



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Руль Николай Игоревич

**Макроскопические квантовые эффекты в кремниевых
наноструктурах**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2024

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

Научный руководитель: **Баграев Николай Таймуразович**

старший научный сотрудник,

доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Дунаевский Сергей Михайлович
профессор
доктор физико-математических наук

Главный научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
г. Гатчина, Ленинградская обл.

Гудовских Александр Сергеевич
доктор технических наук

Ведущий научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «19» ноября 2024 года в 16:00
на заседании диссертационного совета У.1.3.8.34

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru в разделе «Календарь защит».

Автореферат разослан « » октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
У.1.3.8.34

Крупина Мария Алексеевна
кандидат физико-математических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия мировое научное сообщество сфокусировало внимание на исследованиях, ориентированных на создание принципиально новых квантовых устройств, в которых в макроскопических масштабах проявляются законы микромира. Безусловно, в этом направлении были достигнуты серьезные успехи. Однако, в основном, использование макроскопических квантовых явлений, обусловленных когерентным поведением носителей, наблюдались при сверхнизких температурах, позволяющих эффективно подавить электрон-электронное взаимодействие. В свою очередь, наиболее перспективными, очевидно, являются исследования образцов низкоразмерных полупроводниковых материалов, демонстрирующих макроскопические квантово-кинетические и интерференционные эффекты и позволяющие изучить их свойства при высоких температурах в слабых магнитных полях.

В исследуемых наноструктурах, отличающих их от современных аналогов, ключевую роль играют оболочки, ограничивающие краевые каналы и другие области интерференции носителей. Так, использование свойств оболочек интерференционных контуров, состоящих из дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией [1-5], позволяет наблюдать макроскопические квантовые эффекты при высоких температурах благодаря увеличению времени фазовой релаксации носителей. При этом увеличение времени фазовой релаксации одиночных носителей наиболее эффективно обеспечивается в результате туннелирования через центры бора с отрицательной корреляционной энергией, сопровождаемого их реконструкцией в процессе перезарядки.

Следует отметить, что процесс туннелирования одиночных носителей через дипольные центры с отрицательной корреляционной энергией, формирующие оболочки интерференционных контуров, сопровождается эффективным локальным охлаждением [3-7], что также способствует регистрации макроскопических квантовых эффектов при высоких температурах.

Предлагаемый в настоящей работе подход к изучению макроскопических квантовых эффектов основан на применении явления электромагнитной индукции, $I_{ind} = \Delta E / \Delta \Phi$, позволяющего использовать квантование магнитного потока с последующим захватом квантов потока на области интерференции одиночных носителей. Важной особенностью выбранного подхода является то, что для наблюдения макроскопических квантовых эффектов в низкоразмерных структурах на основе кремния не требуется каких-либо предварительных воздействий (селективной оптической накачки и/или охлаждения во внешнем магнитном поле).

Степень разработанности темы. Современные попытки решения отмеченной проблемы подавления электрон-электронного взаимодействия стимулировали интенсивное исследование свойств новых высокотемпературных сверхпроводников, эффектов, связанных с многократным андреевским отражением в низкоразмерных структурах [8; 9],

контролируемых майорановских [10-12] и андреевских молекулярных состояний [13-15], основанных на использовании эффекта Джозефсона, а также изучение топологических изоляторов [16].

К методам, позволяющим подавить электрон-электронное взаимодействие, препятствующее реализации квантового транспорта носителей, следует отнести теоретически предсказанное использование оболочек, состоящих из примесей d- и f-элементов [14; 15], а также отмеченных ранее центров с отрицательной корреляционной энергией, которые находят подтверждение в соответствующих экспериментах [3; 4; 17].

Использование в указанном случае центров с отрицательной корреляционной энергией представляется более перспективным подходом, обеспечивающим как возможность повышения критической температуры перехода в сверхпроводящее состояния в одномерных системах [6; 7; 18; 19], так и наблюдение макроскопических квантовых явлений при высоких температурах в низкоразмерных структурах на основе кремния.

Вышесказанное определяет **цель диссертационного исследования** – изучение таких макроскопических квантовых явлений, как осцилляции Ааронова – Бома, осцилляции де Гааза – ван Альфена, осцилляции Шубникова – де Гааза, квантовый целочисленный и дробный эффект Холла и квантовая лестница продольной проводимости, зарегистрированных при высоких, включая комнатную, температурах в слабых магнитных полях в низкоразмерных структурах на основе кремния.

Указанные макроскопические квантовые явления наблюдаются в кремниевых наносандвич-структурах, полученных на поверхности монокристаллического кремния (100) n-типа, являющихся **основным объектом исследования**. Кремниевые наносандвич-структуры обеспечивают возможность изучения макроскопических квантовых эффектов при высоких вплоть до комнатной температурах в слабых магнитных полях. Так, кремниевая наносандвич-структура представляет собой одиночную квантовую яму p-типа, ограниченную цепочками примесных дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией. Краевые каналы такой структуры представляют собой систему интерференционных контуров, содержащих одиночные носители в условиях подавления электрон-электронного взаимодействия. Количество интерференционных контуров, содержащих одиночные носители, определяется двумерной плотностью носителей в исследуемой структуре. Макроскопические квантовые эффекты в отмеченных интерференционных контурах являются **основным предметом исследования**.

В качестве дополнительного **объекта исследования** выступают тонкие эпитаксиальные пленки карбида кремния, выращенные на поверхности монокристаллического кремния методом самосогласованного замещения атомов.

Область исследования. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Задачи исследования:

1. Анализ явления квантовой интерференции в условиях подавления электрон-электронного взаимодействия путем использования оболочек краевых каналов полупроводниковых наноструктур, состоящих из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией, указывающий на увеличение времени фазовой релаксации носителей.
2. Измерение намагниченности кремниевых наносандвич-структур и тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния, выращенных на кремнии, для наблюдения осцилляций де Гааза – ван Альфена и Ааронова – Бома при высоких температурах в слабых магнитных полях.
3. Измерение осцилляций Шубникова – де Гааза и лестницы холловского сопротивления при высоких температурах для идентификации целочисленного и дробного квантового эффекта Холла, и сопоставление их характеристик с осцилляциями де Гааза – ван Альфена и параметрами краевых каналов кремниевых наносандвич-структур.
4. Регистрация продольной проводимости краевых каналов кремниевой наносандвич-структуры для обнаружения дробной квантовой лестницы проводимости, возникающей в процессе взаимодействия одиночных носителей с квантами магнитного потока вследствие явления электромагнитной индукции.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Впервые обнаружены осцилляции де Гааза – ван Альфена при комнатной температуре в слабых магнитных полях в низкоразмерных кремниевых структурах.
2. Впервые в результате исследования высокотемпературных осцилляций де Газа – ван Альфена и квантового эффекта Холла продемонстрировано влияние относительной ориентации внешнего магнитного поля и индивидуальных интерференционных контуров, содержащих одиночные носители в краевых каналах низкоразмерных структур на основе кремния.
3. Впервые обнаружена дробная квантовая лестница продольной проводимости краевых каналов низкоразмерных структур на основе кремния.
4. Впервые продемонстрирована возможность управления фазовыми соотношениями транспорта носителей, наблюдаемого при высоких температурах при регистрации фазовых сдвигов в характеристиках проводимости краевых каналов в отсутствие внешнего магнитного поля.
5. Впервые исследованы высокотемпературные квантовые осцилляции статической магнитной восприимчивости тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния, выращенных на кремнии методом самосогласованного замещения атомов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Изучаемые в диссертационном исследовании макроскопические квантовые явления в

низкоразмерных структурах на основе кремния могут быть объединены в единое семейство макроскопических квантовых эффектов на основе идеи взаимодействия одиночных носителей с квантами магнитного потока, а также в демонстрации общего подхода к описанию механизма нивелирования электрон-электронного взаимодействия в низкоразмерных структурах. Предложен экспериментальный подход, позволяющий использовать явление электромагнитной индукции при изучении макроскопических квантовых осцилляционных эффектов, равно как и дробной квантовой лестницы проводимости, при высоких температурах в широком интервале магнитных полей.

Методология и методы исследования. Методологическую основу диссертационного исследования составляют метод измерения статической магнитной восприимчивости и намагниченности образцов материалов при высоких температурах в условиях прохождения исследуемыми объектами последовательного ряда термодинамически равновесных состояний во внешнем магнитном поле (метод Фарадея); методы регистрации полевых зависимостей сопротивления (метод Холла и метод Ван дер Пау) и вольт – амперных характеристик многоконтактных низкоразмерных структур, отражающих природу транспорта носителей, равно как и интерференцию последних, результат которой наблюдается как в виде осцилляций на полевых зависимостях кинетических коэффициентов, так и в виде осцилляций проводимости в отсутствии внешнего поля.

Защищаемые положения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Наблюдаемые при высоких температурах макроскопические квантовые явления, а именно: осцилляции де Гааза – ван Альфена, осцилляции Шубникова – де Гааза, целочисленный и дробный квантовый эффект Холла в слабых магнитных полях, а также квантовая лестница продольной проводимости транспортных каналов, являются следствием электромагнитной индукции.
2. Экспериментально обнаруженные при комнатной температуре в низкоразмерных кремниевых структурах осцилляции де Гааза – ван Альфена, равно как и наблюдаемые высокотемпературные осцилляции Шубникова – де Гааза и квантовый эффект Холла, указывают на ключевую роль дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией, ограничивающих области интерференции одиночных носителей в транспортных каналах.
3. В низкоразмерных кремниевых структурах дробная квантовая лестница продольной проводимости транспортных каналов при высокой температуре наблюдается в зависимости от напряжения на поперечных холловских контактах, а соответствующий подбор величины тянущего тока и напряжения поперечного затвора обеспечивает фазовый контроль транспорта носителей.

4. Макроскопические квантовые явления в тонких эпитаксиальных пленках карбида кремния, выращенного на поверхности монокристаллического кремния, проявляются при высоких температурах в слабых магнитных полях в результате квантовой интерференции носителей на микродефектах.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных современных методов исследования с использованием экспериментального оборудования не ниже уровня мировых аналогов, многообразием используемых методик, а также высокой воспроизводимостью полученных результатов. Достоверность выводов диссертационной работы подтверждается соответствием экспериментальных результатов теоретическим выводам и полученным расчетным значениям.

Вклад автора в решение поставленных задач заключается в формулировании цели и задач диссертационной работы, в определении направлений экспериментальных исследований, их значимости и практической реализации. Все результаты диссертационного исследования, равно как и их описание, получены и выполнены автором лично.

Апробация работы. Работа выполнена при поддержке РЦНИ (ранее – РФФИ) в рамках научного проекта № 20-32-90130 «Квантовый спиновый эффект Фарадея в низкоразмерных кремниевых negative-U наносандвич-структурах при высоких температурах».

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 25^{ый} международный симпозиум “Nanostructures: Physics and Technology” (Санкт-Петербург, 2017 г.), международный симпозиум “Spin Waves 2018” (Санкт-Петербург, 2018 г.), международная конференция “Emerging Trends in Applied and Computational Physics (ETACP) 2019” (Санкт-Петербург, 2019 г.), международная конференция “International Youth Conference on Electronics, Telecommunication and Information Technologies (YETI) 2019” (Санкт-Петербург, 2019 г.), международная конференция “Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO-PR) 2020” (Сидней, 2020 г.), 14^{ая} международная конференция по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «КРЕМНИЙ 2022» (Новосибирск, 2022 г.), а также научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2015, 2017 и 2018 г.).

Публикация результатов исследования. По теме диссертационного исследования опубликованы 11 работ: 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в международные научные базы Scopus и Web of Science, 4 из которых относятся к журналам перечня ВАК РФ, и 6 работ в сборниках трудов конференций, входящих в базу РИНЦ. 3 из 6 представленных работ входят в международную научную базу Scopus, 2 из которых входят в международную научную базу Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 175 страницах и содержит 46 рисунков. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и списка работ, опубликованных автором по теме диссертации. Список литературы включает 172 наименований.

ОСНОВНОЕ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** диссертационной работы приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цель исследования, задачи, научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения по апробации работы.

В **первой главе** дано описание ключевых макроскопических квантовых явлений, среди которых следует отметить осцилляции Ааронова – Бома, эффекты Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена, квантовый эффект Холла, а также квантование проводимости одномерных каналов. Отмеченные явления составляют предмет исследования и изучаются в настоящей диссертационной работе. Особое внимание уделено описанию модели квантового гармонического осциллятора и реализации явления электромагнитной индукции для решения поставленных задач.

Во **второй главе** приведено описание исследуемой в работе планарной кремниевой наносандвич-структуры и её основные характеристики. Обсужден механизм эффективного подавления электрон-электронного взаимодействия в краевом канале, основанный на использовании в качестве оболочек краевого канала и других областей интерференции носителей дипольных центров бора, обладающих отрицательной корреляционной энергией (Рисунок 1).

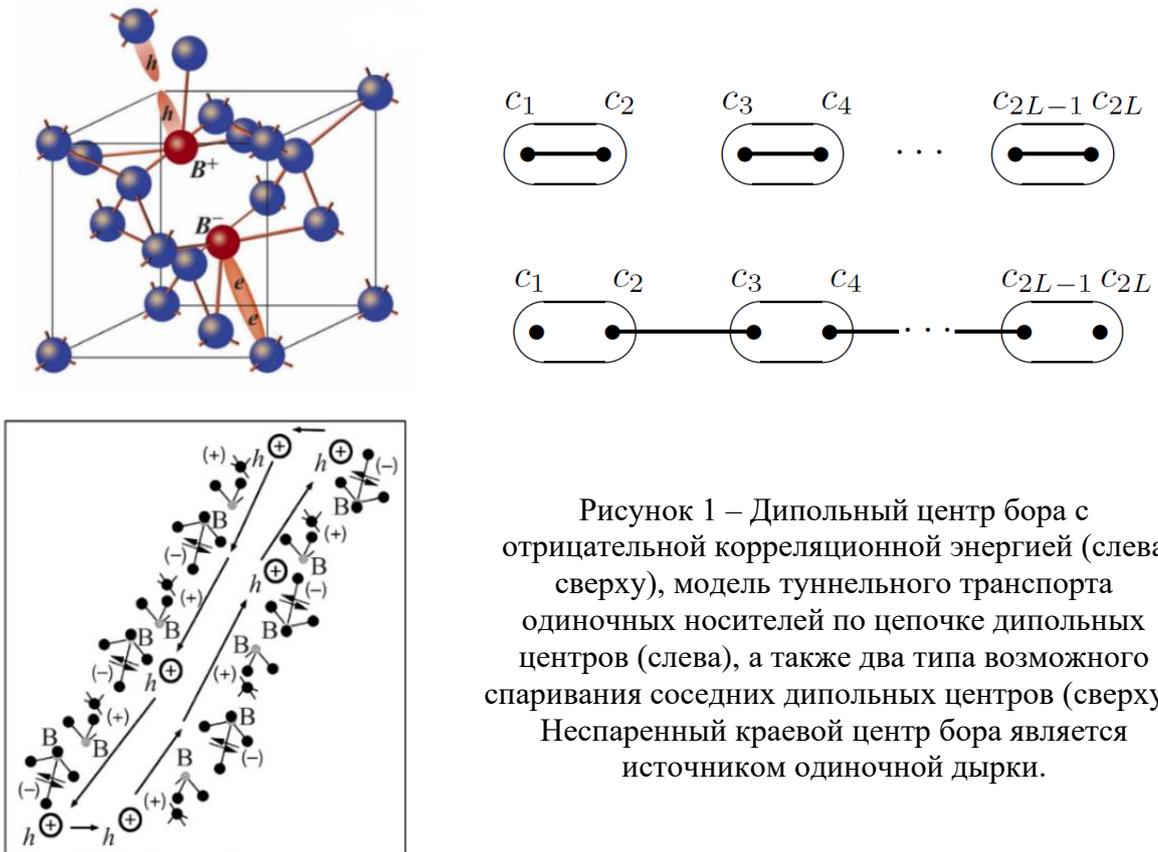


Рисунок 1 – Дипольный центр бора с отрицательной корреляционной энергией (слева сверху), модель туннельного транспорта одиночных носителей по цепочке дипольных центров (слева), а также два типа возможного спаривания соседних дипольных центров (сверху). Неспаренный крайовой центр бора является источником одиночной дырки.

Дано описание экспериментальных методов исследования, использованных в ходе выполнения диссертационной работы.

Третья глава содержит результаты исследования высокотемпературных осцилляций де Гааза – ван Альфена (Рисунок 2), экспериментально полученных в исследуемой низкоразмерной кремниевой структуре при температуре $T = 300\text{ K}$, а также квантового эффекта Холла и осцилляций Шубникова – де Гааза, полученных при температуре $T = 77\text{ K}$ в слабых магнитных полях (Рисунок 3) и строго согласующихся с осцилляциями де Гааза – ван Альфена. Представлены результаты исследования осцилляций статической магнитной восприимчивости, демонстрирующие процесс последовательного захвата квантов магнитного потока при их взаимодействии с одиночными носителями в соответствии с моделью квантового гармонического осциллятора, с последующим образованием композитных частиц [20] (Рисунок 4). Периоды осцилляций Ааронова – Бома (Рисунок 5), полученных экспериментально при $T = 77\text{ K}$ при исследовании кремниевой наносандвич-структуры, выполненной в холловской геометрии, при изменении магнитного поля, направленного вдоль плоскости кремниевой квантовой ямы параллельно протекающему продольному току исток-сток I_{ds} , находятся в соответствии с характеристиками интерференционных контуров в краевом канале.

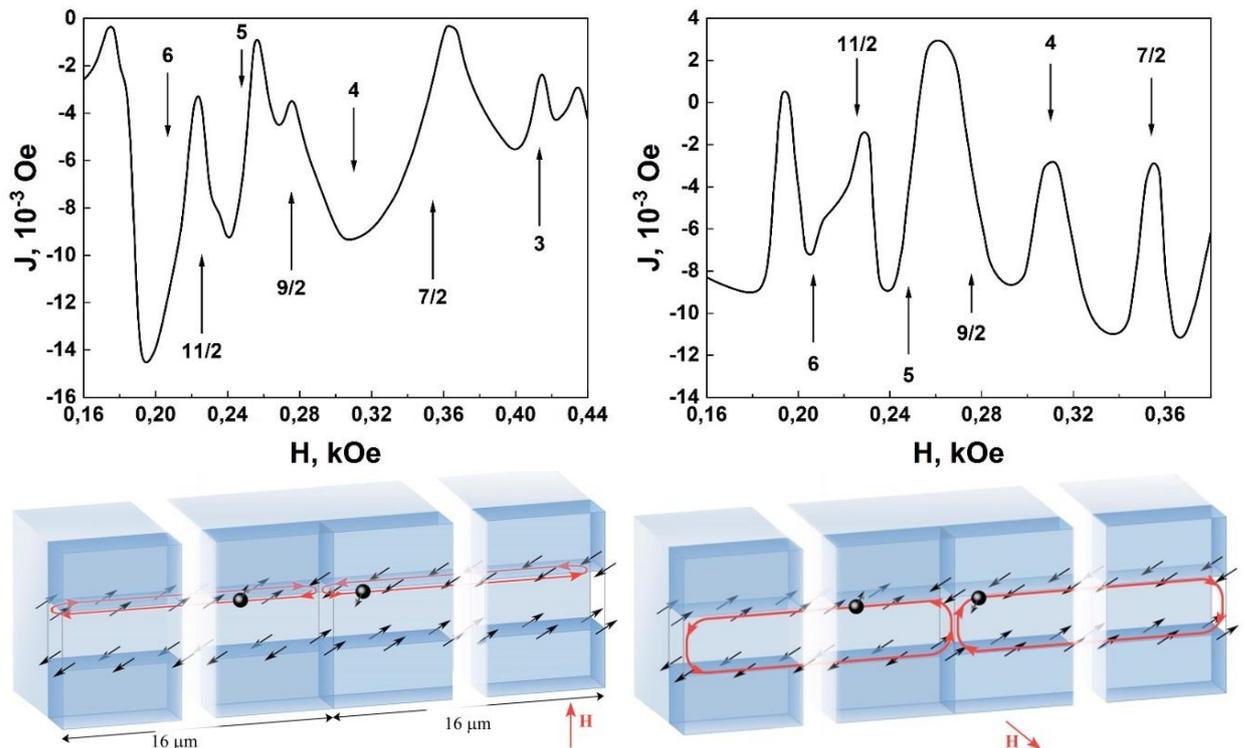


Рисунок 2, а – Осцилляции де Гааза – ван Альфена, обнаруженные на полевых зависимостях намагниченности кремниевой наносандвич-структуры при $T = 300\text{ K}$ в слабом магнитном поле, ориентированном перпендикулярно (слева) и параллельно (справа) плоскости исследуемой кремниевой наноструктуры

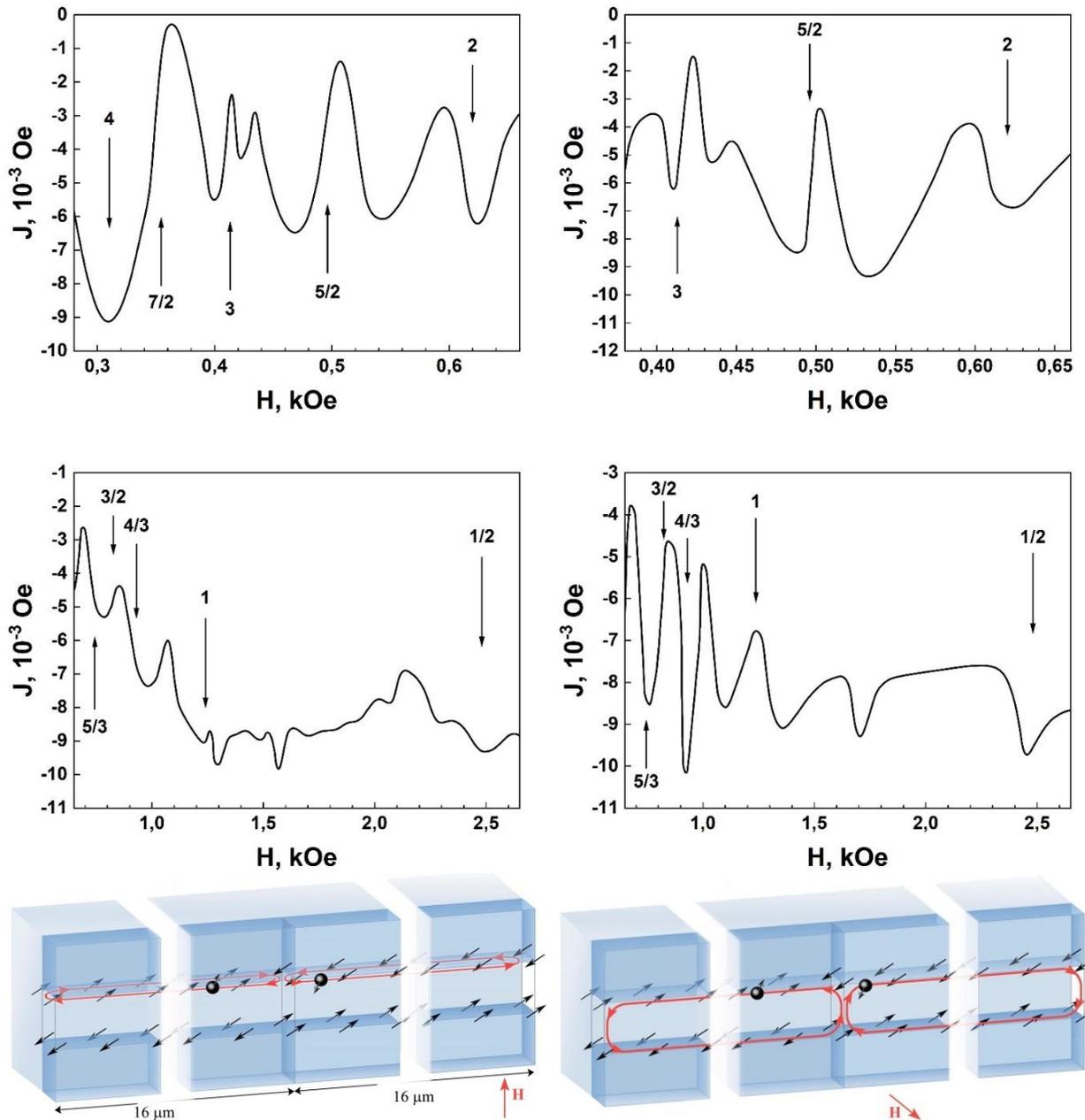


Рисунок 2, б – Осцилляции де Гааза – ван Альфена, обнаруженные на полевых зависимостях намагниченности кремниевой наносандвич-структуры при $T = 300\text{ K}$ в слабом магнитном поле, ориентированном перпендикулярно (слева) и параллельно (справа) плоскости исследуемой кремниевой наноструктуры

Четвертая глава содержит результаты исследования дробного квантования продольной проводимости краевых каналов кремниевой наносандвич-структуры (Рисунок 6), возникающего и наблюдаемого при температуре $T = 77\text{ K}$ под действием тянущего тока и напряжения поперечного затвора, выполненного в рамках холловской геометрии, приводящим к реализации транспорта носителей в интерференционных контурах. Представлены результаты исследования экспериментально обнаруженных при комнатной температуре квантовых осцилляций продольной проводимости краевых каналов (Рисунок 7), обусловленных формированием композитных частиц.

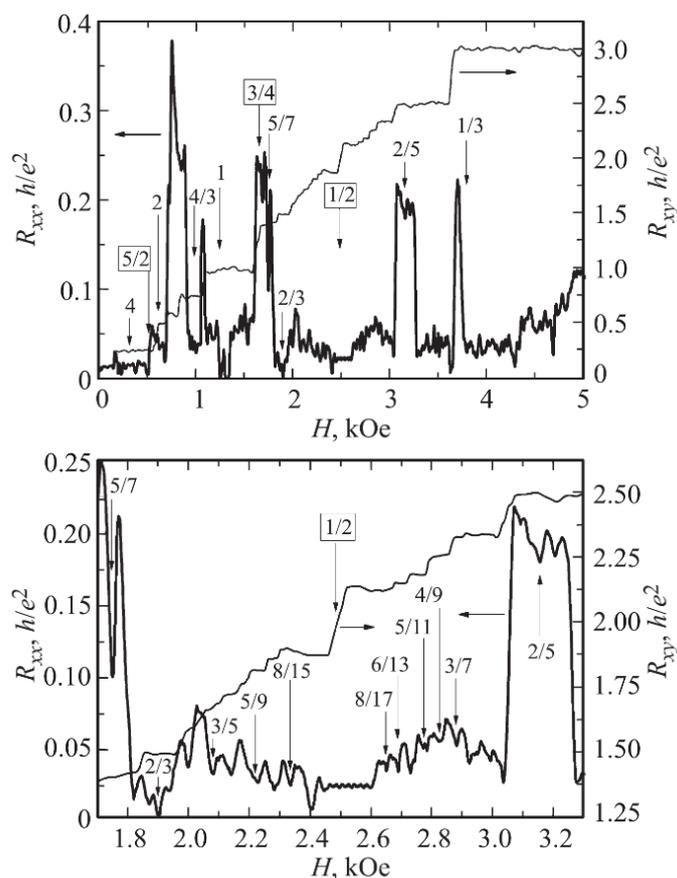


Рисунок 3 – Осцилляции Шубникова – де Гааза и квантовый эффект Холла в кремниевой наносандвич-структуре. Холловское сопротивление и продольное магнетосопротивление системы дырок с двумерной плотностью $n_{2D} = 3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$, полученные при стабилизированном токе исток-сток $I_{ds} = 10 \text{ нА}$ при $T = 77 \text{ К}$.

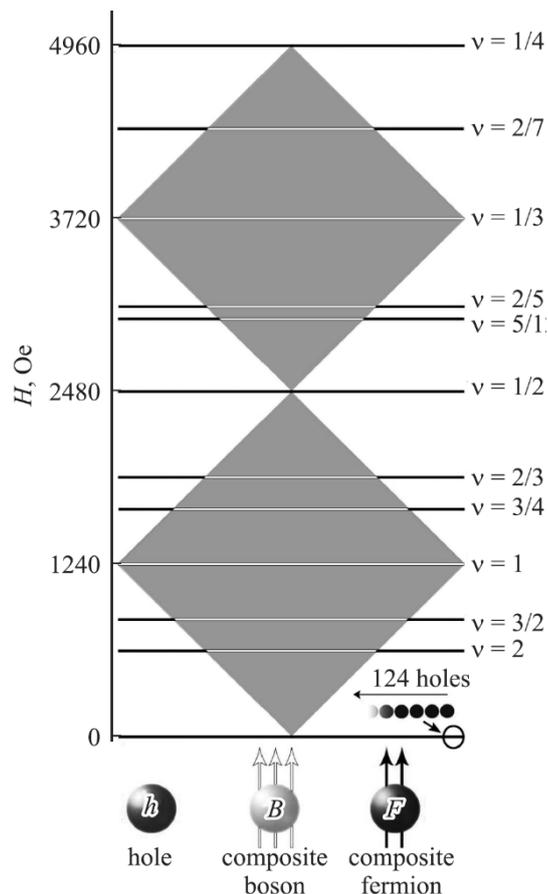


Рисунок 4 (сверху) – Диаграмма «магнитное поле – фактор заполнения краевого канала» демонстрирует условия формирования композитных бозонов (светлые) и фермионов (темные линии) в процессе изменения внешнего магнитного поля в результате захвата одиночных квантов магнитного потока на систему интерференционных контуров в краевом канале.

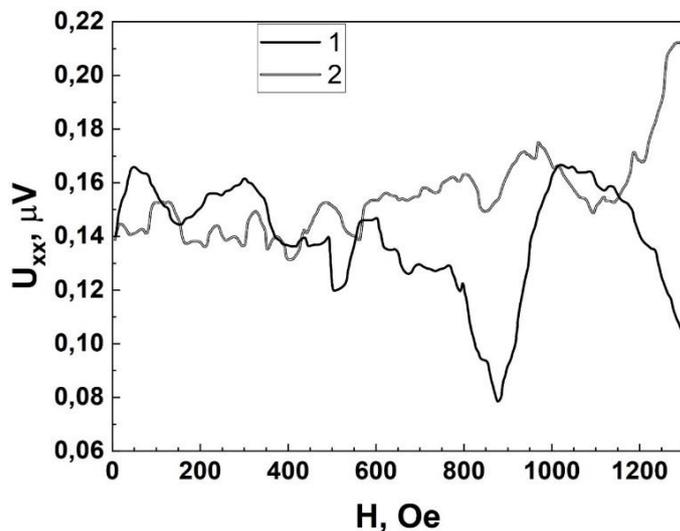


Рисунок 5 (слева) – Осцилляции Ааронова – Бома, полученные при исследовании кремниевой наносандвич-структуры, выполненной в холловской геометрии, при изменении магнитного поля, направленного вдоль плоскости кремниевой квантовой ямы параллельно протекающему продольному току исток-сток I_{ds} , $T = 77 \text{ К}$. Кривые 1 и 2 соответствуют противоположным направлениям магнитного поля.

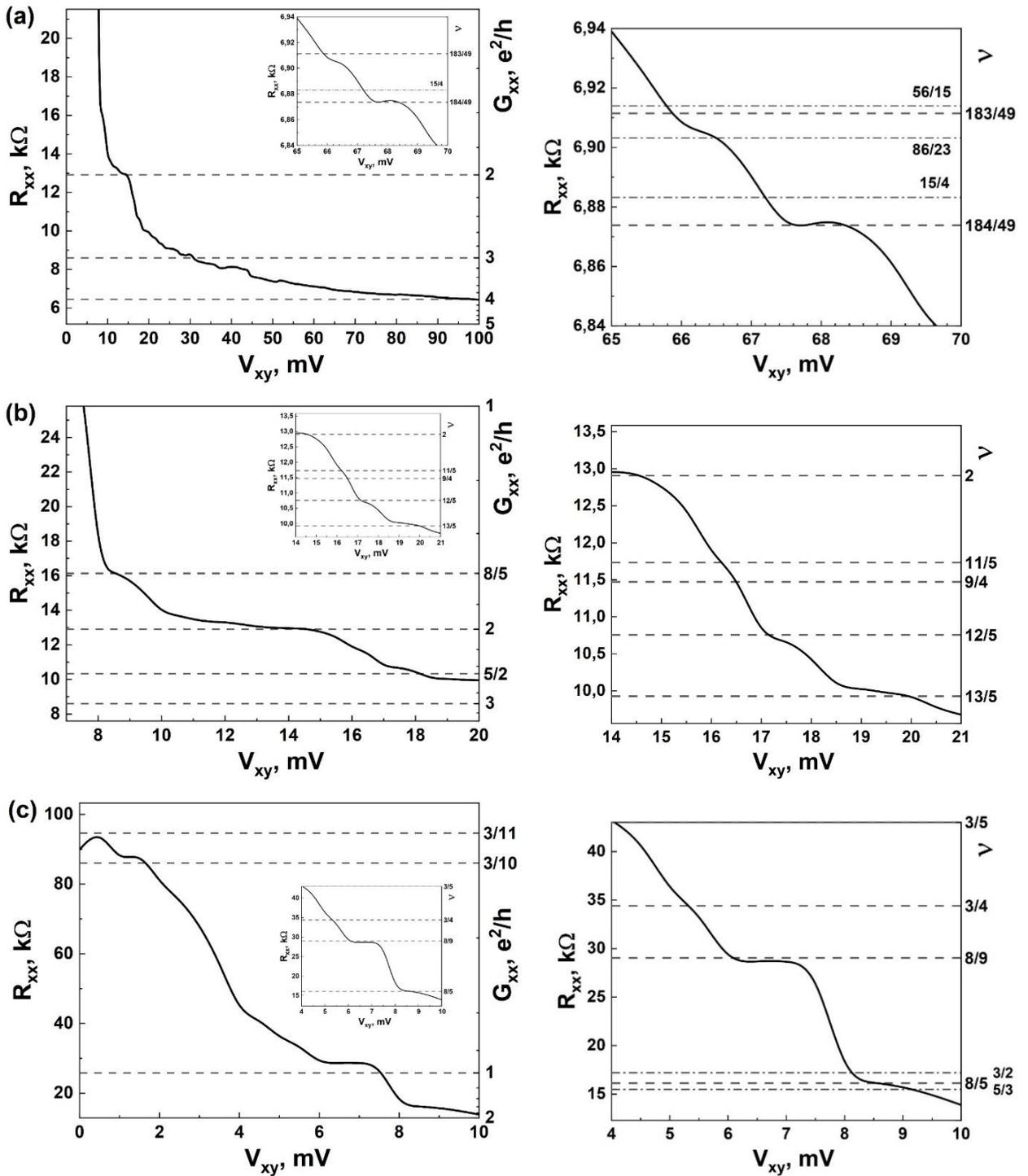


Рисунок 6 – Дробная квантовая лестница проводимости в зависимости от напряжения, приложенного к поперечному затвору в рамках холловской геометрии, $T = 77\text{ K}$, $n_{2D} = 3 \cdot 10^{13}\text{ м}^{-2}$, $I_{ds} = 0,5\text{ нА}$. (а) Проводимость краевого канала демонстрирует стандартные плато величины $2e^2/h$ и $3e^2/h$ с максимумом проводимости значением $4e^2/h$, продемонстрированы особенности вблизи фактора $\nu = 15/4$, (б) плато, соответствующие дробным факторам с четным и нечетным знаменателем, а также (с) проводимость краевого канала как функция напряжения на поперечном затворе в области значений, близких к «0,7-особенности» от величины $2e^2/h$.

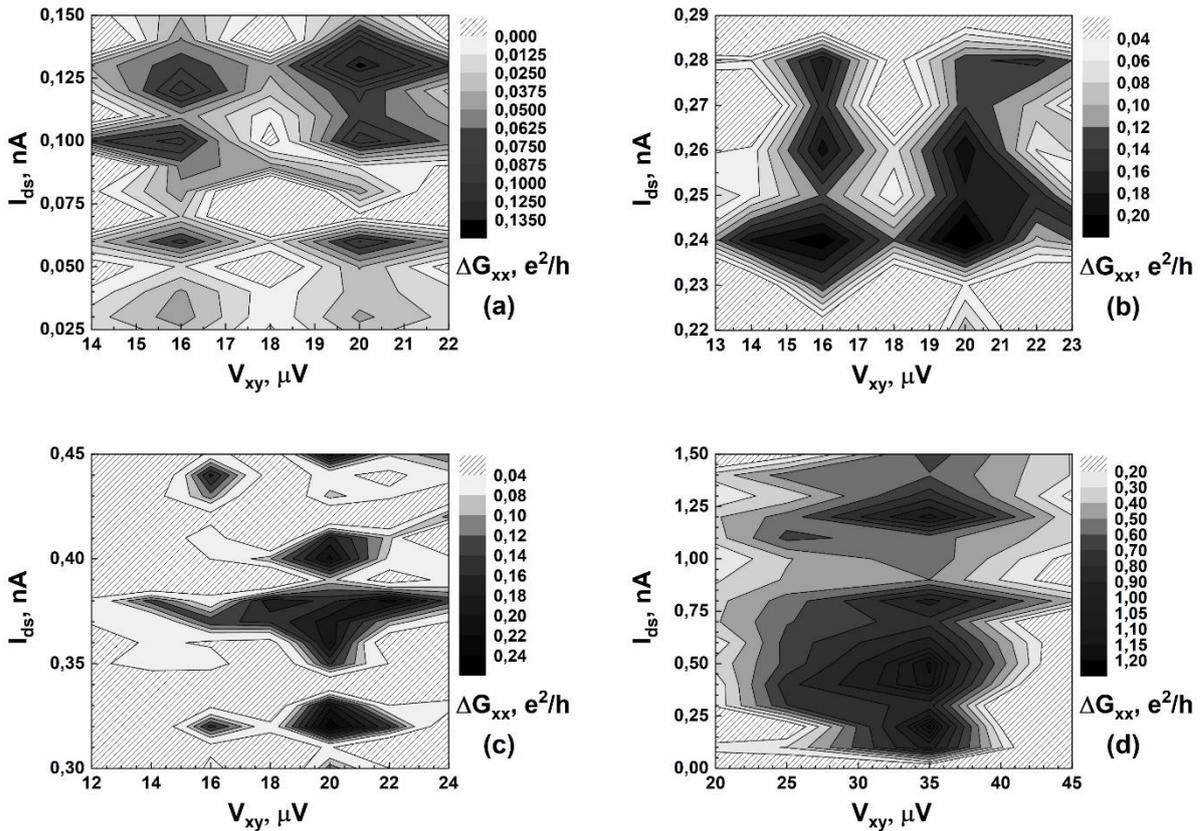


Рисунок 7, а – Квантовые осцилляции продольной проводимости краевого канала сверхузкой кремниевой квантовой ямы в зависимости как от напряжения на поперечном холловском затворе, так и значений стабилизированного тока исток-сток, полученные при $T = 300$ К. Фазовый сдвиг определяется количеством захваченных квантов магнитного потока $\Delta\Phi_V$ и $\Delta\Phi_I$ в область краевого канала.

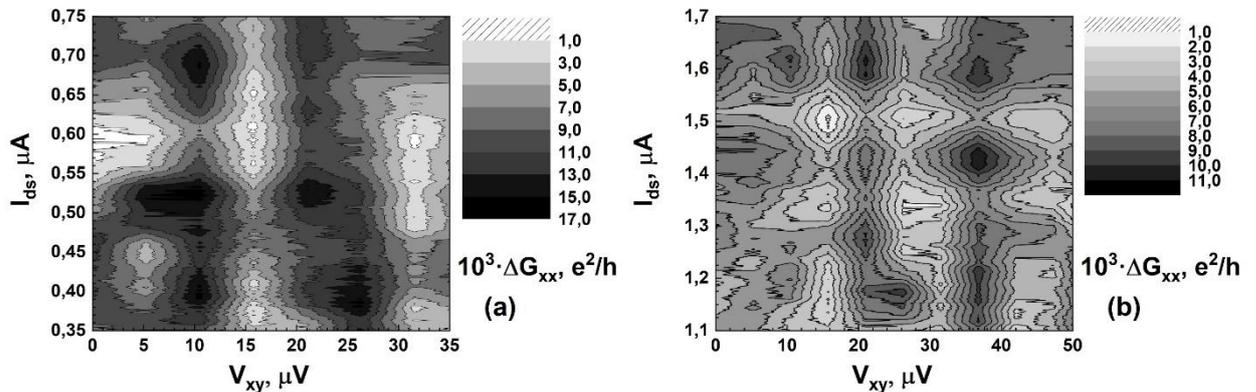


Рисунок 7, б – Квантовые осцилляции продольной проводимости краевого канала многотерминальной кремниевой наносандвич-структуры в зависимости от величины стабилизированного тока исток-сток (квантующий параметр) и напряжения на одном из поперечных холловских затворов (управляющий параметр), $T = 300$ К

Пятая глава содержит результаты измерения и анализа полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния, выращенных на поверхности (110) монокристаллического кремния методом согласованного замещения атомов, полученных при комнатной температуре в слабых магнитных полях. Дано

описание экспериментально обнаруженных квантовых осцилляций в полевых зависимостях магнитной восприимчивости (Рисунок 8), обусловленных интерференцией носителей заряда на микродефектах, состоящих из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией. Размеры дефектов, контролируемые структурными методами, согласуются с полученными результатами.

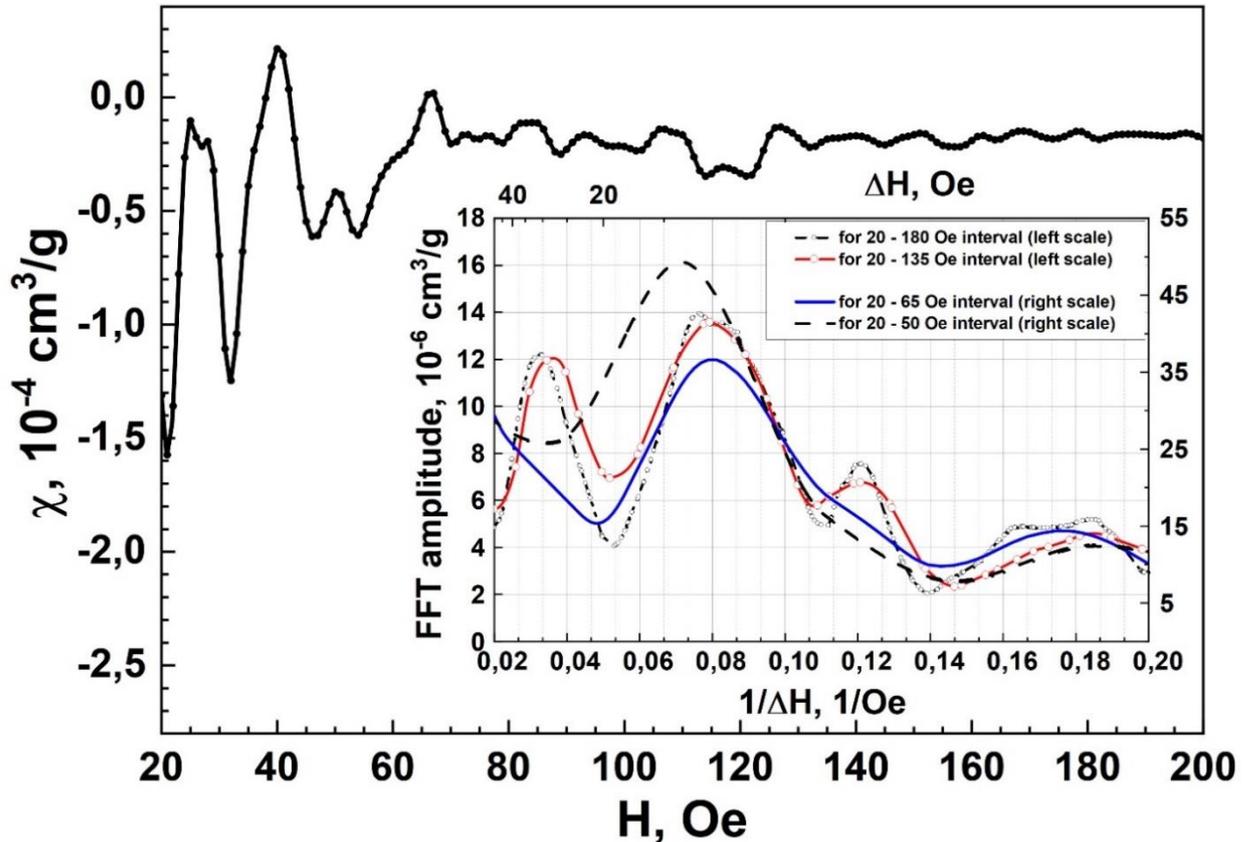


Рисунок 8 – Удельная магнитная восприимчивость и соответствующий ей Фурье-спектр, демонстрирующий существование двух- и одно-частичной интерференции носителей заряда в диапазоне магнитных полей до 180 Э, а также разрушение носителя, представляющего собой аналог куперовской пары, происходящее в окрестности магнитного поля напряженностью 50 Э, $T = 300$ К

В **заклучении** приведены основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛУЧЕНИЕ

На основе данных структурных исследований были описаны полупроводниковые наноструктуры на основе кремния, используемые в целях изучения макроскопических квантовых явлений, наблюдаемых при высоких, включая комнатную, температурах в слабых магнитных полях, а также в более широком интервале внешних магнитных полей и в их отсутствии. Предложен механизм, препятствующий возникновению электрон-электронного взаимодействия в исследуемых наноструктурах, обеспечивая тем самым

увеличение времени фазовой релаксации носителей, необходимое для наблюдения макроскопических квантовых эффектов.

Так, использование оболочки краевого канала, состоящей из дипольных центров бора, обладающих отрицательной корреляционной энергией, позволило эффективно подавить электрон-электронное взаимодействие в краевом канале, способствуя интерференции носителей внутри индивидуальных интерференционных контуров.

Показано, что подавление электрон-электронного взаимодействия при помощи цепочек дипольных negative-U центров способствует наблюдению макроскопических квантовых эффектов при высоких температурах в слабых магнитных полях, что позволяет использовать предложенную кремниевую наносандвич-структуру для изучения фундаментальных физических явлений.

Анализ методик, используемых для изучения макроскопических квантовых явлений, продемонстрировал целесообразность использования интерференционных контуров, содержащих одиночные носители и ограниченных дипольными центрами с отрицательной корреляционной энергией, в рамках модели квантового гармонического осциллятора.

Экспериментально полученные при температуре $T = 77 \text{ K}$ полевые зависимости холловского и продольного сопротивления, демонстрирующие квантование холловской проводимости и осцилляции Шубникова – де Гааза соответственно, находятся в полном согласии с осцилляциями де Гааза – ван Альфена, полученными при температуре $T = 300 \text{ K}$ в слабых магнитных полях.

Использование диаграммы «магнитное поле – фактор заполнения краевого канала» позволило наглядно продемонстрировать возможность интерпретации квантового эффекта Холла, наблюдаемого в слабых магнитных полях и приводящего к формированию композитных частиц посредством поэтапного последовательного захвата квантов магнитного потока при их взаимодействии с одиночными носителями.

Экспериментально продемонстрировано, что внешнее магнитное поле должно быть ориентировано, в первую очередь, перпендикулярно плоскости интерференционного контура, содержащего одиночный носитель, а не направлению тянущего тока, что было показано при исследовании результатов, полученных при различных ориентациях внешнего магнитного поля относительно направления тянущего тока.

Результаты исследования квантования проводимости краевых каналов в зависимости от напряжения, приложенного к поперечному затвору в рамках холловской геометрии, полученные при температуре $T = 77 \text{ K}$ в отсутствие внешнего магнитного поля, продемонстрировали дробные плато квантовой лестницы проводимости. Впервые обнаруженная экспериментально, дробная лестница продольной проводимости носителей в краевом канале исследуемой кремниевой наносандвич-структуры, позволила подтвердить вывод о спин-зависимом транспорте носителей в краевых каналах.

Поэтапный захват квантов магнитного потока при их взаимодействии с одиночными носителями с последующим образованием композитных частиц

идентифицирован экспериментально при регистрации осцилляций квантованной проводимости, наблюдаемых при комнатной температуре в зависимости как от величины тянущего тока, так и поперечного холловского напряжения в отсутствие внешнего магнитного поля. Полученная диаграмма проводимости продемонстрировала возможность управления фазовыми характеристиками транспорта носителей в краевых каналах при сочетании варьирования величины тянущего тока и напряжения на поперечном затворе.

Показано, что характер квантовых осцилляционных явлений, экспериментально наблюдаемых при комнатной температуре в слабых магнитных полях в тонких эпитаксиальных пленках карбида кремния, выращенного на кремнии методом самосогласованного замещения атомов, соответствует параметрам интерференционных контуров, ограниченных микродефектами, состоящими из дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией.

Список работ, опубликованных автором по теме исследования:

1. Руль, Н.И. Квантованная дробная проводимость краевых каналов кремниевых наносандвичей / Н.И. Руль, Н.Т. Баграев // Неделя науки СПбПУ. – 2015. – С. 307-309.
2. Bagraev, N.T. High-temperature quantum kinetic effect in silicon nanosandwiches / N.T. Bagraev, V. Yu. Grigoryev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, V.A. Mashkov, V.V. Romanov, N.I. Rul // Low Temperature Physics. – 2017. – Vol. 43. – №. 1. – P. 110-119.
3. Руль, Н.И. Вольт-амперные характеристики краевых каналов многотерминального кремниевого наносандвича / Н.И. Руль, Н.Т. Баграев // Неделя науки СПбПУ. – 2017. – С. 310-311.
4. Bagraev, N.T. High temperature quantum kinetic effects in silicon nanosandwiches / N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, V.S. Khromov, A.M. Malyarenko, N.I. Rul', V.A. Mashkov, T.V. Matveev, V.V. Romanov, K.B. Taranets // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52. – №. 4. – P. 478-484.
5. Руль, Н.И. Квантовый спиновый эффект Фарадея в многотерминальных структурах на основе кремниевых наносандвичей / Н.И. Руль, Н.Т. Баграев // Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 297-299.
6. Rul, N.I. Phase control of the fractional conductance of silicon nanosandwich-structures / N.I. Rul, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1236. – P. 012033.
7. Golovin, P.A. Phase inversion of THz radiation from silicon nanostructures / P.A. Golovin, N.I. Rul, N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1326. – P. 012005.
8. Golovin, P.A. The modulated phase controlled THz radiation from silicon nanosandwiches / P.A. Golovin, N.I. Rul', L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, N.T. Bagraev // 2020 Conference on Lasers and Electro-optics Pacific Rim. – 2020. – P. 9256082.
9. Руль, Н.И. Оптико-электрические фазовые характеристики кремниевых наносандвичей с отрицательной корреляционной энергией / Н.И. Руль,

- П.А. Головин, Н.Т. Баграев, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2021. – Т. 14. – №. 4. – С. 9-20.
10. Bagraev, N.T. Room-temperature quantum oscillations of static magnetic susceptibility of silicon-carbide epitaxial layers grown on a silicon substrate by the method of the coordinated substitution of atoms / N.T. Bagraev, S.A. Kukushkin, A.V. Osipov, V.V. Romanov, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, N.I. Rul' // Material Physics and Mechanics. – 2022. – Vol. 50. – №. 1. – P. 66-73.
11. Романов, В.В. Анализ экспериментальной кривой намагниченности кремниевого наносандвича с использованием численного моделирования / В.В. Романов, В.А. Кожевников, Ю.П. Яшин, Н.Т. Баграев, Н.И. Руль // Автометрия. – 2022. – Т. 58. – №. 6. – С. 64-70.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson, P. W. Model for the electronic structure of amorphous semiconductors // Physical Review Letters. – 1975. – Vol. 34. – №. 15. – P. 953-955.
2. Watkins, G. D. Negative-U properties for defects in solids // Advances in Solid State Physics. – 1984. – Vol. 24. – P. 163-189.
3. Баграев, Н.Т. Туннельные центры с отрицательным U и фотостимулированные реакции в полупроводниках / Н.Т. Баграев, В.А. Машков // Письма в ЖЭТФ. – 1984. – Т. 39. – №. 5. – С. 211-213.
4. Bagraev, N.T. A mechanism for two-electron capture at deep level defects in semiconductors / N.T. Bagraev, V.A. Mashkov // Solid State Communications. – 1988. – Vol. 65. – №. 10. – P. 1111-1117.
5. Драбкин, И.А. Спонтанная диссоциация нейтральных состояний примесей на положительно и отрицательно заряженные состояния / И.А. Драбкин, Б.Я. Мойжес // Физика и Техника Полупроводников. – 1981. – Т. 15. – С. 625.
6. Šimánek, E. Superconductivity at disordered interfaces // Solid State Communications. – 1979. – Vol. 32. – №. 9. – P. 731-734.
7. Ting, C. S. Possible mechanism of superconductivity in metal-semiconductor eutectic alloys / C.S. Ting, D.N. Talwar, K.L. Ngai // Physical Review Letters. – 1980 – Vol. 45. – №. 14. – P. 1213-1217.
8. Beenakker, C.W.J. Specular Andreev reflections in graphene // Physical Review Letters. – 2006. – Vol. 97. – №. 6. – P. 067007.
9. Bagraev, N.T. Quantum supercurrent transistor in silicon quantum wells confined by superconductor barriers / N.T. Bagraev, E.Yu. Danilovsky, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev, R.V. Kuzmin, A.M. Malyarenko, W. Gehlhoff, V.V. Romanov // Journal of Modern Physics. – 2011. – Vol. 2. – №. 4. – P. 256-273.

10. Lutchyn, R.M. Majorana Fermions and a Topological Phase Transition in Semiconductor-Superconductor Heterostructures / R.M. Lutchyn, J.D. Sau, S. Das Sarma // *Physical Review Letters*. – 2010. – Vol. 105. – P. 077001.
11. Beenakker, C.W.J. Search for Majorana Fermions in Superconductors // *Annual Review of Condensed Matter Physics*. – 2013. – Vol. 4 – P. 113-136.
12. Mourik, V. Signatures of Majorana Fermions in Hybrid Superconductor-Semiconductor Nanowire Devices / V. Mourik, K. Zuo, S.M. Frolov, S.R. Plissard, E.P.A.M. Bakkers, L. Kouwenhoven // *Science*. – 2012. – Vol. 336. – №. 6084. – P. 1003-1007.
13. Moehle, C.M. Controlling Andreev bound states with the magnetic vector potential / C.M. Moehle, P.K. Rout, N.A. Jainandunsing, D. Kuir, C.T. Ke, C. Thomas, M.J. Manfra, M.P. Nowak, S. Goswami // *Nano Letters*. – 2022. – Vol. 22. – №. 21. – P. 8601-8607.
14. Klinovaja, J. Topological superconductivity and Majorana fermions in RKKY systems / J. Klinovaja, P. Stano, A. Yazdani, D. Loss // *Physical Review Letters*. – 2013. – Vol. 111. – P. 186805.
15. Zyuzin, A.A. RKKY interaction on surfaces of topological insulators with superconducting proximity effect / A.A. Zyuzin, D. Loss // *Physical Review B: Condensed Matter and Material Physics*. – 2014. – Vol. 90. – №. 12. – P. 125443.
16. Hasan, M.Z. Colloquium: Topological insulators / M.Z. Hasan, C.L. Kane // *Review of Modern Physics*. – 2010. – Vol. 82. – №. 4. – P. 3045-3068.
17. Bagraev, N.T. Superconductor Properties for Silicon Nanostructures / N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, A.A. Kudryavtsev, A.M. Malyarenko, V.V. Romanov // *Superconductivity – Theory and Applications, SCIYO, Croatia, 2010. Chap. 4.* – P. 69-92.
18. 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.
19. 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.
20. Штёрмер, Х. Дробный квантовый эффект Холла // *Успехи Физических Наук*. – 2000. – Т. 170. – №. 3. – С. 304.