



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Фомин Максим Андреевич

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

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: Баграев Николай Таймуразович,

доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Захаров Максим Анатольевич

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физики твердого тела и микроэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

Буравлев Алексей Дмитриевич

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник в лаборатории микро- и нанoeлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита состоится «17» декабря 2025 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ИПМАШ 1.3.8 Института проблем машиноведения Российской академии наук по адресу: 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., 61.

E-mail: dissovet.ipme.ras@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ИПМаш РАН и на сайте <https://ipme.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета ИПМАШ 1.3.8,

доктор физико-математических наук



Скиба Николай Васильевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Вычислительные мощности, которыми сегодня обладает человечество, позволяют решать огромное количество вопросов в самых разных областях, что подарило возможность совершить огромный скачок в повышении уровня жизни людей. Ключевую роль в этом сыграло бурное развитие в последние полвека полупроводниковых технологий, микро- и нанoeлектроники. Это время характеризуется законом Мура, гласящим о двукратном увеличении каждые 24 месяца количества транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы [1]. Однако необходимое для этого постоянное уменьшение размеров используемых элементов вплоть до мезоскопических масштабов практически достигло технологического предела и дальнейшие разработки не отличаются прежней эффективностью, в то же время начинают проявляться квантовые свойства носителей заряда. На данный момент ведущие исследования предлагают сосредоточиться на повышении эффективности применения полупроводниковых устройств, т.е. на улучшении используемого ими программного обеспечения, поскольку проблемы технологического процесса в рамках прежнего подхода остаются неразрешенными. Альтернативным способом продолжать увеличивать вычислительную производительность существующих интегральных схем является переход к квантовому транспорту, т.е. от дрейфового режима к фермиевскому. Но при этом остается открытым вопрос возможности эффективного управления параметрами квантового транспорта, в том числе баллистического транспорта, что достаточно затруднительно даже при комнатной температуре.

Еще в 1959 г. Ричард Фейнман в своей лекции "There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics" озвучил предположение, что возможно механически перемещать одиночные атомы при помощи манипулятора соответствующего размера. Тогда он предполагал, что данный подход можно рассматривать в роли более мощного аналога синтетической химии, однако сама идея использования наноразмерных частиц была подхвачена учеными и имплементирована в различных областях, например, в микроэлектронике, медицине, химической промышленности, различных физических методах исследования. В то же время появилась идея о применении биомолекул в качестве нанообъектов, так как часть из них обладает подходящими размерами. В частности, представляет интерес изучение олигонуклеотидов дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), поскольку олигонуклеотид представляет собой компактную двойную спираль шириной 2 нм и длиной от 0,34 нм, в зависимости от количества пар оснований в нем. Также известны некоторые особенности электрических характеристик олигонуклеотидов: так, их проводимость определяется в первую очередь первичной структурой биомолекулы, т.е. числом и типом нуклеотидов, из которых она состоит [2]. Таким образом можно говорить о возможности проявления в соответствующих условиях квантового характера поведения олигонуклеотида, как нанообъекта, обладающего электрическими и магнитными свойствами.

Следует отметить, что изучение физических свойств олигонуклеотидов ДНК, в том числе электрических и магнитных, также важно для применения в медицине. Дело в том, что определение первичной структуры олигонуклеотидов ДНК, т.е. расшифровка нуклеотидной последовательности, из которой состоит биомолекула, широко применяется сегодня в диагностической практике. Для этого используются так называемые технологии секвенирования нового поколения – это группа методов определения первичной структуры ДНК и РНК, базирующихся на применении

физических принципов исследований, в первую очередь это детектирование отклика от модифицированного флюоресцентной или радиоактивной меткой нуклеотида [2, 3]. Данный подход к изучению строения биомолекул очень дорог и времязатратен, однако не имеет рыночных альтернатив на данный момент. В то же время не всегда необходимо идентифицировать структуру олигонуклеотида с точностью до нуклеотида, порой достаточно оценить физические свойства всего генома, как целого [4]. Например, детектируя резонансный отклик олигонуклеотидов возможно получить данные о потенциальной онкологии пациента без применения методов диагностики, основанных на не безопасном для человека излучении [5]. Для разработок в этом направлении необходимо уделить внимание электрическим и магнитным свойствам олигонуклеотидов.

Подводя итог вышесказанному, высокий интерес представляют исследования, направленные на изучение взаимодействия олигонуклеотидов ДНК с квантово-размерными структурами. Здесь важно проанализировать электрические и магнитные свойства биомолекулы, которые могут внести свой вклад в макроскопические квантовые эффекты в наноструктуре. Оценка степени влияния на наблюдаемые квантовые явления позволит сделать вывод о возможности применения биологических макромолекул в рамках управления параметрами квантового транспорта носителей структуры, ассоциированной с олигонуклеотидами. С другой стороны, полученные данные об электрических и магнитных свойствах олигонуклеотидов ДНК могут лечь в основу новых приборов в области медицинской диагностики, как альтернатива технологиям секвенирования.

Степень разработанности темы

Исторически олигонуклеотиды ДНК вследствие своей природы используются в основном в медицине, биологии и химии, однако важный вклад в изучение их свойств вносят физические методы исследований. Так, полученные Франклином, Уотсоном и Криком рентгенограммы структуры молекулы ДНК позволили создать модель олигонуклеотида ДНК, которая представляла собой двойную спираль, за что Уотсон и Крик были удостоены Нобелевской премии 1962 г. [6]. Более того, выполняемая олигонуклеотидами функция хранения и передачи генетической информации была доказана именно благодаря физическому обоснованию спиралевидной структуры.

Дальнейшие исследования в области биотехнологий и генетики привели к созданию первого метода секвенирования ДНК, предложенного Сенгером в 1977 г. Он подразумевал обрыв цепи и последующее детектирование сигнала оптическими методами от встроенного модифицированного флюоресцентной или радиоактивной меткой нуклеотида. Эта модель идентификации нуклеотидной последовательности ДНК стала революционной и послужила базисом для развития множества других подходов, многие из которых по-прежнему использовали заложенные Сенгером идеи. Таким образом, большинство всех методик секвенирования нового поколения сегодня основаны на оптическом детектировании флюоресцентной метки. Данный подход требует дорогостоящего оборудования и больших временных затрат, что вкупе с общемировым трендом на реализацию концепции персонализированной медицины, подразумевающей общедоступные методы экспресс-анализа ДНК, объясняет существующую сегодня высокую конкуренцию за создание улучшенных или альтернативных секвенированию технологий. Поэтому остается актуальной задача исследования фундаментальных свойств олигонуклеотидов. Так, последние исследования демонстрируют сложность электрических свойств макромолекул ДНК, например, проводимость сильно зависит от температуры среды, а также длины и

нуклеотидного состава олигонуклеотида [2]. Также было показано, что при осаждении олигонуклеотида на кремниевую подложку между платиновыми контактами на ее поверхности, образуются туннельные барьеры между макромолекулой и контактами [7]. В то же время олигонуклеотиды ведут себя, как полимерные цепочки, обладающие свойствами мультиферроиков. При этом остается открытым вопрос их взаимодействия с квантово-размерными структурами и влияния на квантовый транспорт.

Еще раз отметим, что 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.

Перспективным решением озвученной выше проблемы представляется использование наноструктур с топологическими проводящими краевыми каналами. Дело в том, что 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 [8]. 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, квантовый спиновый эффект Холла [8, 9].

Важно сказать, что хоть описанные выше структуры позволяют в большей степени подавить электрон-электронное взаимодействие, все еще остается проблема отрицательного вклада в это явление границ низкоразмерных структур. Так, последнее время разрабатываются подходы к решению этой задачи, имеющие в своей основе обменное взаимодействие носителей с границами квантовой системы – оно позволяет сохранить момент и энергию носителей. В качестве примеров описанной методики стоит отметить создание оболочек на границах из f- и d-элементов [10], а также из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией «negative-U», ($2D^0 \rightarrow D^- + D^+$) [11, 12]. При этом вариант с дипольными центрами позволяет проводить эксперименты при высоких температурах, вплоть до комнатной, вследствие negative-U реакции. Таким образом, использование двумерных систем с оболочками краевых каналов из дипольных центров является перспективным для наблюдения макроскопических квантовых явлений при высоких температурах, что является необходимым условием для работы с олигонуклеотидами ДНК [13-15]. Более того, интересным является изучение возможного влияния олигонуклеотидов на квантовую интерференцию в условиях спиновой прецессии поляризованных носителей тока в краевых каналах, которая возникает вследствие negative-U реакции, что может лечь в основу создания квантовых транзисторов на основе системы, состоящей из наноструктуры и помещенной в нее биомолекулы.

Использованные в данной работе планарные кремниевые наносандвич-структуры (КНС), в отличие от большинства наноструктур с топологическими изоляторами на основе классических гетеропереходов, обладают встроенным сверхмелким p-n переходом, что позволяет заблокировать вертикальный транспорт

носителей и одновременно усилить влияние спин-орбитального взаимодействия. Данный факт позволяет эффективно исследовать параметры квантовой интерференции носителей в краевых каналах КНС после осаждения в них олигонуклеотидов ДНК.

Целью диссертационного исследования было изучение влияния олигонуклеотидов дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), осажденных на поверхность краевых каналов кремниевых наносандвич-структур (КНС), на макроскопические квантовые эффекты при комнатной температуре.

Для этого в КНС, представляющих собой сверхузкие квантовые ямы р-типа, ограниченные сильно легированными бором δ -барьерами, на поверхности кремния (100) n-типа, которые **являются объектом исследования**, регистрировались электрические и магнитные свойства. При этом краевые каналы КНС, содержащие олигонуклеотиды ДНК, являются **предметом настоящего исследования**.

Задачи исследования

1. Разработка модели, описывающей влияние олигонуклеотидов ДНК на макроскопические квантовые явления, наблюдаемые в КНС при исследовании вольт-амперных характеристик (ВАХ) КНС, а именно электрические аналоги квантового эффекта Холла и квантовой лестницы продольной проводимости;
2. Исследование вклада олигонуклеотидов ДНК в зависимость статической магнитной восприимчивости КНС;
3. Оценка степени влияния олигонуклеотидов ДНК на явление квантовой интерференции в КНС.

Научная новизна

1. Обнаружены осцилляции де Гааза – ван Альфена в зарегистрированных полевых зависимостях магнитной восприимчивости краевых каналов КНС, содержащих олигонуклеотиды ДНК;
2. Зарегистрированы электрические аналоги квантовой лестницы холловской проводимости и осцилляций Шубникова – де Гааза в ВАХ краевых каналов КНС, содержащих олигонуклеотиды ДНК;
3. Впервые зарегистрирована квантовая интерференция одиночных носителей, обусловленная наличием олигонуклеотидов ДНК в краевом канале КНС.

Практическая значимость работы

1. Показано, что наличие оболочек краевых каналов КНС, состоящих из дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией, приводит к эффективному подавлению электрон-электронного взаимодействия;
2. Показано, что макроскопические квантовые явления в КНС, содержащих олигонуклеотиды ДНК, могут быть описаны в концепции электромагнитной индукции Фарадея;
3. Эффективная площадь краевых каналов КНС, определяющая характеристики транспорта одиночных носителей, зависит от режимов осаждения олигонуклеотидов ДНК, которые регулируют захват квантов магнитного потока;
4. Изучение электрических характеристик КНС позволяет идентифицировать вклады одиночных носителей в квантовую интерференцию как от краевых каналов кремниевых наноструктур, так и от осажденных на них олигонуклеотидов ДНК.

Методология и методы исследования

Реализация поставленных задач и достижение цели настоящей диссертации требуют применения широкого спектра методик, поскольку необходимо исследовать различные свойства КНС с учетом собственных особенностей олигонуклеотидов ДНК. Поэтому для изучения магнитных свойств КНС, содержащих олигонуклеотиды ДНК,

были зарегистрированы полевые зависимости магнитной восприимчивости КНС с помощью метода Фарадея. Квантовая интерференция носителей в краевых каналах КНС с олигонуклеотидами ДНК была описана с помощью макроскопических квантовых явлений, таких, как электрические аналоги квантового эффекта Холла и квантовой лестницы продольной проводимости, выступающей в качестве аналога осцилляций Шубникова-де Гааза. Электрическими аналогами они здесь называются, поскольку все были получены из зарегистрированных вольт-амперных характеристик КНС в рамках концепции электромагнитной индукции Фарадея. Экспериментальная система при этом представляла из себя наноструктуру с олигонуклеотидами на ее поверхности, контакты от которой были подключены к источнику тока и нановольтметрам, синхронизированным компьютерной программой LabVIEW. Полученные данные были обработаны в математическом пакете Matlab.

Защищаемые положения

1. Макроскопические квантовые явления в кремниевых наносандвич-структурах с краевыми каналами, содержащими олигонуклеотиды ДНК, регистрируются 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, содержащих олигонуклеотиды ДНК, в электрические аналоги квантового эффекта Холла и квантовой лестницы продольной проводимости.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных апробированных методик с использованием высокоточной вычислительной техники и воспроизводимостью результатов.

Вклад автора в решение поставленных задач состоит в постановке цели и задач диссертации, проведении экспериментальной части и описании полученных результатов на каждом этапе работы.

Апробация работы

Описанные в диссертации результаты были представлены на следующих конференциях:

- XLVI и XLII научные конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, **2017, 2018**
- 2^я, 3^я, 4^я и 5^я международные конференции «Физика – наукам о жизни», Санкт-Петербург, **2018, 2019, 2021, 2023**
- 6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, Saint-Petersburg, **2019**
- 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, Paris, **2019**

Публикация результатов исследований

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 4 в российских и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации.

Текст диссертации объемом 132 страницы состоит из введения, четырех глав, включающих 38 рисунков, заключения и списка использованной литературы из 109 источников.

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.

Параграф 1.1 посвящен описанию квантования Ландау. В параграфе описывается физическая природа проявления этого эффекта и к каким макроскопическим квантовым явлениям он приводит. Приведены физические характеристики квантового гармонического осциллятора, модель которого впервые использовал Ландау для решения уравнения Шредингера о квантовании энергетического спектра заряженной частицы в перпендикулярном магнитном поле, в частности, гамильтониан осциллятора и его собственные значения.

В **параграфе 1.2** описываются осцилляции Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена, представляющие собой осцилляции магнетопроводимости и магнитной восприимчивости от обратной величины приложенного магнитного поля, соответственно. В частности, приводится период осцилляций, выражения для осциллирующей части магнетопроводимости, а также для осциллирующей части магнитной восприимчивости и магнитного момента, вычисляемой по формуле Лифшица-Косевича.

В **параграфе 1.3** рассматривается квантовый эффект Холла. Сначала демонстрируются экспериментальные характеристики классического эффекта Холла, затем описываются двумерные электронные системы, в которых ограничено движение носителей по одному из направлений, а затем приводится физическое обоснование целочисленного (ЦКЭХ) и дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ). Отмечается, что модель Лафлина, которая была предложена для описания ЦКЭХ можно также использовать и для ДКЭХ, поскольку для его наблюдения требуется создание условий для дополнительной локализации носителей.

Параграф 1.4 демонстрирует квантовую лестницу продольной проводимости, которую можно использовать, как электрический аналог осцилляций Шубникова – де Гааза.

Параграф 1.5 описывает биологические макромолекулы с точки зрения использования в качестве нанобъектов при изучении макроскопических квантовых

явлений. Показано, что наиболее перспективным в этом смысле является олигонуклеотид ДНК, обладающий шириной 2 нм и длиной от 0.34 нм, в зависимости от количества нуклеотидов в нем. В конце параграфа приводится **постановка цели и задач** диссертационной работы.

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

Параграф 2.1 описывает способы получения КНС и ее свойства. В частности, было показано, что КНС представляет собой сверхузкую кремниевую квантовую яму (СККЯ) р-типа проводимости на поверхности кремния n-типа, ограниченную сильно легированными бором нейтральными δ -барьерами, состоящими из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией. Также было дано описание свойств КНС, среди которых было продемонстрировано наличие тригональных дипольных центров бора, обладающих отрицательной корреляционной энергией. Благодаря ей и низкой эффективной массе носителей внутри СККЯ происходит спонтанная поляризация дырок, что приводит к явлениям квантовой интерференции, а именно спиновой интерференции. Благодаря этому возможно наблюдение макроскопических квантовых явлений в условиях пропускания тока исток-сток через краевые каналы КНС, которые приводят к возникновению в них магнитного поля. Так, были продемонстрированы квантовый эффект Холла и квантовая лестница продольной проводимости. Отсюда и далее систему дипольных центров бора, содержащих внутри себя одиночную дырку, будем называть «пикселой».

Параграф 2.2 отведен под описание олигонуклеотидов ДНК, их получение и осаждение на поверхность краевых каналов КНС. Также приведена схема измерений в рамках регистрации вольт-амперных характеристик после осаждения олигонуклеотидов ДНК.

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 пиксел, содержащих одиночные носители внутри каналов КНС, на которые происходит захват квантов магнитного потока. Показано, что внесение одиночных олигонуклеотидов ДНК в пикселы приводит к изменению периодичности осцилляций де Гааза – ван Альфена.

В **параграфе 3.1** описаны ВАХ КНС в условиях осаждения олигонуклеотидов ДНК на поверхность краевых каналов КНС. Было показано, что краевые каналы

проводимости состоят из самоупорядоченных цепочек микрорезонаторов, содержащих одиночные дырки внутри, которые можно рассматривать, как квантовые гармонические осцилляторы. Кроме того, концепция электромагнитной индукции Фарадея позволила идентифицировать наблюдаемые особенности в ВАХ, как макроскопические квантовые явления. Показано, что в рамках данной модели можно рассматривать проявляющиеся в полученных ВАХ осцилляции, как электрические аналоги квантового эффекта Холла (рисунок 1, а) и продольной лестницы проводимости (рисунок 1, b), которую, в свою очередь, можно интерпретировать, как версию осцилляций Шубникова – де Гааза (ШДГ).

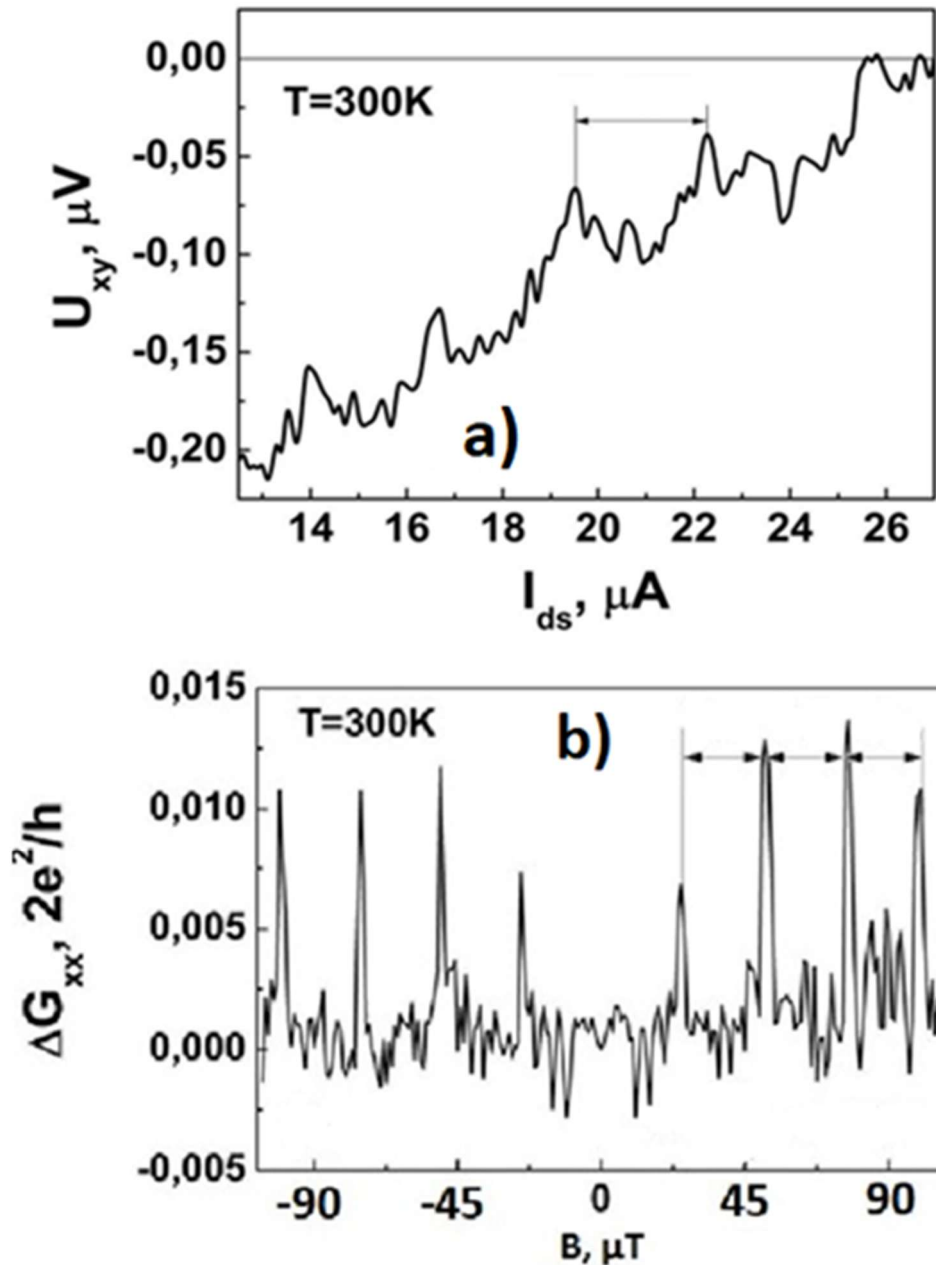


Рисунок 1. Зависимости холловского напряжения от тянущего стабилизированного тока исток-сток (а) и продольной проводимости от индуцированного тянущим током магнитного поля (b), интерпретируемые в концепции электромагнитной индукции Фарадея, как электрические аналоги квантового эффекта Холла и осцилляций Шубникова-де Гааза.

В параграфе 3.2 описываются магнитные свойства КНС в условиях осаждения олигонуклеотида ДНК на поверхность краевых каналов. Приведены данные полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости, демонстрирующие осцилляции де Гааза – ван Альфена (дГВА) (рисунок 2).

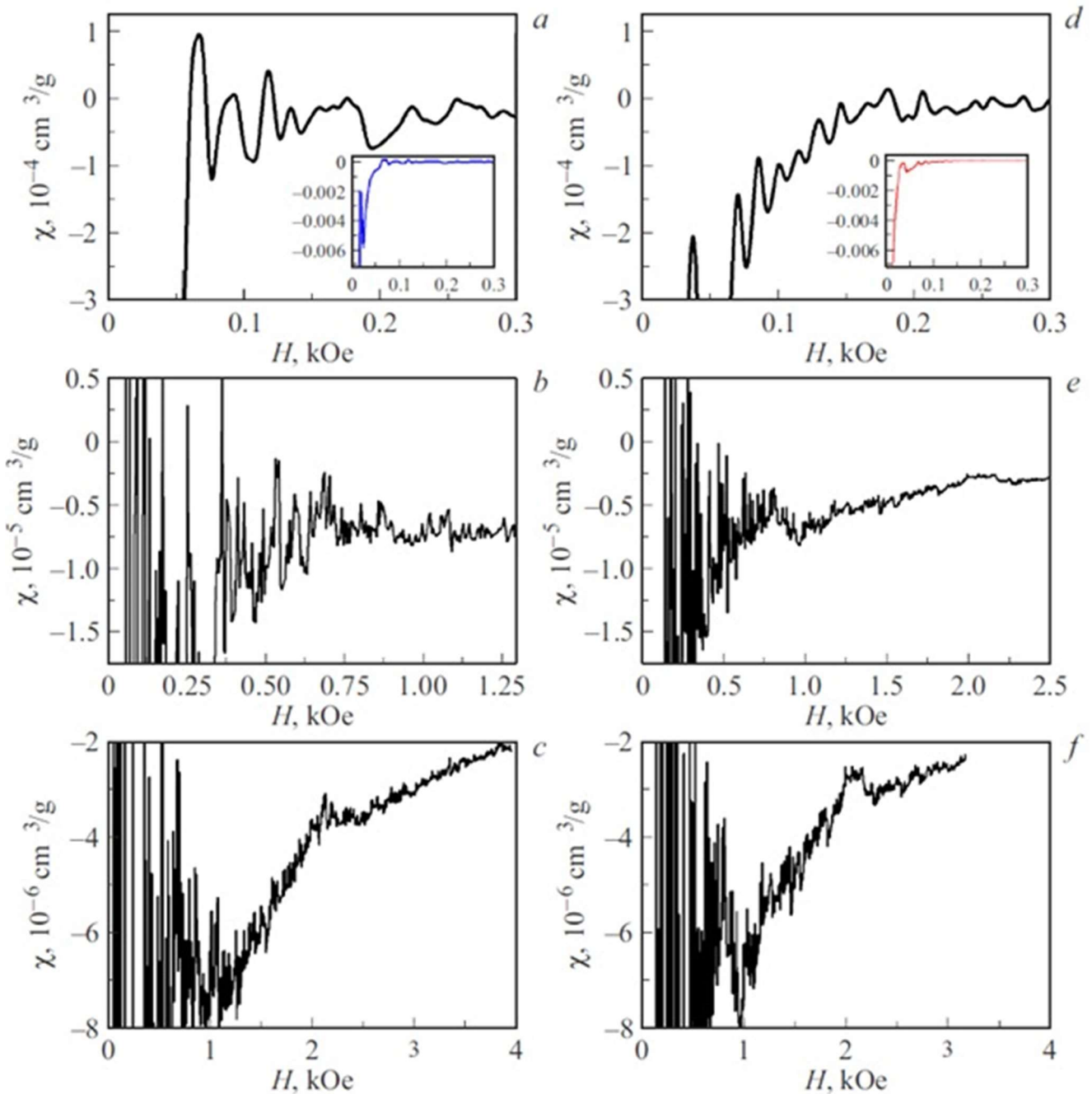


Рисунок 2. Экспериментальные данные, демонстрирующие полевые зависимости статической магнитной восприимчивости КНС без олигонуклеотида (а – с) и с осажденным олигонуклеотидом на поверхность краевых каналов (d – f). На них можно наблюдать осцилляции де Гааза – ван Альфена. Величина приложенного магнитного поля составила: (а, d) 0 – 300 Ое; (b) 0 – 1250 Ое; (е) 0 – 2500 Ое; (с, f) 0 – 4000 Ое. На вкладках приведены те же зависимости, показывающие предельные значения диамагнетизма в слабых полях.

При этом наблюдаемые осцилляции формируются двух типов: в слабых магнитных полях процессы размерного квантования обуславливаются спариванием дырок внутри соседних пиксел КНС, в то время как в сильных магнитных полях данные процессы происходят в условиях распаривания пар дырок. Также описана модель изменения периодов осцилляций в условиях осаждения олигонуклеотида ДНК в рамках системы 1 олигонуклеотид – 1 пиксела: ассоциирующаяся с пикселей биомолекула уменьшает ее эффективную площадь, участвующую в процессах размерного квантования.

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 интерференций в краевых каналах КНС в упомянутые выше макроскопические квантовые явления.

В **параграфе 4.1** описан экспериментальный подход к изучению описанных явлений, в частности, установка для осаждения олигонуклеотида и отличительные особенности метода осаждения биомолекулы по сравнению с третьей главой.

В **параграфе 4.2** описаны полученные продольные и поперечные ВАХ КНС после осаждения олигонуклеотида ДНК в краевые каналы КНС. Определены серии вложенных друг в друга разрывов и осцилляций, наблюдаемые в зависимостях ВАХ КНС от протягивания стабилизированного тока исток-сток, интерпретация которых в рамках модели электромагнитной индукции Фарадея позволяет идентифицировать электрические аналоги квантового эффекта Холла, продольной лестницы проводимости и, соответственно, осцилляций ШдГ. Таким образом, зафиксировано несколько типов квантовой интерференции, которые дают одномоментный самосогласованный вклад в наблюдаемые квантовые макроскопические явления. Области интерференции в свою очередь выступили участок между контактами «хх» (рисунок 3), одиночная пиксела (рисунок 4) и олигонуклеотид ДНК (рисунок 5). Следует отметить, что квантовая интерференция, обусловленная наличием одиночного олигонуклеотида ДНК внутри пиксела, зафиксирована впервые. При этом важным обстоятельством является тот факт, что квантовая интерференция может одновременно проявляться при участии как фрагментов полупроводниковых наноструктур, так и олигонуклеотидов ДНК.

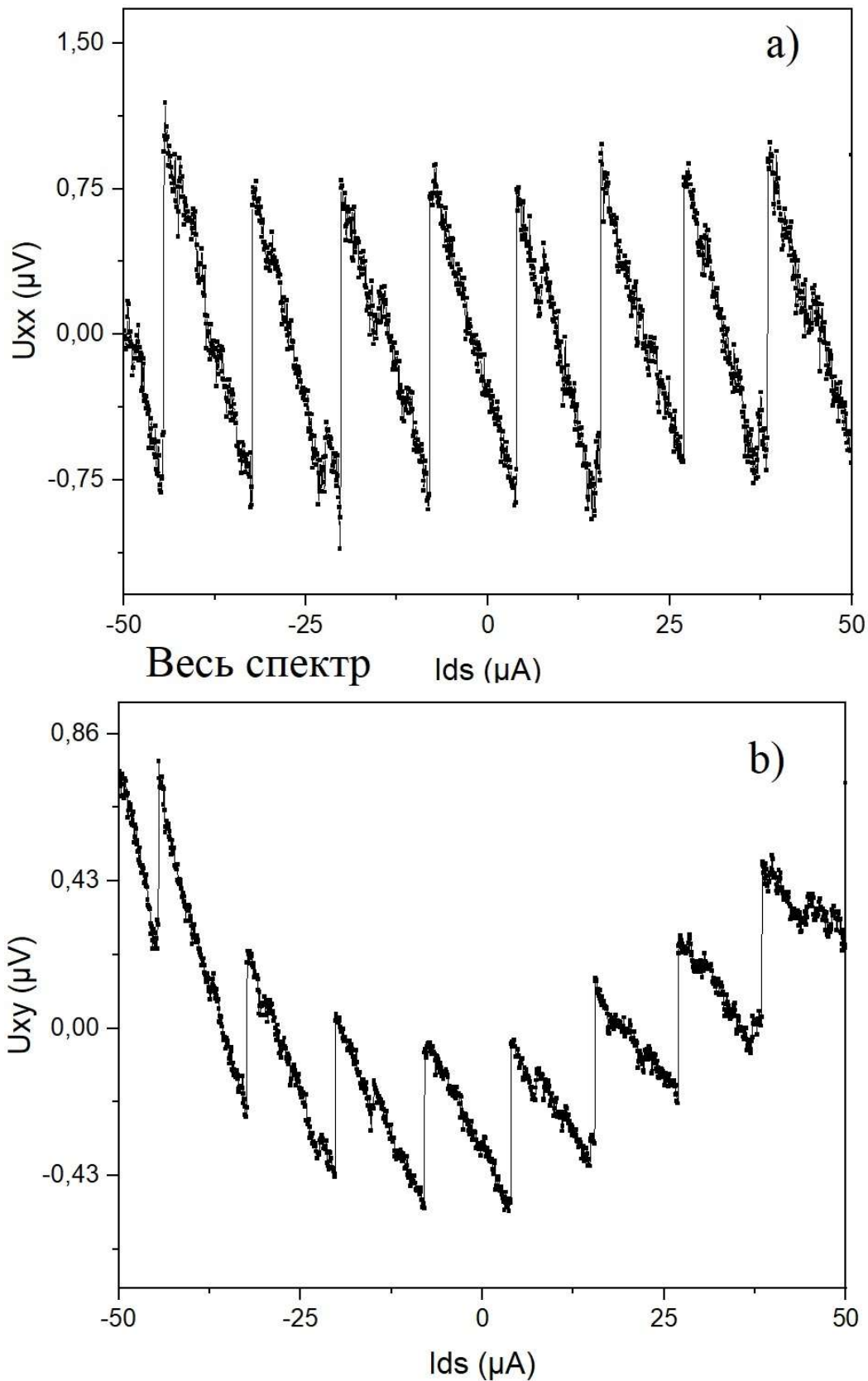


Рисунок 3. ВАХ КНС после осаждения олигонуклеотидов ДНК длиной 100 п.о. в краевые каналы КНС для первой стадии квантовой интерференции – на участке между контактами «xx». Приведены ВАХ для всего спектра изменения стабилизированного тока исток-сток в рамках эксперимента – в интервале [-50:50] мкА. На зависимостях наблюдаются резкие периодические разрывы. а) продольная ВАХ, б) – поперечная ВАХ. Погрешность измерений составила порядка 0,02 мкВ.

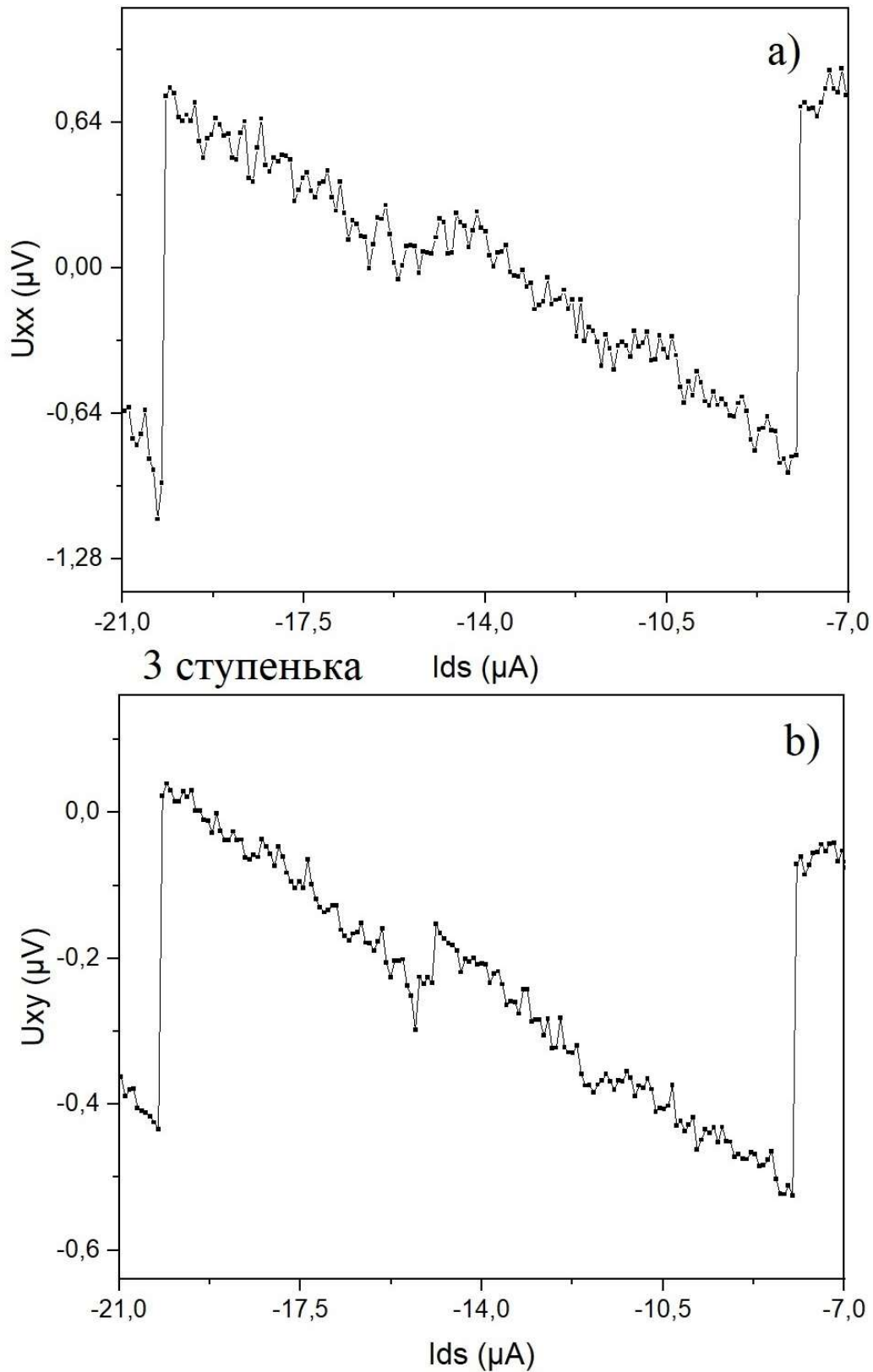


Рисунок 4. ВАХ КНС после осаждения олигонуклеотидов ДНК длиной 100 п.о. в краевые каналы КНС для второй стадии квантовой интерференции – на одиночной пикселе, в диапазоне $[-20,16;-8]$ мкА. На нем наблюдаются разрывы осцилляций с меньшим периодом, чем на общем спектре. а) продольная ВАХ, б) – поперечная ВАХ. Погрешность измерений составила порядка 0,02 мкВ.

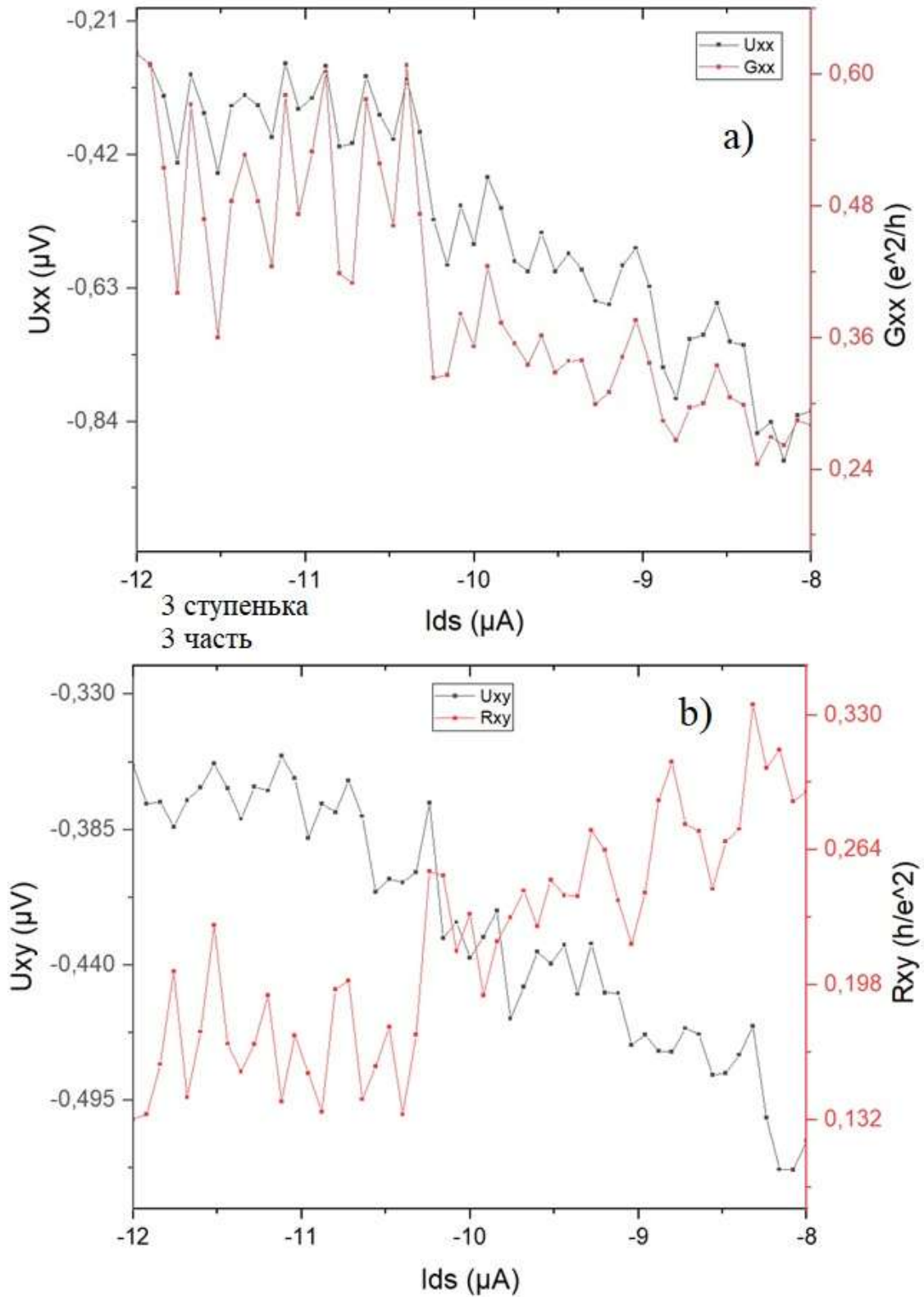


Рисунок 5. ВАХ КНС после осаждения олигонуклеотидов ДНК длиной 100 п.о. в краевые каналы КНС для третьей стадии квантовой интерференции – на олигонуклеотиде ДНК, осажденном на поверхность пиксела (черный), в диапазоне [-12;-8] мкА. Здесь также есть периодические разрывы. В то же время приведена динамика изменения продольной проводимости и поперечного сопротивления в единицах $[e^2/h]$ и $[h/e^2]$, соответственно, посчитанных в рамках модели электромагнитной индукции Фарадея (красный). а) продольная ВАХ, б) – поперечная ВАХ. Погрешность измерений составила порядка 0,02 мкВ.

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) n-типа. δ -барьеры, состоящие из тригональных дипольных центров бора, V^+V^- , с отрицательной корреляционной энергией, $2V^0 \Rightarrow V^+V^-$, 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 в КНС, содержащих олигонуклеотиды ДНК, 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 одиночный носитель.
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 в величинах $[h/e^2]$ и $[e^2/h]$, соответственно. Причем квантовая интерференция одиночных носителей, обусловленная наличием олигонуклеотидов ДНК, обнаружена впервые.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

- [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. – Р. 292-295.

- [2] Fomin M.A. Dielectric properties of oligonucleotides on the surface of Si nanosandwich structures / M.A. Fomin, A.L. Chernov, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.K. Emelyanov, M.V. Dubina. – ФТП, 2018. – Т52. – №5. – P. 512.
- [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. Chernov. – Journal of Applied Physics, 2019. – Vol. 125. - №22. – pp. 225702-225702-7.
- [4] Fomin M.A. Terahertz response from oligonucleotides deposited on silicon nanostructures / M.A. Fomin, N.T. Bagraev, A.L. Chernov, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko. – International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz, 2019. – P. 8874337.
- [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. – P. 963-967.
- [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. – P. 1588-1596.

Список литературы

- [1] Denning J. Exponential laws of computing growth / J. Denning, Ted G. Lewis. – Communications of the ACM, 2016. – V.60. – N.1. – p.54-65.
- [2] Dekker C. Electronic properties of DNA / C. Dekker, M. A. Ratner. – Physics World, 2001. – V.14. – p.29-33.
- [3] Liu J. Fluorophores and Their Applications as Molecular Probes in Living Cells / J. Liu, C. Liu, W. He. – Current Organic Chemistry. -2013. -V.17. - p.564.
- [4] 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. Chernov. – Journal of Applied Phys., 2019. – V.125. – p.225702.
- [5] Cheon H. Terahertz molecular resonance of cancer DNA / H. Cheon, H.-J. Yang, S.-H. Lee, Y. A Kim, J.-H. Son. – Scientific Reports, 2016. – V.6. – 37103. – p. 1-10.
- [6] Watson J.D. Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid / J.D. Watson, F.H.C. Crick. – Nature, 1953. – V. 171. – N. 4356. – p. 737–738.
- [7] Bezryadin A. Electrostatic trapping of single conducting nanoparticles between nanoelectrodes / A. Bezryadin, C. Dekker, G. Schmid. – Appl. Phys. Lett., 1997. – V.7. – p.1273.
- [8] Hasan, M.Z. Colloquium: Topological insulators / M.Z. Hasan, C.L. Kane. –Rev. Mod. Phys., 2010. – V. 82. – № 4. – p.3045-3068.
- [9] Buttiker M. Edge-state physics without magnetic fields / M. Buttiker. – Science, 2009. – V.325. – p.278.
- [10] Zyuzin A.A. RKKY interaction on surfaces of topological insulators with superconducting proximity effect / A. A. Zyuzin, D. Loss. – Phys. Rev.B, 2014 – V.90. – p. 125443-5.
- [11] Anderson P. W. Model for the Electronic Structure of Amorphous Semiconductors / P. W. Anderson. – Phys. Rev. Lett., 1975 – V.34. – p. 953.
- [12] Bagraev N. T. Tunneling negative-U centers and photo-induced reactions in solids / N.T. Bagraev, V.A. Mashkov. – Sol. St. Comm., 1984 – V.51, 7. – p.515-520.

- [13] Simanek E. Superconductivity at disordered interfaces / E. Simanek. – Solid State Comm., 1979. – V.32. – p.731-734.
- [14] Баграев Н.Т. Спин-зависимые процессы в одномерных неупорядоченных системах оборванных связей в полупроводниках / Н.Т. Баграев, А.И. Гусаров, В.А. Машков. – ЖЭТФ, 1987. – Т. 92 – № 3. – с. 968-988.
- [15] Баграев Н.Т. Спин-коррелированный перенос электронов по оборванным связям в полупроводниках / Н.Т. Баграев, А.И. Гусаров, В.А. Машков. – ЖЭТФ, 1989. – Т. 95. – № 4. – с. 1412-1429.