

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

Подпись аспиранта

Руль Николай Игоревич

ФИО аспиранта

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В КРЕМНИЕВЫХ
НАНОСТРУКТУРАХ

наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)

Физико-математические науки,

1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)

Физика конденсированного состояния, 03.06.01 Физика и астрономия

наименование направленности (шифр и наименование направления)

Академическая степень **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный
руководитель:

д.ф.-м.н., профессор кафедры физики
Баграев Николай Таймуразович

*ученая степень, ученое звание, должность,
ФИО полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен на кафедре физики Физико-механического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Баграев Николай Таймуразович
д.ф.-м.н., профессор кафедры физики

Рецензент:

Яфясов Адиль Абдул Меликович,
д.ф.-м.н., профессор кафедры
Электроники твердого тела
Физического факультета СПбГУ

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Актуальность темы.

В последнее время научное сообщество сфокусировало свое внимание на разработке компонентной базы для создания принципиально новых квантовых приборов, работа которых основана на высокотемпературных макроскопических квантовых явлениях. Несмотря на достижения научного сообщества в решении этой проблемы, существенный минус всех разрабатываемых устройств заключается в необходимости использования близких к нулю рабочих температур. Дело в том, что основным механизмом нарушения когерентности в исследуемых системах, необходимой для наблюдения макроскопических квантовых эффектов, является электро-электронное взаимодействие, для подавления которого обычно используются сверхнизкие температуры. Тем не менее, решение задачи развития новой компонентной базы может быть найдено в рамках исследования представляемых в работе кремниевых низкоразмерных структур.

Новый подход к описанию макроскопических квантовых электромагнитных явлений основан на использовании квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея, основу которого составляет квантование магнитного потока и процесс захвата одиночных квантов магнитного потока на области интерференции носителей заряда, возникающие в низкоразмерных кремниевых структурах без предварительного воздействия. Одним из ключевых результатов этого подхода является демонстрация возможности объединения макроскопических квантовых электромагнитных эффектов в единую группу явлений, описываемых в рамках квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея.

Важной особенностью исследуемых структур является роль оболочки или, иными словами, границы, ограничивающей краевые каналы. Взаимодействие одиночных носителей тока с границами канала позволяет нивелировать электрон-электронное взаимодействие между самими носителями, что в свою очередь резко уменьшает эффективную температуру в канале, тем самым позволяя наблюдать макроскопические квантовые явления при высоких температурах окружающей

систему среды. Более того, в этом случае носители в краевом канале находятся в изоляции друг от друга, то есть пребывают внутри отдельных квантовых «боксов», тем самым демонстрируя наличие квантованного сопротивления величиной h/e^2 . Следует учесть, что транспорт одиночных носителей внутри «боксов» происходит исключительно вдоль их границ.

Для свободных носителей в краевых каналах двумерных систем, находящихся во внешнем магнитном поле, Р. Б. Лафлину удалось построить теорию, описывающую целочисленный квантовый эффект Холла. Однако в рамках свободных носителей теория Лафлина не позволяла описать в полной мере дробный квантовый эффект Холла. Изоляция и локализация носителей заряда исправляет эту ситуацию. С прибытием в локализованные состояния носителей квантов магнитного потока открываются возможности распространения квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея на случай дробного квантового эффекта Холла.

Таким образом, краевые каналы в условиях подавления электрон-электронного взаимодействия представляют собой в зависимости от условий последовательное или параллельное соединение квантовых «ящиков», тем самым открывая большие возможности, с одной стороны, в целях построения логики для вычислительных операций, а, с другой стороны, для изучения взаимодействия одиночных носителей заряда с квантами магнитного потока.

В отличие от выражения, полученного Лафлином для свободных носителей в краевых каналах, предлагаемый подход применяется для исследования системы поляризованных по спину носителей заряда. Иными словами, транспорт носителей в топологических краевых каналах исследуемых низкоразмерных систем является спин-поляризованным (спинозависимым), что подтверждается наблюдением квантового спинового эффекта Холла. Изучение представленных кремниевых наноструктур методом циклотронного резонанса продемонстрировало наличие большого значения времени фазовой релаксации (неупругого рассеяния) носителей заряда, связанного с эффективным подавлением электро-электронного взаимодействия вследствие протекания так

называемой negative-U реакции, обусловленной реконструкцией дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией. Стоит отметить, что negative-U реакция – это самый лучший способ подавления электрон-электронного взаимодействия за счет соответствующего значения отрицательной корреляционной энергии.

Предлагаемый подход не только подтверждает факт отсутствия качественных отличий между целочисленным и дробным квантовым эффектом Холла, но и даёт возможность утверждать о наличии близкой взаимосвязи между макроскопическими квантовыми явлениями, возникающими во внешних магнитных полях, и эффектами, наблюдаемыми в отсутствие внешних магнитных полей, такими как, например, квантованная проводимость, для наблюдения которой необходимо исключительно присутствие стабилизированного тока и поперечного электрического поля. Иными словами, в рамках предлагаемого подхода квантовая лестница проводимости является прямым аналогом квантового эффекта Холла. Подобные утверждения основаны на сравнительном анализе результатов исследования высокотемпературного квантового эффекта Холла и контролируемого фазового транспорта носителей заряда в низкоразмерных кремниевых структурах, проявляющегося в дробном квантовании проводимости при комнатной температуре. Более того, описание возможности фазового контроля электрического транспорта исключительно электрическим воздействием приводится именно в рамках квантового аналога одного из основных законов электромагнетизма – закона Фарадея, и использованием выражения, применяемого при описании эффекта Ааронова – Бома, отражающего квантовую интерференцию носителей во внешних магнитных полях. При этом дробность квантования проводимости обеспечивается масштабируемостью системы невзаимодействующих друг с другом вследствие подавления электрон-электронного взаимодействия носителей заряда.

Возможность наблюдения макроскопических квантовых явлений при высоких вплоть до комнатной температурах обеспечивается эффективным локальным охлаждением, происходящим за счёт движения одиночных носителей

по дипольным центрам с отрицательной корреляционной энергией, ограничивающим краевые каналы и области квантовой интерференции: в ходе этого транспортного процесса дипольные центры, распариваясь, забирают тепло из ближайшего окружения. Иными словами, в «рабочем» состоянии, обеспечивающем возможность наблюдения и исследования высокотемпературных макроскопических квантовых эффектов, система всегда эффективно охлаждена.

Таким образом **актуальность** представленной работы обеспечивается необходимостью исследования макроскопических квантовых явлений, возникающих в низкоразмерных кремниевых структурах при высоких температурах вплоть до комнатной, возможностью их описания в рамках квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея и объединения в единое семейство электромагнитных эффектов за счет общей идеи захвата одиночных квантов магнитного потока и формирования композитных частиц.

Объектом исследования являются низкоразмерные кремниевые структуры, технология получения которых позволяет регистрировать и исследовать макроскопические квантовые эффекты при высокой вплоть до комнатной температуре.

Предметом исследования являются квантовый эффект Холла, дробная лестница проводимости и контролируемый фазовый транспорт носителей заряда в низкоразмерных кремниевых структурах; область применения квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея, а также возможность анализа представленных эффектов.

Целью работы является обнаружение, исследование и описание электромагнитных макроскопических квантовых эффектов в низкоразмерных кремниевых структурах при высоких температурах вплоть до комнатной в рамках квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Регистрация дробного квантования проводимости краевых каналов кремниевых negative-U наносандвичей при комнатной температуре и сравнения с результатами измерения лестницы холловского сопротивления.

2. Исследование возможности фазового контроля электрического транспорта в рамках квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея.

3. Регистрация осцилляций Ааронова – Бома в слабых магнитных полях в зависимостях статической магнитной восприимчивости тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния на поверхности (110) монокристаллического кремния при комнатной температуре, а также анализ полученных осцилляций в рамках процесса захвата одиночных квантов магнитного потока на микродефектах исследуемой структуры, описание которого приводится с использованием квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея.

Научная новизна

1. Разработка общего подхода к описанию высокотемпературной квантовой интерференции и макроскопических квантовых электромагнитных явлений в рамках квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея.

2. Регистрация макроскопических квантовых явлений в исследуемых низкоразмерных кремниевых структурах при высоких температурах вследствие эффективного локального охлаждения областей квантовой интерференции за счёт наличия локальной фононной моды, обусловленной реконструкцией дипольных центров с отрицательной корреляционной энергией.

3. Регистрация фазовых сдвигов в характеристиках проводимости краевых каналов кремниевых negative-U наносандвичах, а также демонстрация возможности контроля фазовых соотношений транспорта носителей при высоких температурах с использованием только электрического воздействия на носители заряда в отсутствие внешнего магнитного поля.

4. Регистрация высокотемпературных макроскопических явлений в тонких эпитаксиальных пленках карбида кремния при комнатной температуре.

Практическая значимость работы состоит в возможности реализации на базе исследуемых низкоразмерных кремниевых структур квантовых приборов, в

частности, квантовых регистров и квантовых вычислительных систем, основанных на использовании высокотемпературных управляемых фазовых сдвигов в характеристиках проводимости.

Методологическую основу исследования составляют методы регистрации вольт-амперных характеристик транспорта носителей в исследуемых структурах, выполненных в холловской геометрии, использующие высокоточное оборудование; методы измерения статической магнитной восприимчивости низкоразмерных кремниевых структур. Кроме того, для описания и анализа полученных результатов используются элементы Фурье-анализа.

Достоверность научных результатов определяется использованием высокоточного и высокочувствительного оборудования, сравнительным анализом результатов исследования макроскопических квантовых эффектов, полученных при наличии и в отсутствие внешнего магнитного поля, а также анализом полученных результатов с использованием специализированных программ обработки данных.

Апробация работы

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

Основные результаты работы докладывались и представлялись на следующих международных конференциях: International Conference on Emerging Trends in Applied and Computational Physics 2019 (ETACP 2019), International Youth Conference on Electronics, Telecommunication and Information Technologies (YETI 2019), Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2020), 45th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2020).

Личный вклад автора

Все результаты диссертационного исследования получены лично автором.

Публикации

Основные результаты работы изложены в 7 публикациях, входящих в наукометрическую базу Scopus, из которых 3 опубликованы в журналах, индексируемых ВАК. Полный список публикаций приведен в завершении текста научного доклада.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы Научно-квалификационной работы. Объясняется необходимость исследования макроскопических квантовых эффектов в низкоразмерных кремниевых структурах при высоких температурах. Обозначается цель работы, ставятся задачи, которые необходимо решить, а также формулируются научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу рассматриваемой проблематики. Произведён исторический обзор развития методов исследования и описания классических электромагнитных явления, а также анализ развития квантовой физики и последующего исследования макроскопических квантовых эффектов. Дается подробный анализ таких эффектов, как эффекты Джозефсона и эффект Ааронова – Бома, основанных, в первую очередь, на квантовании магнитного потока. Кроме того, приводится подробное описание целочисленного и дробного квантового эффекта Холла, эффектов Шубникова – де Гааза и де Гааза – ван Альфена, возникающих в исследуемых кремниевых низкоразмерных наноструктурах и связанных с квантованием Ландау. Обсуждается ключевая роль закона электромагнитной индукции, необходимость перехода к квантовому аналогу электромагнитной индукции Фарадея, основанному на поэтапном захвате одиночных квантов магнитного потока на области квантовой интерференции, а также необходимый переход к композитным частицам, участвующим в низкоразмерном транспорте.

Во второй главе производится описание исследуемой в работе кремниевой negative-U наносандвич-структуры, описание и сравнительный анализ квантования проводимости представленных низкоразмерных структур и результатов исследования квантового эффекта Холла.

Кремниевая negative-U наносандвич-структура изображена на рисунке 1. Данная структура представляла собой сверхузкую кремниевую квантовую яму p -типа шириной 2 нм (p -Si-QW), ограниченную сильно легированными бором δ -барьерами шириной 3 нм каждый. Концентрация бора в δ -барьерах достигает значения $N(B) = 5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Исследуемая квантовая яма получена на поверхности (100) n -Si (рисунок 1, а). Образец выполнен в рамках холловской геометрии путем предварительного окисления кремния и дальнейшей краткосрочной диффузии бора из газовой фазы. Было показано, что атомы бора внутри δ -барьеров выстраиваются в ориентированные последовательности тригональных дипольных центров $B^- + B^+$ с отрицательной корреляционной энергией, являющихся результатом протекания negative-U реакции: $2B^0 \rightarrow B^- + B^+$. Двумерная плотность носителей заряда в p -Si-QW, вычисленная из холловских измерений, $n_{2D} = 3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$.

Обнаруженное ранее увеличение времени фазовой релаксации носителей заряда в исследуемых кремниевых структурах вследствие подавления электрон-электронного взаимодействия за счёт формирования дипольных центров бора с отрицательной корреляционной энергией делает возможным наблюдение макроскопических квантовых явлений при высокой (комнатной) температуре. При этом наиболее эффективное подавление электрон-электронного взаимодействия достигается внутри краевых каналов кремниевой квантовой ямы. Следует отметить, что величина отрицательной корреляционной энергии $2\Delta = 44 \text{ meV}$ определяется степенью компенсации электрон-электронного взаимодействия доминирующим электрон-колебательным взаимодействием вследствие наличия локальной фононной моды и указывает на возможность наблюдения макроскопических квантовых явлений при высоких температурах.

Действительно, упомянутая локальная фононная мода, обусловленная реконструкцией дипольных центров бора, может приводить к эффективному локальному охлаждению структуры, находящейся при высокой температуре.

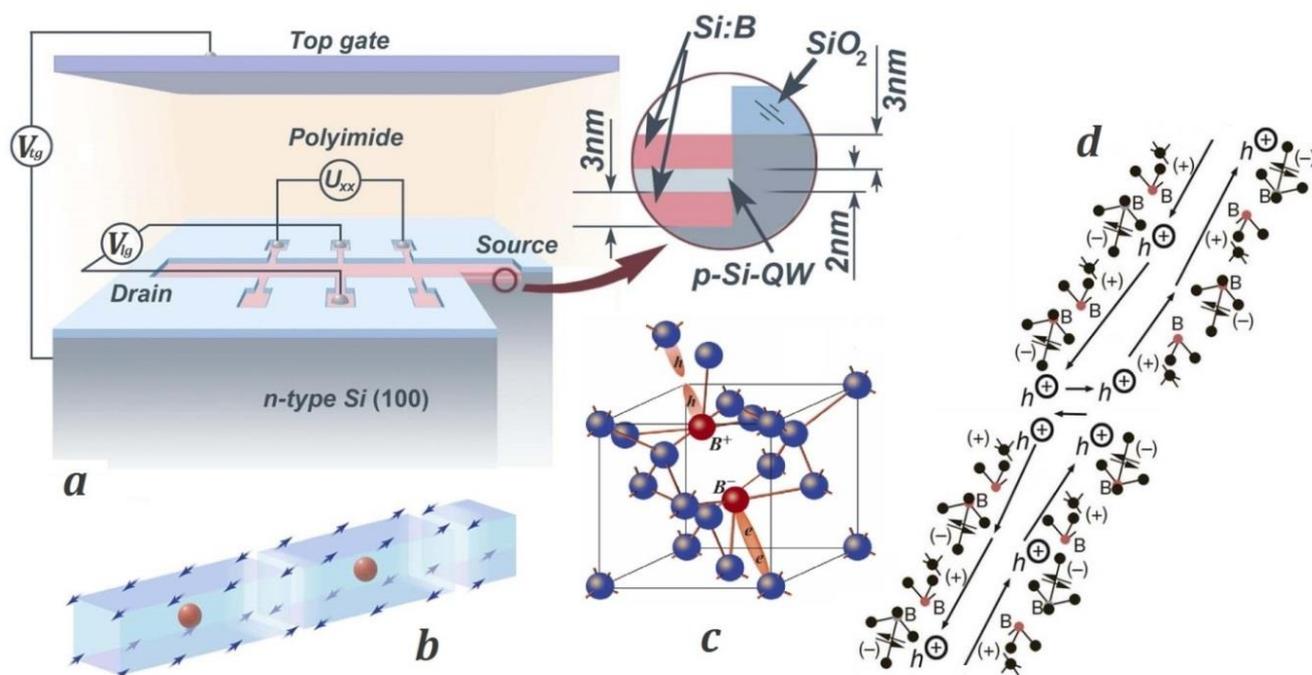


Рисунок 1 – **a** – Кремниевая negative-U наносандвич-структура. Характеристики квантовой ямы и δ -барьеров, поперечный (V_{lg}) и вертикальный затворы (V_{tg}) в рамках холловской геометрии, а также продольные измерительные контакты (U_{xx}) продемонстрированы на рисунке.

b – Модель краевого канала кремниевого наносандвича, в рамках которой одиночные носители заряда (дырки) ограничены кристаллографически ориентированными дипольными центрами.

c – Тригональный дипольный центр бора с отрицательной корреляционной энергией $2\Delta = 44 \text{ meV}$.

d – Модель транспорта носителей в крайном канале, демонстрирующая квази-одномерные последовательности дипольных центров бора, ограничивающие крайевые каналы кремниевой наносандвич-структуры.

Вследствие эффективного подавления электрон-электронного взаимодействия, дырки, находящиеся внутри краевых каналов, формируют цепочки квантовых гармонических осцилляторов, которые при условии пропускания через краевые каналы кремниевой negative-U наносандвич-структуры стабилизированного тока исток-сток индуцируют появление магнитного поля. В свою очередь, согласно предлагаемой модели, возникающие в этом процессе кванты магнитного потока «захватываются» на краевые каналы (рисунок 1, b), создавая в результате квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея индуцированный ток $I_{\text{ind}} = \Delta E / \Delta \Phi$. $\Delta \Phi = \Delta n \Phi_0$, где Φ_0 – квант магнитного потока.

Следует отметить, что под квантовым аналогом электромагнитной индукции Фарадея подразумевается выражение, похожее на полученное Р. Б. Лафлином, но описывающее систему поляризованных по спину носителей заряда в краевых каналах исследуемых наносандвич-структур. В отсутствие диссипации это выражение представляет собой фарадеевский закон электромагнитной индукции. Полученное выражение использовалось для описания квантового транспорта частиц во внешнем магнитном поле и не имело ничего общего с магнитооптическим эффектом Фарадея. Ключевыми особенностями представленного подхода выступали отсутствие внешнего магнитного поля и возможность изменять энергию частиц за счет прикладываемой к горизонтальным затворам разности потенциалов. Другими словами, исследуемое в работе выражение есть ни что иное как квантовый аналог электромагнитной индукции для случая, когда изменение магнитного потока, индуцированного за счет пропускания тока, соответствует конкретному числу квантов магнитного потока, захватываемого на площадь исследуемой кремниевой negative-U наноструктуры или, как продемонстрировано в третьей главе, в случае наличия внешнего магнитного поля, на характерных областях локализации носителей заряда.

Топологические и сверхпроводящие свойства краевых каналов исследуемых низкоразмерных структур были подтверждены исследованием многочисленных макроскопических квантовых эффектов. Среди них дробная квантовая лестница

проводимости дырок в краевых каналах, квантовый целочисленный и дробный эффект Холла (в том числе и квантовый спиновый эффект Холла), осцилляции Шубникова – де Гааза, осцилляции де Гааза – ван Альфена, а также многократное андреевское отражение соответственно.

Вольт-амперные характеристики краевых каналов кремниевых negative-U наносандвич-структур демонстрируют дробное квантование продольной проводимости, зависящее как от величины пропускаемого стабилизированного тока исток-ток в качестве квантующего параметра, так и от величины напряжения поперечного затвора, приложенного к холловским контактам, в качестве управляющего параметра (рисунок 2).

Существенное уменьшение эффективной массы носителей заряда до величины $m_0^* \approx 6 \cdot 10^{-5} m_e$ в совокупности с подавлением электрон-электронного взаимодействия между ними в краевых каналах обеспечивает, согласно предлагаемой модели, диамагнитный отклик. Иными словами, магнитное поле, индуцированное вследствие пропускания тока исток-сток через систему невзаимодействующих носителей, приводит в свою очередь к генерации диамагнитного (индуцированного) тока I_{ind} . Представленный ток не участвует в переносе заряда, но, в случае наличия напряжения на поперечном затворе, способен в рамках квантового эффекта Фарадея влиять на величину продольной проводимости. В таком случае существенное подавление электрон-электронного взаимодействия действительно становится причиной процесса захвата одиночных квантов магнитного потока на систему невзаимодействующих носителей тока в краевых каналах. Описание этого процесса возможно с помощью согласованного по току квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея: $I_{ind} = eV_{lg}/\Delta\Phi_V$. Таким образом, изменяя величину напряжения на поперечном холловском затворе, становится возможным осуществление фазового контроля величины продольной проводимости:

$$\Delta G = \Delta G_0(I_{ds}) \cdot \cos^2 \left(\pi \frac{\Delta\Phi_I}{\Phi_0} + \varphi_I \right) \cos^2 \left(\pi \frac{\Delta\Phi_V}{\Phi_0} + \varphi_V \right). \quad (1)$$

Здесь $\Delta\Phi_I = L \cdot I_{ds}$ и $\Delta\Phi_V = eV_{lg}/I_{ind}$ – токовая фаза и так называемая гейт-фаза соответственно. L есть ни что иное как величина индуктивности краевого канала, которая демонстрирует сложную зависимость $L(I_{ds})$ от величины тока исток-сток. Порядок величины индуктивности составляет $0.8 - 0.95 \cdot 10^{-4}$ Гн. Различные значения генерируемого (индуцированного) тока в диапазоне от 0.155 (рисунок 2, а и б) до 1.356 нА (рисунок 2, с) объясняются масштабируемостью представленных «карт» проводимости кремниевой negative-U наносандвич-структуры (рисунок 2). Дробность в квантовании проводимости возникает либо за счет попадания в область с одиночной дыркой большого числа квантов магнитного потока, что происходит при больших значениях стабилизированного тока исток-сток, либо, в случае малых значений стабилизированного тока исток-сток, вследствие возникновения дробного заряда, связанного с локализацией дырки и соответствующим поведением ее волновой функции. Коэффициент пропорциональности в таком случае является сложным и связан с вероятностью захвата индуцированного кванта магнитного потока на тот или иной носитель, ту или иную пучность волновой функции одиночной дырки.

Иными словами, амплитуда соответствующих осцилляций в электрическом транспорте связана с процессом захвата одиночных квантов магнитного потока и формирование композитных частиц, что придает фазовому транспорту носителей в краевых каналах схожесть с полученными ранее результатами изучения квантового эффекта Холла, как дробного, так и целочисленного. Более того, на правомерность описания представленных макроскопических квантовых явлений с использованием квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея указывает подтвержденный факт соответствия фазовых характеристик продольной проводимости краевых каналов кремниевой negative-U наносандвич-структуры и спектральных характеристик ТГц-модулированной электролюминесценции, возникающей при электрическом воздействии на исследуемую структуру как следствие нестационарного эффекта Джозефсона.

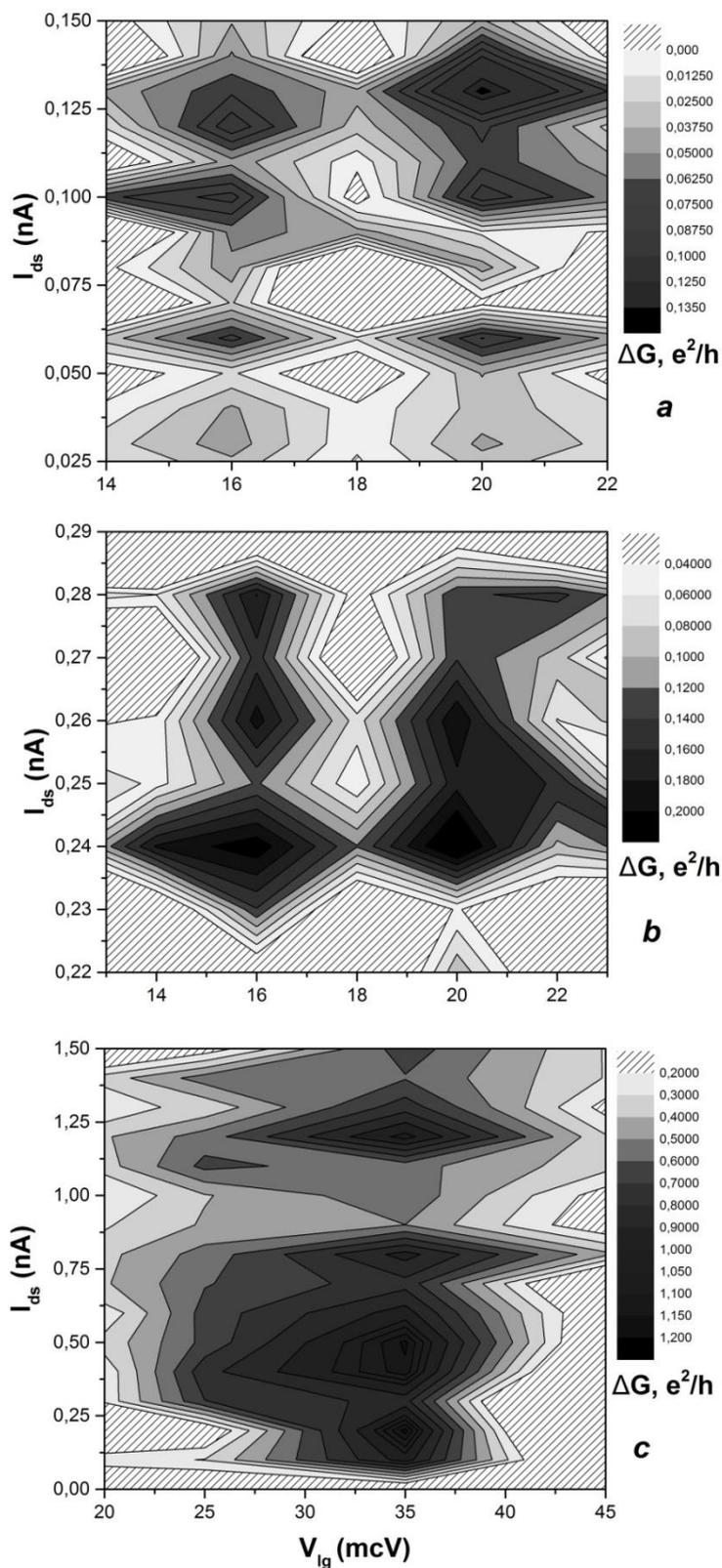


Рисунок 2 – Дробная квантованная продольная проводимость краевых каналов кремниевых negative-U наносандвичей. Фазовый сдвиг, согласно предложенной модели, определяется количеством захваченных квантов магнитного потока $\Delta\Phi_V$ и $\Delta\Phi_I$ в область краевого канала. $T = 300$ К.

Как станет понятно в дальнейшем, качественное описание и анализ изменения продольной проводимости не случайно производился в рамках квантового аналога электромагнитной индукции с использованием выражения, аналогичного выражению, описывающему эффект Ааронова – Бома.

В третьей главе, в целях демонстрации универсальности предлагаемого подхода и его применимости к описанию широкого спектра явлений, приводятся результаты исследования другой кремниевой низкоразмерной структуры и другого макроскопического квантового эффекта.

Описанный в третьей главе образец представлял собой тонкую эпитаксиальную пленку карбида кремния, выращенную на поверхности (110) монокристаллического кремния методом согласованного замещения атомов. Было обнаружено, что механизм согласованного замещения атомов сохраняет изначальную кубическую решетку кремния, способствуя тем самым росту кубического 3C-SiC политипа. При росте карбида кремния данным методом на границе раздела SiC/Si появляется интерфейсный слой толщиной порядка нескольких нанометров с нестандартными оптическими и электрофизическими свойствами. Это вызвано тем, что в процессе согласованного замещения атомов на завершающей стадии превращения кремния в карбид кремния в плоскости подложки происходит перестройка или, иными словами, усадка исходной решетки материала Si с параметра порядка 0.543 нм в кубическую решетку SiC с параметром 0.435 нм. При этом отделившийся от кремниевой матрицы карбид кремния подвергает её аномально сильному сжатию, величина которого превышает 100 ГПа. При таких высоких значениях давления получение SiC со столь хорошей структурой было бы невозможно без совпадения каждой пятой кристаллической ячейки карбида кремния с каждой четвертой ячейкой кремния с высокой точностью. Усадка материала приводит к согласованному расположению каждой пятой химической связи SiC с каждой четвертой связью Si. Остальные связи либо рвутся, что приводит к возникновению вакансий и пор, либо

подвергаются сжатию, что приводит к изменению структуры поверхностных зон прилегающего к Si карбида кремния и его превращению в «полуметалл».

В качестве экспериментального образца использовался наномасштабный слой SiC толщиной $\sim (90 - 100)$ нм, синтезированный на поверхности (110) монокристаллического кремния *n*-типа проводимости (легированного фосфором) методом согласованного замещения. После синтеза слой SiC легировался бором в условиях неравновесной диффузии из газовой фазы в избыточном потоке кремниевых вакансий с поверхности полученного образца. Параметры синтеза и легирования, а также характеристики образца, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические параметры образца SiC/Si.

Подложка	Условия синтеза	Температура легирования	Тип проводимости, концентрация носителей		Транзисторная структура
			До легирования	После легирования	
<i>n</i> -Si, 20 Ом · см, (110)	$T = 1290$ °C, $t = 15$ мин, $P = 2.3$ Торр, $I_{CO} = 12$ sccm, $\%_{SiH_4} = 0.25\%$	900 °C	<i>p</i> -тип, $\sim 6 \cdot 10^{17}$ см ⁻³	<i>p</i> -тип, $> 1 \cdot 10^{19}$ см ⁻³	Планарная

В качестве условий синтеза приведены: T – температура синтеза, t – время синтеза, P – давление CO, I_{CO} – поток CO, $\%_{SiH_4}$ – объемный процент силана (SiH₄), используемого в процессе синтеза. Концентрация носителей определялась по результатам ёмкостных измерений.

Результаты измерения статической магнитной восприимчивости в диапазоне внешних магнитных полей $H = 0 \div 500$ Э с шагом 1 Э при комнатной температуре методом Фарадея и анализа полученных полевых зависимостей представленных тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния продемонстрировали возникновение в слабых магнитных полях двух квантовых

эффектов при комнатной температуре: гистерезиса статической магнитной восприимчивости и осцилляций Ааронова – Бома в полевых зависимостях статической магнитной восприимчивости как следствие двух- и одночастичной интерференции носителей заряда (двумерные дырки) в слабых магнитных полях на вакансионных микродефектах под слоем SiC. Экспериментальное наблюдение эффекта высокотемпературной квантовой интерференции в малых значениях магнитных полей полученных полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости позволило утверждать о реализации в наномасштабных слоях SiC критерия «сильного поля» ($\omega_c \tau = eB\tau/m^* = \mu B \gg 1$, где τ – транспортное время, m^* - эффективная масса носителей тока, μ – подвижность носителей, ω_c – циклотронная частота, B – величина магнитной индукции) при комнатной температуре за счёт малого значения эффективной массы двумерных дырок, а также большого значения их подвижности:

$$m^*/m \leq 10^{-5}, \mu \leq 10^2 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$$

Анализ обнаруженных особенностей позволил провести интерпретацию результатов эксперимента, увязав их с указанными структурными особенностями материала, обусловленными оригинальной технологией выращивания тонкого эпитаксиального слоя карбида кремния на приповерхностном слое монокристаллического кремния.

В малых полях измеренная магнитная восприимчивость образца SiC, выращенного на поверхности (110) кремния, демонстрирует переход из диамагнитного состояния в парамагнитное – диа-пара-гистерезис (рисунок 3). Подобное поведение магнитной восприимчивости ранее было обнаружено другим коллективом авторов в низкотемпературных экспериментах при исследовании легированного бором алмаза, синтезированного при высоких давлениях ($\sim 10^5$ атм.) и температурах выше 2500 К.

Наблюдаемый эффект является экспериментальной демонстрацией эффекта Мейснера – Оксенфельда, что при комнатной температуре довольно неожиданно вследствие, казалось бы, очевидного доминирования в исследуемой структуре

электрон-электронного взаимодействия. В то же время подавление электрон-электронного взаимодействия при комнатной температуре в тонких эпитаксиальных слоях SiC, выращенных методом самосогласованного замещения атомов на поверхности (110) монокристаллического Si, прежде всего, может быть обусловлено присутствием вакансионных микродефектов, генерируемых в процессе синтеза SiC на поверхности кремния.

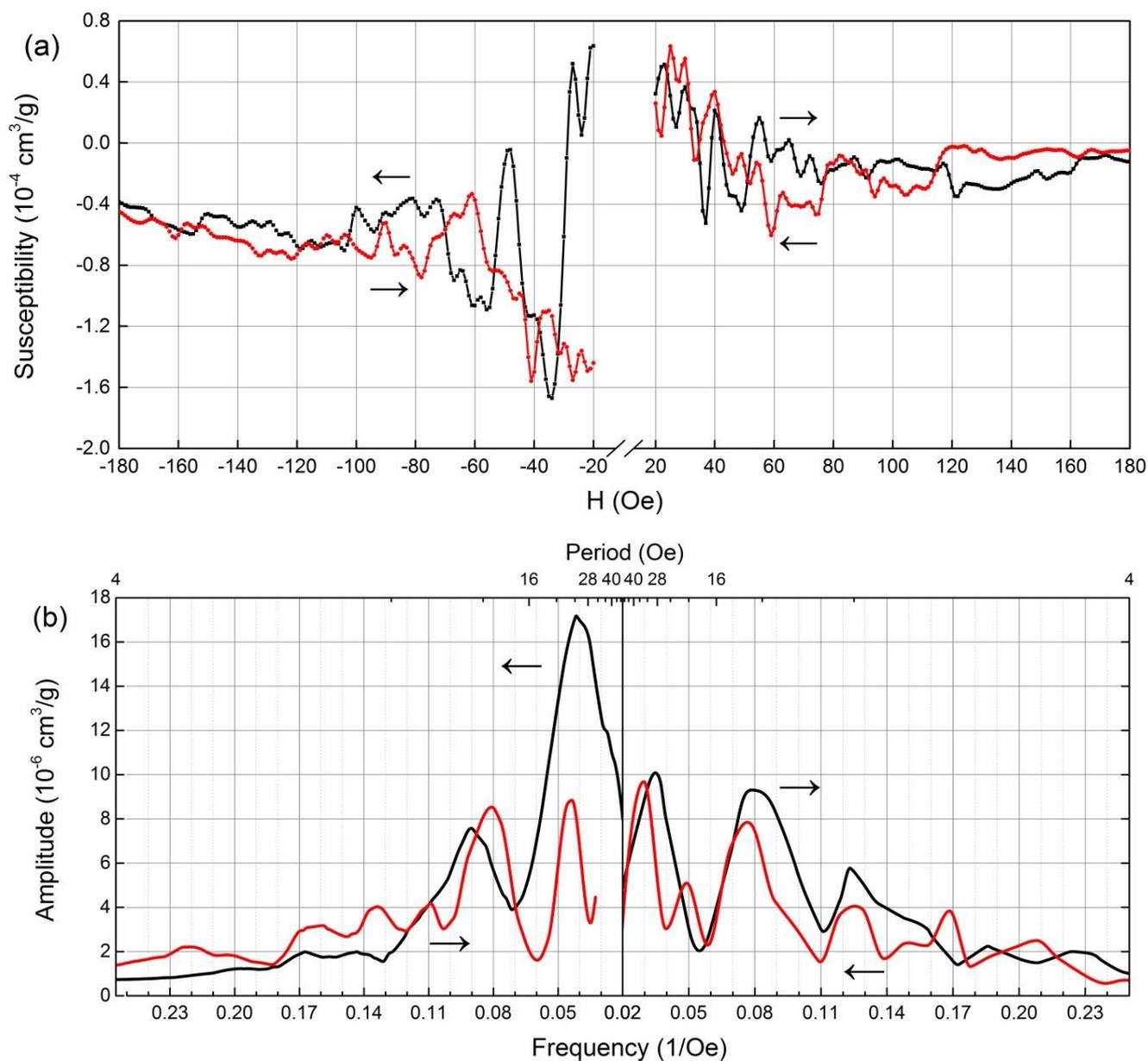


Рисунок 3 – Магнитная восприимчивость (а) образца для отрицательного и положительного направления внешнего магнитного поля (стрелки указывают направление увеличения/уменьшение модуля магнитного поля), а также результаты Фурье-анализа (b) представленных зависимостей соответственно.

Последующее легирование выращенной структуры бором формирует в окрестности микродефектов дипольные центры бора с отрицательной корреляционной энергией, аналогичные дипольным центрам в описанной ранее кремниевой negative-U наносандвич-структуре.

Именно электростатическое поле negative-U дипольных центров бора, механизмы действия которого обсуждались **во второй главе**, ответственно за подавление электрон-электронного взаимодействия. В рамках данного подхода, по-видимому, может быть принято существование сверхпроводящего состояния в изучаемой системе, что и объясняет наблюдаемый гистерезис статической магнитной восприимчивости исследуемого образца. Тригональный дипольный центр бора, в таком случае, может представлять интерес в качестве виртуального джозефсоновского перехода со сверхпроводящей корреляционной щелью, величина которой равна значению отрицательной корреляционной энергии. Подобный подход отмечен **во второй главе** на примере ТГц-модулированной электролюминесценции.

При анализе полевой зависимости магнитной восприимчивости было отмечено, что эксперимент демонстрирует модуляцию кривой гистерезиса. Наблюдаемые в слабых магнитных полях на фоне гистерезиса осцилляции были интерпретированы как макроскопический квантовый эффект Ааронова – Бома. В отличие от осцилляций де Гааза – ван Альфена, связанных с квантованием Ландау и проявляющихся в виде периодической зависимости намагниченности от величины обратного магнитного поля $1/H$, осцилляции Ааронова – Бома определяются величиной магнитного потока, проходящего через плоскость образца. Содержание **третьей главы** ограничивается обсуждением двух уже упомянутых макроскопических квантовых магнитных эффектов, не вдаваясь в другие особенности полученной в эксперименте кривой.

Осцилляции Ааронова – Бома, идентифицированные благодаря проведенному Фурье-анализу приведенных зависимостей, определяются изменением величины магнитного потока, проходящего через плоскость образца, $\Delta\Phi = \Delta n\Phi_0$, где Φ_0 – квант магнитного потока. Если площадь контура S ,

пронизываемого магнитным полем, неизменна, то квант магнитного потока определяется, как $\Phi_0 = \Delta B S$, и ΔB – период осцилляций по полю. Обсуждая возможность экспериментального наблюдения осцилляций Ааронова – Бома на полевых зависимостях магнитной восприимчивости, следует отметить необходимость выполнения условия, при котором длина замкнутой траектории L носителя обязана быть меньше длины фазовой релаксации L_φ . Поскольку в третьей главе речь идет о сверхпроводящих свойствах низкоразмерной SiC/Si структуры, то следует отметить, что это условие должно выполняться как для одно-, так и двухчастичной интерференции.

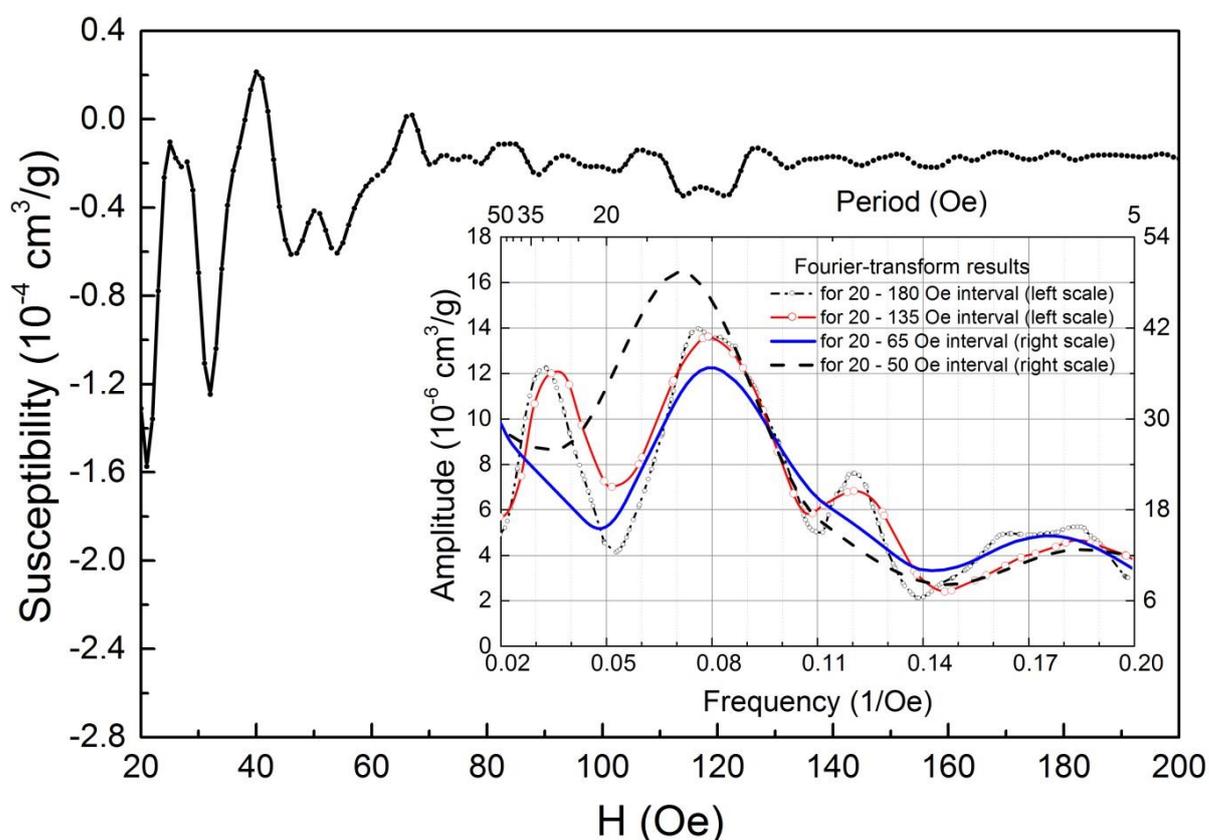


Рисунок 4 – Результаты анализа полевой зависимости магнитной восприимчивости исследуемой структуры.

Возникновение осцилляций с указанной выше периодичностью связано с присутствием в исследуемой структуре SiC/Si вакансионных микродефектов размерами порядка $\sim 1.65 \text{ мкм}^2$, что подтверждается соответствующими структурными исследованиями.

Проведенный в работе Фурье-анализ экспериментальных зависимостей статической магнитной восприимчивости позволил с хорошей точностью определить периоды осцилляций Ааронова – Бома. Наиболее надежно в полученном спектре идентифицированы осцилляции периодами 12.5 и 25 Э, ответственными за появление которых, по всей видимости, являются двухчастичная ($\Phi_0 = h/2e$) и одночастичная ($\Phi_0 = h/e$) интерференция, проявляющиеся, соответственно, при захвате одиночных квантов магнитного потока.

Анализ полевой зависимости магнитной восприимчивости исследуемой структуры показал, что в полях выше 50 Э доминируют осцилляции Ааронова – Бома с периодом 25 Э, а ниже 50 Э наблюдаются осцилляции с периодичностью 12,5 Э (рисунок 4). Таким образом, можно считать, что в окрестности магнитного поля напряженностью $H = 50$ Э лежит значение критического поля, выше которого происходит разрушение носителя, представляющего собой аналог куперовской пары.

Заключение

В настоящей работе исследованы макроскопические квантовые эффекты в низкоразмерных кремниевых структурах, полученные при комнатной температуре.

Изучены фазовые характеристики квантованной проводимости краевых каналов кремниевых negative-U наносадвич-структур, продемонстрирована состоятельность их описания в рамках квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея, основанного на возможности фазового контроля электрического транспорта как за счет изменения величины стабилизированного тока исток-сток, так и вследствие изменения напряжения на внешнем поперечном затворе, выполненном в рамках холловской геометрии. В рамках квантового аналога электромагнитной индукции Фарадея проведен сравнительный анализ дробной квантованной проводимости и квантового эффекта Холла.

В результате экспериментальных исследований тонких эпитаксиальных пленок карбида кремния, выращенных на (110) поверхности кремния, обнаружено возникновение в слабых магнитных полях двух квантовых эффектов при комнатной температуре: гистерезиса статической магнитной восприимчивости и осцилляций Ааронова – Бома в полевых зависимостях статической магнитной восприимчивости как следствие двух- и одночастичной интерференции носителей заряда в слабых магнитных полях на вакансионных микродефектах под слоем SiC.

Публикации по теме научно-квалификационной работы

1. N T Bagraev, V Yu Grigoryev, L E Klyachkin, A M Malyarenko, V A Mashkov, V V Romanov and N I Rul, «High-temperature quantum kinetic effect in silicon nanosandwiches» // *Low Temperature Physics*, 2017, **43**, № 1, pp. 110 – 119.
2. N T Bagraev, L E Klyachkin, V S Khromov, A M Malyarenko, V A Mashkov, T V Matveev, V V Romanov, N I Rul' and K B Taranets, «High temperature quantum kinetic effects in silicon nanosandwiches» // *Semiconductors*, 2018, **52**, № 4, pp. 478 – 484.
3. N I Rul, N T Bagraev, L E Klyachkin and A M Malyarenko, «Phase control of the fractional conductance of silicon nanosandwich-structures» // *Journal of Physics: Conference Series*, ETACP 2019, 2019, **1236**, № 1, 012033.
4. P A Golovin, N I Rul, N T Bagraev, L E Klyachkin and A M Malyarenko, «Phase inversion of THz radiation from silicon nanostructures» // *Journal of Physics: Conference Series*, YETI 2019, 2019, **1326**, № 1, 012005.
5. P A Golovin, N I Rul, N T Bagraev, L E Klyachkin and A M Malyarenko, «The modulated phase controlled THz radiation from silicon nanosandwiches» // *2020 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, CLEO-PR 2020 – Proceedings*, 2020, 9256082.

6. P A Golovin, N I Rul, L E Klyachkin, A M Malyarenko and N T Bagraev, «Modulated phase controlled THz radiation from silicon nanosandwiches» // *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz*, 2020, 9370447.
7. N I Rul, P A Golovin, N T Bagraev, L E Klyachkin and A M Malyarenko, «Optical-electric phase characteristics of silicon negative-U nanosandwiches» // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2021, **14**, № 4, pp. 9 – 20.