

На правах рукописи

КОСАЧ Анастасия Александровна

**ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ КВАНТОВЫХ ЗАКОРОТОК НА
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В
ГРЯЗНЫХ М-І-М ТУННЕЛЬНЫХ КОНТАКТАХ**

Специальность

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новочеркасск– 2021

Работа выполнена на кафедре «Математика и математическое моделирование» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова.

Научный руководитель: **Кирпиченкова** Наталья Валерьевна
доктор физико-математических наук, доцент,
(Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, кафедра «Математика и математическое моделирование», заведующий)

**Официальные
оппоненты:**

Батаронов Игорь Леонидович
доктор физико-математических наук,
профессор
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кафедра «Высшая математика и физико-математическое моделирование», заведующий)

Мясникова Анна Эдуардовна
доктор физико-математических наук, доцент
(ФГАОУ «Южный федеральный университет», кафедра теоретической и вычислительной физики, профессор)

Защита диссертации состоится 18.06.2021 в 15.00 часов на заседании диссертационного совета ЮФУ01.07 по физико-математическим наукам (по специальностям 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и 01.04.18 – Кристаллография, физика кристаллов) при НИИ физики ЮФУ по адресу: Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42 ауд. 203.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени Ю.А. Жданова ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21 Ж и на официальном сайте: <https://hub.lib.sfedu.ru/diss/show/1286626/>.

Автореферат разослан

« ____ » апреля 2021 года

Отзывы на автореферат (укажите дату, полностью свои фамилию, имя, отчество, учёную степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, email и с нумерацией страниц) в двух экземплярах, с заверенной подписью рецензента и печатью организации, просим направлять Гегузиной Г.А., учёному секретарю диссертационного совета ЮФУ01.07 при ЮФУ по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194. НИИ физики ЮФУ, а также в формате .pdf на email: geguzina@sfedu.ru.

Учёный секретарь диссертационного совета
ЮФУ01.07 при НИИФ ЮФУ

Гегузина Галина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Теоретические и экспериментальные исследования туннельных $M-I-M$ ($M=N$, S ; N – нормальный металл, S – сверхпроводник, I – изолятор) контактов представляют несомненный интерес как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения их технологических приложений: в устройствах микро- и наноэлектроники, в высокоточной низкотемпературной измерительной технике, в перспективных квантовых компьютерах, основанных на джозефсоновской технологии, и в других областях науки и техники (см., например, [1 – 10]).

При описании реальных контактов необходимо учитывать, в частности, неоднородности туннельной прозрачности I -слоя, обусловленные случайно расположенными в нем примесями. В случае слабого структурного беспорядка в «грязных» (малые концентрации одинаковых немагнитных примесей в I -слое) $M-I-M$ контактах в узкой области энергий вблизи однопримесного локального электронного уровня ε_0 в неупорядоченном I -слое существуют случайные «квантовые закоротки» – квантовые резонансно-перколяционные траектории (КРПТ) [11, 12], соединяющие противоположные берега контакта, коэффициент прохождения электронов вдоль которых порядка единицы, в отличие от экспоненциально малого коэффициента прохождения вдоль других путей. В случае достаточной близости энергии ε_0 к энергии Ферми ε_F контакта, это обстоятельство приводит к сильным количественным и качественным изменениям электродинамических характеристик туннельных контактов даже при малых концентрациях примеси в I -слое, что и стимулирует развитие физики грязных $M-I-M$ контактов – более 150 ссылок в базе Scopus только на «пионерскую» для этого направления работу [11].

В настоящее время активно разрабатываются новые устройства низкотемпературной электроники на основе мезоскопических туннельных структур, что актуализирует интерес к теоретическим исследованиям в рамках этого направления, помимо того естественного интереса, который обусловлен внутренней логикой развития квантовой теории неупорядоченных конденсированных систем и ее приложений [13, 14].

Тема диссертационной работы соответствует: 1) приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ – п. 2 «Индустрия наносистем», критической технологии РФ – п.14 «Технологии наноустройств и микросистемной техники» (согласно указу Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899); 2) направлению из Стратегии научно-

технологического развития РФ – п.1. Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта (согласно указу Президента РФ от 01.12.2016 г. №642).

Все перечисленное выше и определяет актуальность теоретического исследования низкотемпературного квантового электронного транспорта в грязных $M-I-M$ туннельных контактах.

Объекты исследования – грязные $N-I-N$, $S-I-S$ и $S-I-N$ туннельные контакты со слабым структурным беспорядком в I -слое, приводящим к появлению случайных квантовых закороток, соединяющих противоположные берега контакта.

Методы исследования – методы теории КРПТ в рамках модели слабого структурного беспорядка И.М. Лифшица, методы квантовой теории конденсированного состояния, методы математической физики и компьютерного моделирования.

Цель работы: выявить влияние случайных квантовых закороток на низкотемпературную зависимость туннельного кондактанса грязного $N-I-N$ контакта, критическое значение сверхтока в грязном $S-I-S$ контакте при $T = 0$, одночастичный низкотемпературный ток в грязном $S-I-N$ контакте.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1) получить в области низких температур представление туннельного кондактанса $G(T)$ грязного $N-I-N$ контакта в виде суммы кондактансов случайных квантовых закороток, пронизывающих неупорядоченный I -слой;

2) исследовать полученную формулу для туннельного кондактанса грязного $N-I-N$ контакта на оси параметра $\delta = |\epsilon_0 - \epsilon_F|$ с целью обнаружения возможных аномалий зависимости $G(T)$ при различных значениях параметра δ ;

3) провести для характерных значений параметров грязных $N-I-N$ контактов численные расчеты, показывающие принципиальную возможность экспериментального наблюдения возможных аномалий зависимости $G(T)$;

4) получить формулу для матричных элементов туннельного гамильтониана квантовых закороток в грязном $M-I-M$ контакте;

5) получить формулу для критического сверхтока в грязном $S-I-S$ контакте при $T = 0$, исследовать её на предмет нарушения известного в теории «чистых» (без примесей в I -слое) джозефсоновских $S-I-S$ контактов соотношения Амбегаокара-Баратова при $T = 0$ и предложить принципиальную схему эксперимента по обнаружению нарушения соотношения Амбегаокара-Баратова в грязных $S-I-S$ контактах при $T \rightarrow 0$;

б) получить формулу для одночастичного тока в грязном $S-I-N$ контакте в области низких температур $0 \leq T \ll \Delta_0$, исследовать её на предмет отклонения одночастичной вольт-амперной характеристики (ВАХ) грязного $S-I-N$ контакта от соответствующей ВАХ для этого же контакта, полученной в рамках существующей теории для чистых $S-I-N$ контактов и провести численные расчеты, показывающие принципиальную возможность экспериментального проявления эффекта отклонения одночастичной ВАХ в грязных $S-I-N$ контактах.

Научная новизна определяется тем, что *впервые*:

- получено представление для усредненного по случайным конфигурациям примесей низкотемпературного туннельного кондактанса грязного $N-I-N$ контакта как при нулевых, так и при ненулевых значениях параметра $\delta = |\varepsilon_0 - \varepsilon_F|$ в виде суммы кондактансов случайных квантовых закороток;
- показано, что на оси параметра $\delta = |\varepsilon_0 - \varepsilon_F|$ существует ряд точек бифуркации, при переходе через каждую из которых (в направлении увеличения δ) происходит "рождение" нового максимума кривой $G(T)$, и проведены численные расчеты, показывающие принципиальную возможность экспериментального наблюдения, по крайней мере, одного из этих максимумов;
- получены формулы для матричных элементов туннельного гамильтониана квантовых закороток в грязном $M-I-M$ контакте и для критического значения сверхтока в грязном $S-I-S$ контакте при $T = 0$;
- показано, что присутствие узкозонных квантовых закороток в грязных $S-I-S$ контактах приводит при $T = 0$ к значительному нарушению известного в теории чистых $S-I-S$ контактов соотношения Амбегаокара-Баратова, и предложена принципиальная схема эксперимента по обнаружению этого нарушения при $T \rightarrow 0$;
- получена формула для одночастичного низкотемпературного тока в грязном $S-I-N$ контакте; показано, что присутствие квантовых закороток в грязном $S-I-N$ контакте приводит к значительному его недостатку по сравнению с одночастичным током, рассчитанным для этого контакта в

рамках существующей теории, и предложена принципиальная схема эксперимента по обнаружению этого эффекта.

Теоретическая и практическая значимость основных результатов определяется тем, что разработан теоретический метод для регулярного вычисления примесных вкладов, даваемых случайными КРПТ в туннельный кондактанс грязного $N-I-N$ контакта, величину критического сверхтока грязного $S-I-S$ контакта при $T=0$ и величину одночастичного низкотемпературного тока в грязном $S-I-N$ контакте. На основе этого метода:

- теоретически предсказаны новые качественные и "сильные" количественные эффекты слабого структурного беспорядка в грязных $N-I-N$, $S-I-S$, $S-I-N$ контактах, доступные для экспериментального наблюдения;
- созданы теоретические предпосылки для практической разработки $M-I-M$ ($M=N, S$) контактов с резонансно-перколяционным типом квантового электронного транспорта и на их базе новых элементов низкотемпературной электроники и измерительной техники, например, таких как: СКВИДы (SQUID) с высоким коэффициентом преобразования магнитный поток – напряжение, высокоточные SINIS болометры, элементы быстрой одноквантовой логики (RSFQ) в перспективных компьютерах на базе джозефсоновской технологии и в других устройствах.

Работа поддерживалась:

1. Грантом РФФИ (конкурс на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»)) в рамках научного проекта #19-32-90074 «Низкотемпературный квантовый электронный транспорт в грязных $M-I-M$ контактах». Срок реализации научного проекта 01.10.2019 – 30.09.2021.
2. Именной стипендией имени первого ректора университета профессора Зинина Н.Н. для аспирантов ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» в 2017 – 2018 учебном году.
3. Стипендией Губернатора Ростовской области в 2020 г.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Наличие квантовых закороток в неупорядоченном I -слое приводит к появлению на оси параметра δ ряда точек последовательных бифуркаций, при переходе через каждую из которых происходит не только сильное количественное, но и качественное изменение низкотемпературной

зависимости туннельного кондактанса грязного $N-I-N$ контакта – рождение нового максимума на кривой $G(T)$, который можно экспериментально обнаружить, как показали численные расчеты туннельного кондактанса $G(T)$.

2. Наличие узкозонных квантовых закороток в грязном $S-I-S$ контакте приводит при $T=0$ к значительному нарушению известного в теории чистых джозефсоновских $S-I-S$ контактов соотношения Амбегаокара-Баратова, которое может экспериментально проявиться, как показывают численные оценки мультипликатора Φ для грязного $S-I-S$ контакта.
3. Наличие квантовых закороток в грязном $S-I-N$ контакте приводит к значительному отклонению одночастичной ВАХ в сторону уменьшения тока (недостаток тока) от рассчитанной для этого же контакта одночастичной ВАХ в рамках существующей теории, и этот эффект может проявиться экспериментально, как показали численные оценки мультипликатора Φ для грязного $S-I-S$ контакта.

Достоверность полученных результатов обусловлена корректностью исходных математических моделей, сформулированных в рамках общепризнанной теории КРПТ в неупорядоченных туннельных структурах, развитой в работах И.М. Лифшица и В.Я. Кирпиченкова, а также и других исследователей, корректностью аналитических и численных методов исследования этих моделей, согласованием физической интерпретации полученных результатов с известными теоретическими представлениями физики туннельных контактов.

Апробация основных результатов диссертации проходила на XXXVIII совещании по физике низких температур (17 – 22 сентября 2018 г., Москва – Ростов-на-Дону – Шепси), на 20-м международном симпозиуме "Order, Disorder and Properties of Oxides" (5 – 10 of September 2017, Moscow – Rostov – on-Don – Yuzhny, Russia), на 20-м международном симпозиуме "Ordering in Minerals and Alloys" (10 – 15 of September 2017, Rostov – on-Don – Yuzhny, Russia), на международной on-line научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (18 – 22 мая 2020 г.).

Публикации автора: 3 статьи в "JETP Letters", индексируемом в БД Web of Science Core Collection, 1 статья в "Bulletin of the Russian Academy of Science: Physics", индексируемом в БД Scopus и 4 тезиса докладов в трудах международных конференций. Список публикаций, снабженных литерой А, приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Совместно с соавторами публикаций осуществлялась постановка задач, выбирались методы их решения и анализировались полученные результаты.

Автором лично:

- проведено аналитическое исследование низкотемпературной зависимости кондактанса m -примесной квантовой закоротки, в результате чего на оси параметра $\delta = |\varepsilon_0 - \varepsilon_F|$ были найдены точки бифуркации этой зависимости;
- осуществлено численное исследование низкотемпературной зависимости туннельного кондактанса $G(T)$ грязного $N-I-N$ контакта вблизи точек бифуркации, на основе чего показана принципиальная возможность экспериментального обнаружения бифуркационных максимумов на кривой $G(T)$;
- проведено аналитическое исследование мультипликатора $\varphi_m(x)$ для критического сверхтока m -примесной квантовой закоротки в грязном $S-I-S$ контакте при $T = 0$ и построена универсальная (одинаковая для всех квантовых закороток) зависимость $\varphi_m(x)$ (от безразмерной ширины x туннельного резонанса, ассоциированного с квантовой закороткой), демонстрирующая нарушение известного соотношения Амбегаокара-Баратова для квантовой закоротки;
- для характерных параметров грязного $S-I-S$ контакта проведены численные оценки, показывающие принципиальную возможность экспериментального наблюдения нарушения соотношения Амбегаокара-Баратова при $T \rightarrow 0$;
- для характерных параметров грязного $S-I-N$ контакта построена одночастичная низкотемпературная ($T \ll \Delta_0$) ВАХ, демонстрирующая, что наличие квантовых закороток в неупорядоченном I -слое приводит к значительному недостатку тока по сравнению с рассчитанной для этого же контакта одночастичной ВАХ в рамках существующей теории, на основе чего продемонстрирована принципиальная возможность экспериментального обнаружения этого эффекта.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 60 наименований, изложена на 114 страницах, содержит 19 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко изложено современное состояние исследуемой проблемы, приведено обоснование актуальности темы диссертации, охарактеризованы объекты и методы их исследования, сформулированы цель и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, основные научные положения, выносимые на защиту. Отмечен личный вклад автора в разработку исследуемой проблемы.

В **первом** разделе, следуя, в основном [11 – 14], приведен краткий обзор известных представлений и результатов теории КРПТ в неупорядоченных туннельных структурах, необходимых для понимания последующего материала.

Во **втором** разделе показано, что учет случайных квантовых закороток в неупорядоченном I -слое приводит к радикальным изменениям низкотемпературной зависимости туннельного кондактанса грязного N - I - N туннельного контакта. Новые результаты, опубликованные в работе [А3], описаны в подразделах 2.2 – 2.5. В частности, в подразделе 2.2 выводится формула для низкотемпературной зависимости кондактанса m -примесной квантовой закоротки, которая в безразмерной форме имеет следующий вид:

$$f_m^{res}(\tau, u) = \frac{\gamma_m}{\sqrt{\tau^2 + \gamma_m^2}} \exp\left[-\frac{\delta^2}{\tau^2 + \gamma_m^2}\right], \quad (1)$$

где

$$\tau = 2T, \quad \delta = |\varepsilon_0 - \varepsilon_F|, \quad \gamma_m = \gamma_m(u),$$

T – температура в энергетических единицах, ε_0 – энергия однопримесного электронного уровня в I -слое, ε_F – энергия Ферми контакта, $\gamma_m(u) = 4(U_0 - \varepsilon_0)u^{-1}e^{-u}$ – энергетическая ширина туннельного резонанса, ассоциированного с квантовой закороткой, u – безразмерное среднее расстояние между соседними примесями в квантовой закоротке, U_0 – высота прямоугольного потенциального барьера, моделирующего "чистый" (без примесей) I -слой.

Далее проведено аналитическое исследование низкотемпературной зависимости (1). Исходя из уравнения

$$\left. \frac{\partial f_m^{res}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_m} = 0, \quad (2)$$

найдена “температура” τ_m , соответствующая максимуму температурной зависимости кондактанса квантовой закоротки (1):

$$\tau_m(u) = \sqrt{2\delta^2 - \gamma_m^2(u)}. \quad (3)$$

Как видно из (3), имеющее физический смысл решение $\tau_m(u) \geq 0$ существует лишь при выполнении условия

$$\delta \geq \delta_{cm}(u) = 2^{-\frac{1}{2}} \gamma_m(u). \quad (4)$$

Таким образом, при $0 \leq \delta \leq \delta_{cm}(u)$ температурная зависимость (1) является монотонно убывающей, а при $\delta > \delta_{cm}(u)$ качественно изменяется – становится немонотонной, проходя через максимум при температуре $\tau = \tau_m(u) > 0$. Следовательно, на оси параметра δ точка $\delta = \delta_{cm}(u)$ является точкой бифуркации рождения максимума на температурной зависимости кондактанса m -примесной квантовой закоротки с шагом u .

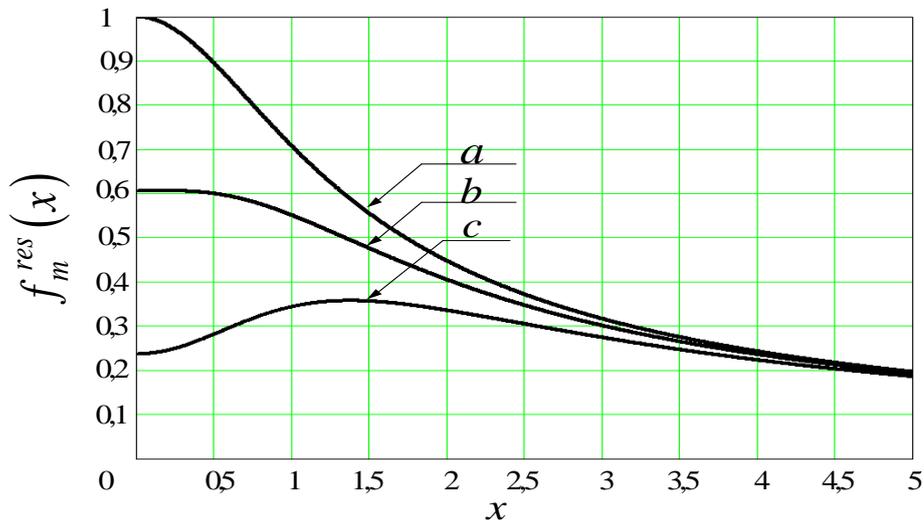


Рисунок 1 – Зависимость безразмерного кондактанса квантовой закоротки

$f_m^{res}(x)$ от безразмерной температуры x для следующих значений

безразмерного параметра Δ :

$\Delta = 0$ – кривая a , $\Delta = \Delta_c = 0.7$ – кривая b , $\Delta = 1.2$ – кривая c

Графики зависимости безразмерного кондактанса квантовой закоротки $f_m^{res}(x)$ (1) от безразмерной температуры $x = \tau \gamma_m^{-1}(u)$ (рис. 1) для трех значений безразмерного параметра $\Delta = \delta \gamma_m^{-1}(u)$ иллюстрируют эффект рождения максимума на зависимости $f_m^{res}(x)$ при переходе параметра Δ (в сторону его увеличения) через точку бифуркации $\Delta = \Delta_c = 2^{-\frac{1}{2}}$.

Отметим, что в терминах χ и Δ зависимость $f_m^{res}(\chi)$ является универсальной – одинаковой для всех квантовых закороток с различными значениями m и u .

В подразделе 2.4 путем суммирования кондактансов всех уединенных – "параллельно включенных" случайных m -примесных квантовых закороток в неупорядоченном I -слое, и учитывая вклад чистого контакта, выведена формула для усредненного по случайным конфигурациям примесей туннельного кондактанса грязного $N-I-N$ контакта следующего вида:

$$G(T) = G_0(T) + \sum_m G_m(T), \quad (5)$$

где $G_0(T)$ – туннельный кондактанс чистого $N-I-N$ контакта, слабо возрастающий в области низких температур ($T \ll U_0 - \varepsilon_F, \varepsilon_F$),

$G_m(T)$ – усредненный по случайным конфигурациям примесей вклад m -примесных квантовых закороток.

Каждый из вкладов $G_m(T)$ испытывает одну бифуркацию рождения максимума при значении параметра $\delta = \delta_{cm}$. Наблюдаемый же в эксперименте туннельный кондактанс всего контакта $G(T)$ (5) будет испытывать ряд последовательных бифуркаций рождений максимумов при значениях $\delta_{c1} < \delta_{c2} < \delta_{c3} < \dots$.

Для подавления мезоскопических флуктуаций $G(T)$ необходимо, чтобы площадь контакта S была достаточно велика [12]:

$$S \gg \alpha^{-2} c^{-1} \exp(c\pi\alpha^3 L^3), \quad (6)$$

где: α^{-1} – радиус локализации волновой функции электрона на примеси, $c \ll 1$ – безразмерная концентрация примеси в I -слое, L – толщина I -слоя.

Далее в подразделе 2.5 для характерных значений параметров туннельных контактов проведена серия численных расчетов $G_0(T)$ и $G(T)$. Например, для значений $\alpha L = 10$, $U_0 = 10$ эВ, $\varepsilon_F = 5$ эВ, $c = 10^{-4}$ для первых двух точек бифуркации получено: $\delta_{c1} = 6,4 \cdot 10^{-5}$ эВ, $\delta_{c2} = 1,9 \cdot 10^{-2}$ эВ.

Из сравнения полученных температурных зависимостей $G_0(T)$ (рис. 2) и $G(T)$ (рис. 3, 4) видно их радикальное качественное и количественное отличие, которое, как показывает расчет вариантов, сохраняется в интервале концентраций $10^{-6} \ll c \ll 10^{-3}$.

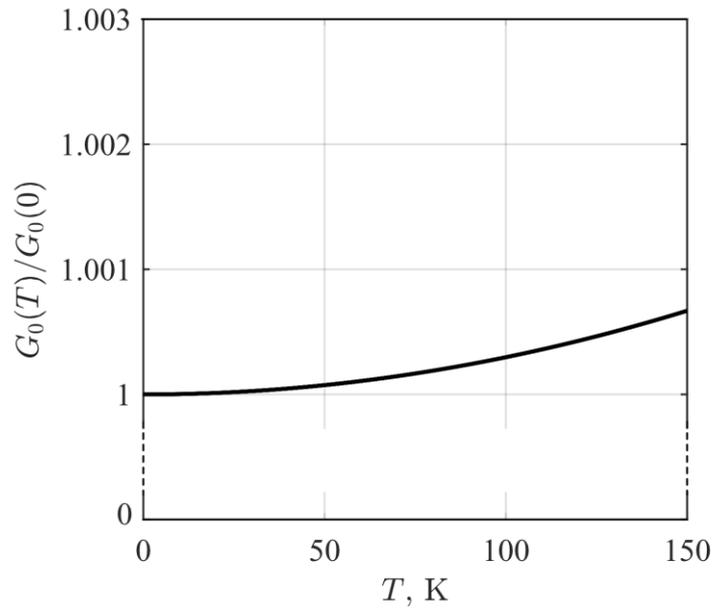


Рисунок 2 – Зависимость $G_0(T)$ при $\alpha L = 10$

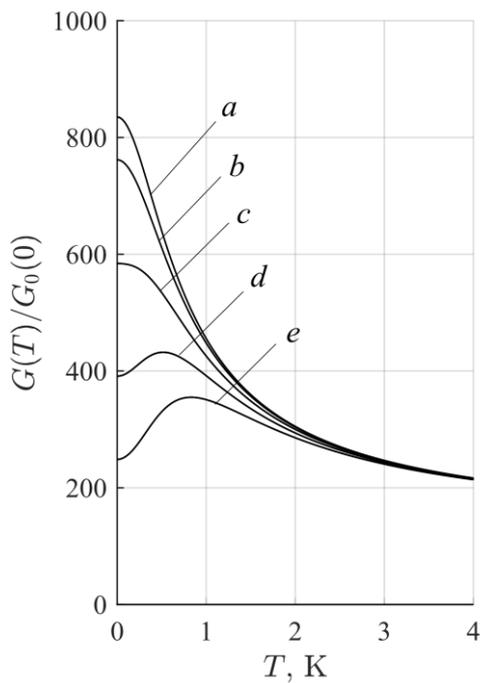


Рисунок 3 – Поведение зависимости $G(T)$ в окрестности точки бифуркации $\delta_{c1} = 6,4 \cdot 10^{-5}$ эВ ($\alpha L = 10$): $\delta = 0$ (a) ; $\delta = 3,2 \cdot 10^{-5}$ (b) ; $\delta = 6,4 \cdot 10^{-5}$ (c) ; $\delta = 9,2 \cdot 10^{-5}$ (d) и $\delta = 1,2 \cdot 10^{-4}$ (e) эВ

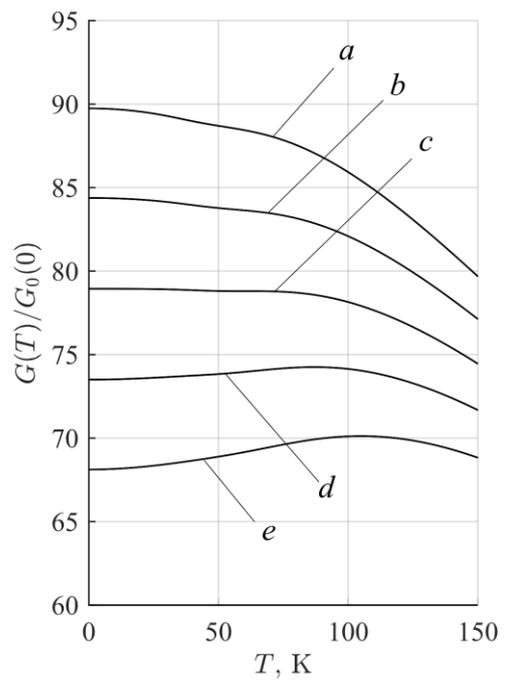


Рисунок 4 – Поведение зависимости $G(T)$ в окрестности точки бифуркации $\delta_{c2} = 1,9 \cdot 10^{-2}$ эВ ($\alpha L = 10$): $\delta = 1,6 \cdot 10^{-2}$ (a) ; $\delta = 1,75 \cdot 10^{-2}$ (b) ; $\delta = 1,9 \cdot 10^{-2}$ (c) ; $\delta = 2,05 \cdot 10^{-2}$ (d) и $\delta = 2,2 \cdot 10^{-2}$ (e) эВ

С увеличением толщины I -слоя контакта бифуркационный спектр δ_{cm} ($m = 1, 2, 3, \dots$) сдвигается к точке $\delta = 0$ и сгущается, туннельный кондактанс чистого контакта $G_0(T)$ экспоненциально уменьшается, а относительные вклады $G_m(T)$ квантовых закороток в туннельный кондактанс грязного контакта $G(T)$ увеличиваются.

Таким образом, теоретическое исследование низкотемпературной зависимости туннельного кондактанса $G(T)$ грязного $N-I-N$ контакта обнаружило ее аномальное, по сравнению с соответствующей зависимостью $G_0(T)$ чистого контакта, поведение в широком интервале малых концентраций примеси. Радикальные отличия проявляются не только в количественном (различие составляет несколько порядков), но и в качественном отношении: зависимость $G(T)$, в отличие от слабо возрастающей $G_0(T)$, при различных значениях параметра $\delta = |\varepsilon_0 - \varepsilon_F|$ либо монотонно спадает ($\delta = 0$) с увеличением T , либо немонотонна ($\delta > 0$) и имеет максимумы. Именно эти качественные аномалии $G(T)$ могут быть доступны наблюдению и служить экспериментальным тестом на наличие квантовых закороток в неупорядоченном I -слое контакта. Это теоретическое исследование позволило сформулировать первое научное положение.

В третьем разделе решается задача "синтеза" известного и широко используемого в теории чистых туннельных контактов метода туннельного гамильтониана, впервые изложенного в [15 – 17], и теории КРПТ – квантовых закороток в грязных $M-I-M$ контактах [11 – 14], с целью адекватного описания методом туннельного гамильтониана низкотемпературного квантового электронного транспорта в грязных $M-I-M$ контактах. Научная идея, состоящая в имплантации методов теории КРПТ в метод туннельного гамильтониана, является совершенно новой и несомненно актуальной для развития теории грязных $M-I-M$ контактов.

Новый результат получен в работах [A2, A4] и описан в подразделе 3.4, где выведена формула для матричных элементов туннельного гамильтониана квантовых закороток.

Туннельный гамильтониан, описывающий «перепутывание» электронных состояний в различных берегах контакта посредством туннелирования через произвольную m -примесную квантовую закоротку, имеет вид:

$$\hat{H}_T^{(m)}(u) = \sum_{\mathbf{p}, \mathbf{q}, \sigma} T_{\mathbf{p}, \mathbf{q}}^{(m)}(u) \hat{a}_{\mathbf{p}, \sigma}^+ \hat{b}_{\mathbf{q}, \sigma} + h.c., \quad (7)$$

где:

m – число примесей в квантовой закоротке,

u – безразмерное среднее расстояние между соседними примесями в квантовой закоротке,

$\hat{a}_{\mathbf{p}, \sigma}^+$, $\hat{a}_{\mathbf{p}, \sigma}$ – операторы рождения и уничтожения электронов в левом берегу контакта,

$\hat{b}_{\mathbf{q}, \sigma}^+$, $\hat{b}_{\mathbf{q}, \sigma}$ – операторы рождения и уничтожения электронов в правом берегу контакта,

\mathbf{p}, \mathbf{q} – импульсы электронов, σ – проекция спина электрона,

$T_{\mathbf{p}, \mathbf{q}}^{(m)}(u)$ – матричный элемент туннельного гамильтониана.

Туннельный ток через квантовую закоротку в грязном $N-I-N$ контакте представлен в виде, аналогичном тому, который использован в работе [18]:

$$i_m(V, T, u) = \frac{4e}{\pi\hbar} \sum_{\mathbf{p}, \mathbf{q}, \sigma} \left| T_{\mathbf{p}, \mathbf{q}}^{(m)}(u) \right|^2 \int_{-\infty}^{\infty} \text{Im} G^R(\xi, \mathbf{p}) \text{Im} G^R(\xi + eV, \mathbf{q}) \cdot [n_F(\xi, T) - n_F(\xi + eV, T)] d\xi, \quad (8)$$

где $\text{Im} G^R(\xi, \mathbf{p}) = -\pi\delta(\xi - \xi_{\mathbf{p}})$, $\text{Im} G^R(\xi + eV, \mathbf{q}) = -\pi\delta(\xi + eV - \xi_{\mathbf{q}})$ – мнимые

части запаздывающих функций Грина в N -берегах, $n_F(\xi) = \left[e^{\frac{\xi}{T}} + 1 \right]^{-1}$ –

фермиевская функция распределения, V – напряжение на контакте, T – температура (в энергетических единицах).

Переходя в выражении (8) от суммирования по \mathbf{p}, \mathbf{q} к интегрированию по $\xi_{\mathbf{p}}, \xi_{\mathbf{q}}$, получаем

$$i_m(V, T, u) = \frac{4e}{\pi\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v(\xi_{\mathbf{p}}) v(\xi_{\mathbf{q}}) \left| T^{(m)}(\xi_{\mathbf{p}}, \xi_{\mathbf{q}}; u) \right|^2 \text{Im} G^R(\xi, \xi_{\mathbf{p}}) \text{Im} G^R(\xi + eV, \xi_{\mathbf{q}}) \cdot [n_F(\xi, T) - n_F(\xi + eV, T)] d\xi d\xi_{\mathbf{p}} d\xi_{\mathbf{q}}, \quad (9)$$

где $v(\xi_{\mathbf{p}})$, $v(\xi_{\mathbf{q}})$ – одночастичные плотности электронных состояний в берегах контакта,

$$\left| T^{(m)}(\xi_{\mathbf{p}}, \xi_{\mathbf{q}}; u) \right|^2 = \left| T_0^{(m)} \right|^2 \cdot \begin{cases} 1, & |\xi_{\mathbf{p}}|, |\xi_{\mathbf{q}}| \leq \gamma_m(u), \\ 0, & |\xi_{\mathbf{p}}|, |\xi_{\mathbf{q}}| > \gamma_m(u) \end{cases} \quad (10)$$

– усредненный по направлениям векторов \mathbf{p}, \mathbf{q} квадрат матричного элемента $\left|T_{\mathbf{p},\mathbf{q}}^{(m)}(u)\right|^2$,

$$\gamma_m(u) = 4(U_0 - \varepsilon_0)u^{-1}e^{-u} - \quad (11)$$

– энергетическая ширина туннельного резонанса, ассоциированного с квантовой закороткой.

Формула (10) отражает тот факт, что подавляющий вклад в гибридизацию (через квантовую закоротку) электронных состояний в различных берегах контакта вносит область энергий внутри туннельного резонанса, ассоциированного с этой закороткой, то есть в квадрате: $-\gamma_m(u) \leq \xi_{\mathbf{p}}, \xi_{\mathbf{q}} \leq \gamma_m(u)$ на плоскости $(\xi_{\mathbf{p}}, \xi_{\mathbf{q}})$, внутри которого параметр гибридизации $\left|T^{(m)}(\xi_{\mathbf{p}}, \xi_{\mathbf{q}}; u)\right|^2$ практически не зависит от энергий $\xi_{\mathbf{p}}, \xi_{\mathbf{q}}$, а вне – экспоненциально мал по сравнению с его значениями внутри. Параметр $\left|T_0^{(m)}\right|^2$, входящий в (10) выражается (после вычисления тока (9)) через линейный кондактанс квантовой закоротки при нулевой температуре $g_m(T=0)$:

$$\left|T_0^{(m)}\right|^2 = \frac{\hbar}{4\pi e^2 v_1(0) v_2(0)} \cdot g_m(T=0), \quad (12)$$

где

$$g_m(T=0) = \frac{(U_0 - \varepsilon_0)\varepsilon_0}{2\pi^4 U_0^2} \left(\frac{e^2}{2\pi\hbar} \right). \quad (13)$$

Туннельный кондактанс (13) связан с кондактансом квантовой закоротки $g_m(T, u)$ при любых достаточно низких температурах $0 \leq T \ll \mu$, $U_0 - \mu$ соотношением:

$$g_m(T, u) = g_m(T=0) \operatorname{th} \left[\frac{\gamma_m(u)}{2T} \right]. \quad (14)$$

Заметим, что в отличие от кондактанса чистого $N-I-N$ контакта $G_0(T)$, туннельный кондактанс квантовой закоротки (14) сильно зависит от T в области низких температур.

С учетом (14) формула (12) принимает вид:

$$\left|T_0^{(m)}\right|^2 = \frac{\hbar}{4\pi e^2 v_1(0) v_2(0)} \cdot \operatorname{cth} \left[\frac{\gamma_m(u)}{2T} \right] g_m(T, u). \quad (15)$$

Формула (15), будучи подставленной в (10), позволяет исключать матричные элементы туннельного гамильтониана для квантовых закороток из окончательных формул, выражая эти матричные элементы через туннельные кондактансы квантовых закороток, которые, в свою очередь, будут определять туннельный кондактанс всего грязного контакта в нормальном ($N-I-N$) состоянии, доступный для экспериментального измерения при любых достаточно низких температурах, что и решает поставленную в этом разделе задачу синтеза метода туннельного гамильтониана и теории КРПТ – квантовых закороток.

Отметим, что как и в теории чистых туннельных контактов [19], так и в теории грязных туннельных контактов, важным преимуществом метода туннельного гамильтониана является то обстоятельство, что туннельный гамильтониан (7) и его матричные элементы $T_{\mathbf{p},\mathbf{q}}^{(m)}(u)$, определяемые соотношениями (10) – (15), в равной степени относятся как к туннелированию в грязных $N-I-N$ контактах, так и в грязных $S-I-S$ и $S-I-N$ контактах.

В четвертом разделе исследовано влияние случайных квантовых закороток на критическое значение сверхтока в грязных $S-I-S$ контактах при температуре $T = 0$. Новые результаты получены в работе [A2] и описаны в подразделах 4.3 и 4.4.

Сначала при $T = 0$ рассмотрена модель грязного туннельного контакта в виде сэндвича $S-I-S$, представляющего собой два одинаковых сверхпроводника, разделенных плоским тонким слоем изолятора толщиной L и площадью S с вкрапленными в него одинаковыми притягивающими электроны немагнитными примесями. Регулярный (не возмущенный примесями) барьерный потенциал I -слоя равен $U_0 = const > \mu$ (μ – электронный химпотенциал контакта), электроны в I -слое предполагаются невзаимодействующими как между собой, так и с другими квазичастицами, а их подбарьерное рассеяние на примесях – упругим. Энергия однопримесного электронного уровня $\varepsilon_0 = \mu$, радиус локализации электронного состояния на нем $\alpha^{-1} = \left[2m_e (U_0 - \varepsilon_0) / \hbar^2 \right]^{-1/2}$. По объему $V_i = L \cdot S$ неупорядоченного I -слоя распределены $N_i \gg 1$ примесей макроскопически однородно с плотностью $n = N_i / V_i$ ($c = n\alpha^{-3} \ll 1$ – их безразмерная концентрация), S -берега описываются моделью БКШ. Для

электронов проводимости в N -берегах (при $T > T_c$) предполагается изотропный квадратичный закон дисперсии $\varepsilon_{\mathbf{p}} = \mathbf{p}^2/2m_e$.

Критическое значение джозефсоновского тока через уединенную m -примесную квантовую закоротку с «шагом» u при температуре T представлено в виде, аналогичном использованному в работе [19]:

$$i_c^{(m)}(T, u) = \frac{4e}{\hbar} T \sum_{\omega_n} \sum_{\mathbf{p}, \mathbf{q}} |T_{\mathbf{p}, \mathbf{q}}^{(m)}(u)|^2 F^+(\xi_{\mathbf{p}}, \omega_n) F(\xi_{\mathbf{q}}, -\omega_n), \quad (16)$$

где:

$$F^+(\xi_{\mathbf{p}}, \omega_n) = \frac{\Delta}{\omega_n^2 + \Delta^2 + \xi_{\mathbf{p}}^2}, \quad F(\xi_{\mathbf{q}}, -\omega_n) = \frac{\Delta}{\omega_n^2 + \Delta^2 + \xi_{\mathbf{q}}^2} - \quad (17)$$

– аномальные температурные функции Грина в S -берегах, $\Delta = \Delta(T)$ – сверхпроводящая щель, $\xi_{\mathbf{p}} = \varepsilon_{\mathbf{p}} - \mu$, $\omega_n = (2n + 1)\pi T$, $T_{\mathbf{p}, \mathbf{q}}^{(m)}(u)$ – матричные элементы туннельного гамильтониана (7).

Исходя из выражения (16), получено следующее представление для критического сверхтока квантовой закоротки при $T=0$:

$$i_c^{(m)}(T = 0, u) = \left[\frac{\pi \Delta_0}{2e} g_m(T^*, u) \right] \varphi_m(u, \Delta_0, T^*), \quad T^* > T_c, \quad (18)$$

где $T_c < T^* \ll \mu, U_0 - \mu$ – температура, при которой производится экспериментальное измерение линейного туннельного контактанса контакта, $\Delta_0 = \Delta(T = 0)$, выражение в квадратных скобках в (18) можно интерпретировать как правую часть соотношения Амбегаокара-Баратова при $T = 0$ [20, 21] для некоторого "виртуального" контакта – грязного S - I - S контакта, в котором сверхток течет лишь через рассматриваемую квантовую закоротку,

$$\varphi_m(u, \Delta_0, T^*) = \frac{4}{\pi^2} \arctg^2 \left[\frac{\gamma_m(u)}{\sqrt{2}\Delta_0} \right] \cdot \text{cth} \left[\frac{\gamma_m(u)}{2T^*} \right] - \quad (19)$$

– мультипликатор, учитывающий отклонение соотношения (18) от соотношения Амбегаокара-Баратова для виртуального контакта.

Учитывая, что $T_c < T^* \sim \Delta_0$ нетрудно убедиться, что функция $0 \leq \varphi_m(u, \Delta_0, T^*) < 1$ при всех физически возможных значениях своих аргументов. График зависимости (19) при $T^* = \Delta_0 = 1.76T_c$, как функции аргумента $x = \gamma_m/\Delta_0$ (рис. 5) является универсальной функцией аргумента x – одинаковой для всех квантовых закороток с различными значениями m и u .

Для «широкозонных» квантовых закороток ($x = \gamma_m(u)/\Delta_0 \gg 1$) $\varphi_m(x) \rightarrow 1$ и формула (18) переходит в соотношение Амбегаокара-Баратова при $T=0$, а для «узкозонных» ($x \ll 1$) $\varphi_m(x) \ll 1$ – соотношение Амбегаокара-Баратова сильно нарушается в сторону уменьшения критического значения сверхтока квантовой закоротки.

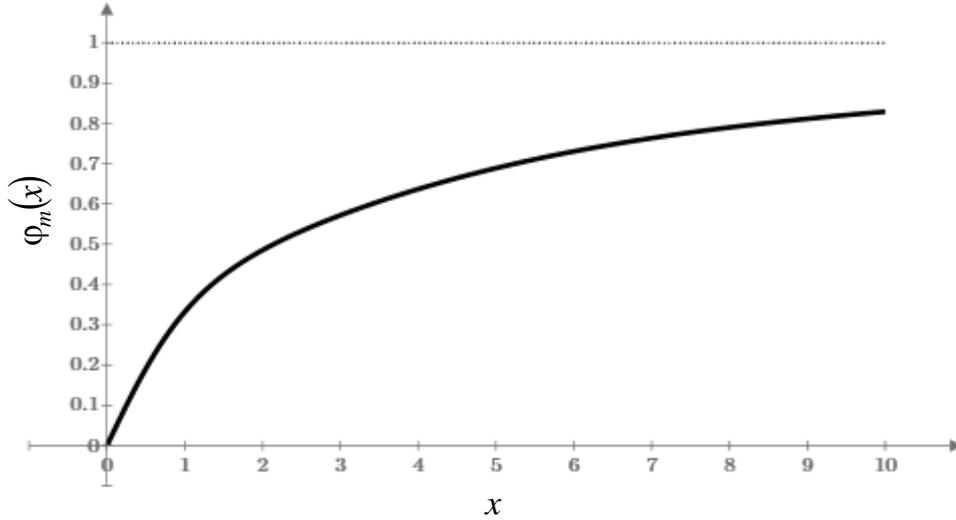


Рисунок 5 – Зависимость $\varphi_m(x)$, где $x = \gamma_m/\Delta_0$ – безразмерная ширина туннельного резонанса, ассоциированного с квантовой закороткой

Суммируя (18) по всем уединенным – «параллельно включенным» случайным квантовым закороткам с различными значениями m и u , и учитывая вклад чистого контакта, получаем для усредненного по случайным конфигурациям примесей в I -слое критического значения сверхтока всего грязного S - I - S контакта при $T=0$:

$$J_c(T=0) = \left[\frac{\pi\Delta_0}{2e} G(T^*) \right] \Phi(\Delta_0, T^*, c, \mathcal{L}), \quad \mathcal{L} = \alpha L, \quad T^* > T_c \quad (20)$$

где $G(T^*)$ – экспериментально измеряемый туннельный кондактанс грязного контакта при $T = T^* > T_c$, выражение в квадратной скобке в (20) – правая часть соотношения Амбегаокара-Баратова при $T=0$, $\Phi(\Delta_0, T^*, c, \mathcal{L})$ – мультипликатор для всего контакта, c – концентрация примесей.

Аналитически показано, что мультипликатор $\Phi(\Delta_0, T^*, c, \mathcal{L})$, учитывающий отклонение соотношения (20) от соотношения Амбегаокара-Баратова, удовлетворяет неравенству:

$$0 \leq \Phi(\Delta_0, T^*, c, \mathcal{L}) < 1, \quad (21)$$

то есть критическое значение сверхтока $J_c(T=0)$ грязного $S-I-S$ контакта оказывается всегда меньше, чем то его значение, которое дается соотношением Амбегаокара-Баратова. Если же вклад узкозонных квантовых закороток в (20) является главным, то $\Phi \ll 1$ – соотношение Амбегаокара-Баратова сильно нарушается. Лишь в чистом контакте ($c=0$) $\Phi(\Delta_0, T^*, c=0, \mathcal{L})=1$.

В подразделе 4.4 приведены численные оценки и предложена принципиальная схема эксперимента по косвенному измерению мультипликатора Φ .

Численные оценки $\Phi(\Delta_0, T^*, c, \mathcal{L})$, проведенные для характерных значений $U_0 = 10$ эВ, $\mu = 5$ эВ, $\Delta_0 = 10^{-3}$ эВ, $T^* = \Delta_0$ показывают, что при $\mathcal{L} = 10$ узкозонными оказываются лишь наиболее вероятные однопримесные ($m=1$) квантовые закоротки, и величина $\Phi \ll 1$ в интервале концентраций примеси $10^{-6} < c < 10^{-4}$. При $\mathcal{L} = 20$ узкозонными являются уже первые две ($m=1, 2$) наиболее вероятные квантовые закоротки, и $\Phi \ll 1$ в интервале концентраций $10^{-10} < c < 10^{-5}$. Приведенные оценки показывают возможность экспериментального проявления рассмотренного эффекта.

Принципиальная схема эксперимента может выглядеть так. В достаточно толстом ($\mathcal{L} \geq 10$) грязном $S-I-S$ контакте достаточно большой площади ($S \gg \alpha^{-2} c^{-1} \exp(c\pi\mathcal{L}^3)$), необходимой для подавления мезоскопических флуктуаций туннельного кондактанса, проводятся независимые измерения: 1) величины сверхпроводящей щели $\Delta_0 = \Delta(T \rightarrow 0)$; 2) туннельного кондактанса $G(T^*)$ при $T^* = \Delta_0$ и напряжении $V \ll \Delta_0/e$; 3) критического значения сверхтока контакта $J_c(T \rightarrow 0)$. Из соотношения (20) по этим данным вычисляется величина Φ . Значение $\Phi < 1$ могло бы интерпретироваться в рамках изложенных представлений, а значение $\Phi \ll 1$ могло бы свидетельствовать о решающем вкладе узкозонных квантовых закороток в величину критического сверхтока грязного $S-I-S$ контакта. Эти результаты позволили сформулировать второе научное положение.

В пятом разделе проведено исследование влияния случайных квантовых закороток на одночастичный низкотемпературный ($0 \leq T \ll \Delta_0$)

ток в грязных $S-I-N$ контактах. Новые результаты получены в работе [A1] и описаны в подразделах 5.2 и 5.3.

Сначала в подразделе 5.2 выведена формула для одночастичного низкотемпературного тока в грязном $S-I-N$ контакте

$$J(V, T) = \left[\frac{G_n}{e} \sqrt{2\pi\Delta_0 T} e^{-\frac{\Delta_0}{T}} \operatorname{sh}\left(\frac{eV}{T}\right) \right] \Phi(\Delta_0, T, c, \mathcal{L}), \quad (22)$$

где выражение в квадратных скобках есть формула для одночастичного тока существующей теории [8], $0 \leq \Phi(\Delta_0, T, c, \mathcal{L}) < 1$ – мультипликатор, учитывающий отклонение ВАХ (22) от ВАХ существующей теории. Для типичных значений параметров грязного $S-I-N$ контакта построены безразмерные ВАХ (22) и ВАХ существующей теории и продемонстрирован весьма значительный недостаток тока на ВАХ (22) по сравнению с ВАХ существующей теории. Затем в подразделе 5.3 предложена принципиальная схема эксперимента по косвенному измерению мультипликатора Φ , входящего в (22). Описанные выше результаты позволили сформулировать третье научное положение.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации:

1. Низкотемпературный туннельный кондактанс грязного $N-I-N$ контакта аналитически представлен в виде суммы кондактансов случайных квантовых закороток.
2. Показано, что присутствие случайных квантовых закороток в грязном $N-I-N$ контакте приводит к тому, что на оси параметра $\delta = |\varepsilon_0 - \varepsilon_F|$ существует ряд точек бифуркации, при переходе через каждую из которых происходят не только сильные количественные, но и, что более важно для эксперимента, качественные изменения низкотемпературной зависимости туннельного кондактанса $G(T)$ грязного $N-I-N$ контакта – рождение максимума на этой зависимости.
3. Численными расчетами показана принципиальная возможность экспериментального наблюдения, по крайней мере, одного из обусловленных случайными квантовыми закоротками максимумов низкотемпературной зависимости туннельного кондактанса $G(T)$ грязного $N-I-N$ контакта.
4. Матричные элементы туннельного гамильтониана квантовых закороток в грязных $M-I-M$ туннельных контактах аналитически представлены формулами, учитывающими, что подавляющий вклад в гибридизацию электронных состояний в различных берегах контакта

вносят области энергий внутри туннельных резонансов, ассоциированных со случайными квантовыми закоротками.

5. Критический сверхток в грязном $S-I-S$ контакте при $T = 0$ аналитически представлен формулой, учитывающей посредством введенного в работе мультипликатора, вклад случайных квантовых закороток в величину этого сверхтока.
6. Показано, что присутствие случайных узкозонных квантовых закороток в грязных $S-I-S$ контактах приводит при $T = 0$ к значительному нарушению известного в теории чистых (без примесей в I -слое) туннельных контактов соотношения Амбегаокара-Баратова для критического сверхтока контакта, что дает возможность экспериментально дифференцировать контакты на чистые и грязные.
7. Основываясь на численных оценках критического сверхтока грязного $S-I-S$ контакта, предложена принципиальная схема эксперимента по обнаружению нарушения соотношения Амбегаокара-Баратова.
8. Одночастичный низкотемпературный ток в грязном $S-I-N$ контакте представлен формулой, учитывающей, что главный вклад в величину этого тока вносят случайные квантовые закоротки.
9. Показано, что присутствие случайных узкозонных квантовых закороток в грязном $S-I-N$ контакте приводит к значительному недостатку одночастичного тока по сравнению с одночастичным током, рассчитанным для этого же контакта в рамках существующей сейчас теории Голубева-Кузьмина для чистых $S-I-N$ контактов.
10. Основываясь на численных оценках одночастичного тока, предложена принципиальная схема эксперимента по обнаружению эффекта недостатка одночастичного тока в грязных $S-I-N$ контактах.

Таким образом, в результате решения поставленных задач обнаружено сильное, как в количественном, так и в качественном отношении, влияние случайных квантовых закороток на низкотемпературный туннельный контактанс грязного $N-I-N$ контакта, критический сверхток грязного $S-I-S$ контакта при $T = 0$ и величину одночастичного низкотемпературного тока в грязном $S-I-N$ контакте. Следовательно, поставленная автором цель диссертационного исследования достигнута.

Список цитированной литературы

1. Бароне, А. Эффект Джозефсона. Физика и применение / А. Бароне, Дж. Патерно. – М.: Мир, 1984. – 639 с.

2. Golubov, A.A. The current-phase relation in Josephson junctions / A.A. Golubov, M. Yu. Kupriyanov, E. Il'ichev // *Rev. Mod. Phys.* – 2004. – V.76. – P. 411-469.
3. Giazotto, F. Opportunities for mesoscopics in thermometry and refrigeration: Physics and applications / F. Giazotto, T. T. Heikkilä, A. Luukanen, A. M. Savin and J. P. Pekola // *Rev. Mod. Phys.* – 2006. – V. 78. – P. 217.
4. Feshchenko, A.V. Tunnel-Junction Thermometry Down to Millikelvin Temperatures / A. V. Feshchenko, L. Casparis, I. M. Khaymovich, D. Maradan, O.-P. Saira, M. Palma, M. Meschke, J. P. Pekola and D. M. Zumbühl // *Phys. Rev. Appl.* – 2015. – V. 4. – P. 03401.
5. Nguyen, H.Q. Sub-50-mK Electronic Cooling with Large-Area Superconducting Tunnel Junctions / H. Q. Nguyen, M. Meschke, H. Courtois and J. P. Pekola // *Phys. Rev. Appl.* – 2014. – V. 2. – P. 054001.
6. Tarasov, M. Quantum Efficiency of Cold Electron Bolometer Optical Response / M. Tarasov, V. Edelman, A. Ermakov, S. Mahashabde and L. S. Kuzmin // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* – 2015. – V. 5. – Iss.1. – P.44.
7. Seliverstov, A.V. The Andreev conductance in superconductor–insulator–normal metal structures/ A. V. Seliverstov, M. A. Tarasov and V. S. Edel'man // *Journal of Experimental and Theoretical Physics.* – 2017. – V. 124. – P. 643-656.
8. Golubev, D. Nonequilibrium theory of a hot-electron bolometer with normal metal-insulator-superconductor tunnel junction / D. Golubev and I. Kuzmin // *J.Appl. Phys.* – 2001. – V. 89. – P. 6484.
9. Hekking, F. W. J. Subgap conductivity of a superconductor-normal metal tunnel interface / F. W. J. Hekking and Yu. V. Nazarov // *Phys. Rev. B.* – 1994. – V.49. – P. 6487.
10. Валиев, К.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность / К.А. Валиев, А.А. Кокин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 352с.
11. Лифшиц, И.М. О туннельной прозрачности неупорядоченных систем / И.М. Лифшиц, В.Я. Кирпиченков // *ЖЭТФ.* – 1979. – Т. 77. – С. 989–1016.
12. Кирпиченков, В.Я. Резонансная вольт-амперная характеристика трехмерного туннельного перехода со слабым структурным беспорядком / В.Я. Кирпиченков // *ЖЭТФ.* – 1999. – Т.116. – С. 1048–1057.
13. Лифшиц, И.М. Введение в теорию неупорядоченных систем / И.М. Лифшиц, С.А. Гредескул, Л.А. Пастур. – М.: Наука, 1982. – 360 с.
14. Кирпиченков, В.Я. Теория стохастического туннелирования в неупорядоченных наноструктурах / В.Я. Кирпиченков. – М.: "Экономическое образование", 2006. – 193 с.
15. Bardeen, J. Tunnelling from a many-particle point of view / J. Bardeen // *Phys. Rev. Letters.* – 1961. – V.6. – P. 57 – 59.

16. Cohen, M. H. Superconductive Tunneling / M. H. Cohen, L. M. Falicov, J. C. Phillips // Phys. Rev. Letters. – 1962. – V. 8. – P. 316.
17. Harrison, W.A. Tunneling from an Independent-Particle Point of View / W.A. Harrison // Phys. Rev. – 1961. – V. 123. – Iss.1. – P. 85 – 89.
18. Левитов, Л.С. Функции Грина. Задачи с решениями / Л.С. Левитов, А.В. Шитов. – М.: Физматлит, 2002. – 392 с.
19. Кулик, И.О. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах / И.О. Кулик, И.К. Янсон. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
20. Ambegaokar, V. Tunneling between superconductors / V. Ambegaokar, A. Baratoff // Phys. Rev. Letters. – 1963. – V. 10. – Iss. 11 – P.486.
21. Ambegaokar, V. Tunneling between superconductors (errata) / V. Ambegaokar, A. Baratoff // Phys. Rev. Letters. – 1963. – V. 11. – Iss. 2 – P.104.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в научном журнале, индексируемом в международной базе научного цитирования WoS CC

A1. Кирпиченков, В.Я. / Влияние случайных квантовых закоронок на одночастичный низкотемпературный ток в грязных SIN-контактах [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Косач** // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – № 2. – С. 114 – 118.

Англ. перевод: Kirpichenkov, V. Ya. Effect of Random Quantum Jumpers on the Single-Particle Low-Temperature Current in Dirty SIN Junctions [Текст] / V. Ya. Kirpichenkov, N.V. Kirpichenkova, O.I. Lozin, **A.A. Kosach** // JETP Letters. – 2020. – V. 112. – № 2. – P. 112 – 116.

A2. Кирпиченков, В.Я. / Влияние квантовых закоронок на критическое значение сверхтока в грязных S-I-S контактах [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Пухлова** // Письма в ЖЭТФ. – 2018. – Т. 108. – №1- 2. – С. 99 – 102.

Англ. перевод: Kirpichenkov, V. Ya. Effect of Quantum Jumpers on the Critical Supercurrent in Dirty S-I-S Junctions [Текст] / V. Ya. Kirpichenkov, N.V. Kirpichenkova, O.I. Lozin, **A.A. Pukhlova** // JETP Letters. – 2018. – V. 108. – №2. – P. 112 – 115.

A3. Кирпиченков, В.Я. Бифуркации рождения низкотемпературных максимумов туннельного кондактанса грязного N-I-N контакта [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Пухлова** // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105. – № 9-10. – С. 577 – 580.

Англ. перевод: Kirpichenkov, V. Ya. Bifurcations of the Creation of Low-Temperature Maxima of the Tunneling Conductance of a "Dirty" N-I-N Junction [Текст] / V. Ya. Kirpichenkov, N.V. Kirpichenkova., O.I. Lozin, **A.A. Pukhlova** // JETP Letters. – 2017. – V. 105. – № 9. – P. 613 – 616.

*Статья в научном журнале, индексируемом в международной базе
научного цитирования Scopus*

A4. Кирпиченков, В.Я. Туннельный гамильтониан для грязных М-I-M контактов [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Пухлова** // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т. 82. – № 7. – С. 104 – 106.

Англ. перевод: Kirpichenkov, V. Ya. A Tunnel Hamiltonian for Impure M–I–M Junctions [Текст] / V. Ya. Kirpichenkov, N.V. Kirpichenkova, O.I. Lozin, **A.A. Pukhlova** // Bulletin of the Russian Academy of Science: Physics. – 2018. – Vol. 82. – №7. – P. 945 – 946.

Тезисы докладов на научных конференциях

A5. Кирпиченков, В.Я. Аномальная низкотемпературная зависимость туннельного кондактанса грязного N-I-N контакта [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Пухлова** // XXXVIII Собрание по физике низких температур (НТ–38) : [тезисы докладов], 17-22 сентября 2018 г., Москва - Ростов н/Д – Шепси – Ростов-на-Дону : Фонд науки и образования, 2018. – С. 134 – 135.

A6. Кирпиченков, В.Я. Влияние квантовых закороток на критическое значение сверхтока в грязных S-I-S контактах [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Пухлова** // XXXVIII Собрание по физике низких температур (НТ–38) : [тезисы докладов], 17-22 сентября 2018 г., Москва - Ростов н/Д – Шепси – Ростов-на-Дону : Фонд науки и образования 2018. – С. 196 – 199.

A7. Кирпиченков, В.Я. Туннельный гамильтониан для грязных М-I-M контактов [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Пухлова** // Порядок в минералах и сплавах. – ОМА–20 = Ordering in Minerals and Alloys. – г. Москва, г. Ростов н/Д, пос. Южный, 10 – 15 сент. 2017 г. Труды междунар. симпозиума. Ростов н/Д: Фонд науки и образования, 2017. – Т.1. – С. 175 – 176.

A8. Кирпиченков, В.Я. Бифуркации рождения низкотемпературных максимумов туннельного кондактанса грязного N-I-N контакта [Текст] / В.Я. Кирпиченков, Н.В. Кирпиченкова, О.И. Лозин, **А.А. Пухлова** // Порядок, беспорядок и свойства оксидов. – ODPO–20 = Order, Disorder and Properties of Oxides. – г. Москва, г. Ростов н/Д, пос. Южный, 5 – 10 сент. 2017 г. Труды междунар. симпозиума. Ростов н/Д: Фонд науки и образования, 2017. – Т.1. – С. 117 – 121.