осцилляции одиночной дырки внутри пикселя.

4. Зафиксирован самосогласованный вклад различных областей квантовой интерференции в наблюдаемые макроскопические квантовые явления в КНС после осаждения олигонуклеотидов ДНК в их краевые каналы. Этими областями являлись участок краевого канала между измерительными контактами продольной проводимости, микрорезонатор, который представляет собой пикселя с одиночной дыркой внутри, и собственно олигонуклеотид ДНК, размерами 34×2 нм². Полученные значения холловского сопротивления и продольной проводимости для каждой области интерференции самосогласуются и примерно равны единицам $[h/e^2]$ и $[e^2/h]$, соответственно. Причем, квантовая интерференция одиночных носителей, обусловленная наличием олигонуклеотидов ДНК, обнаружена впервые.

По диссертационной работе можно сделать 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?

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают ценности полученных результатов.

Заключение

Диссертационная работа Фомина Максима Андреевича на тему «Макроскопические квантовые явления в кремниевых наносандвич-структурах, содержащих олигонуклеотиды ДНК», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, является законченной научно-квалификационной работой и имеет научную и практическую ценность. Содержание автореферата отражает содержание диссертации, его структура и объем соответствует установленным стандартам. Представленный список научных работ соискателя показывает, что полученные результаты достаточно полно опубликованы в российских и зарубежных научных журналах.

Тематика выполненных исследований соответствует паспорту специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния: Пункт 1. «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления».

Диссертация 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.

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры полупроводниковой электроники и физики полупроводников с приглашением сотрудников кафедры теоретической физики и квантовых технологий университета МИСИС протокол № 4 от 10 ноября 2025 г.

Заведующий кафедры
ППЭ и ФПП,
к.ф.-м.н.



С.И. Диденко

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС).

119049, г. Москва, Ленинский п-т, д. 4, стр. 1.

Электронная почта: kancela@misis.ru

Контактный телефон: (495) 955-00-32