

*На правах рукописи*

Колотинский Николай Васильевич

**Сверхпроводящие квантовые решетки как широкополосные  
активные устройства**

01.04.04 – физическая электроника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2015.

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Корнев Виктор Константинович**  
доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: **Тарасов Михаил Александрович**  
доктор физ.-мат. наук, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники (ИРЭ) им. В.А.Котельникова РАН

**Семенов Александр Владимирович**  
кандидат физ.-мат. наук, доцент Института физики, технологии и информационных систем Московского педагогического государственного университета (МПГУ)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «**Физико-технологический институт Российской академии наук**» (ФТИАН)

Защита диссертации состоится «7» апреля 2016 года в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.66 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, Физический факультет МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова и на сайтах: <http://phys.msu.ru/rus/research/dissert/sovet-D501-001-66/> и <http://istina.msu.ru/dissertations/12332730/>.

Автореферат разослан «5» февраля 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 501.001.66, к.ф.-м.н.

И.Н. Карташов

## Общая характеристика диссертационной работы

Диссертационная работа посвящена исследованию достижимых характеристик сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) на основе дифференциальных квантовых ячеек, а также изучению широкополосных активных устройств, реализованных на базе СКР, в том числе активных электрически малых антенн (ЭМА).

### Актуальность работы

Аналоговые и цифровые устройства сверхпроводниковой электроники, в основе физики которых лежат макроскопические квантовые эффекты в сверхпроводниках, обладают уникальными характеристиками, недоступными для полупроводниковой электроники. Высокое быстродействие и предельно низкая энергия переключения джозефсоновских элементов  $E_J = \Phi_0 I_C = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб} \times 10^{-4} \text{ А} \approx 10^{-18} \text{ Дж}$ , а также исключительно высокая чувствительность сверхпроводящих квантовых интерференционных устройств, сквидов (*англ.*: SQUID – Superconducting Quantum Interference Device) на основе джозефсоновских переходов с энергетическим разрешением порядка  $10^{-32} \text{ Дж/Гц}$  (то есть близким к постоянной Планка  $\hbar$ ) открывают широкие возможности для разработки устройств, способных работать в верхних диапазонах частот сигналов, обеспечивающих высокие скорости обработки информации и предельно высокую чувствительность.

Прогресс в области цифровых устройств на основе быстрой одноквантовой логики, известной как RSFQ-логика (Rapid Single Flux Quantum logic) [1–3], а также высокочувствительных широкополосных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [4–7], открывает, в том числе, новые возможности в развитии технологий приема, обработки и защиты информации на основе широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой входного сигнала [8–15].

В то же время, несмотря на рекордные достижения сверхпроводниковой электроники в области высокочувствительных устройств, построенных на основе сквидов и предназначенных для использования в диапазоне низких частот (до  $\sim 1 \text{ МГц}$ ), создание широкополосных низкошумящих сверхпроводниковых активных устройств (усилителей, активных антенн) высокочастотного диапазона (до  $10 \text{ ГГц}$ ) с большим динамическим диапазоном остается нерешенной, но

крайне востребованной задачей.

В настоящее время решение этой задачи связывается с использованием специальных многоэлементных джозефсоновских структур, получивших название сверхпроводящих квантовых решеток (СКР). Поэтому данная работа, посвященная изучению достижимых характеристик СКР на основе дифференциальных квантовых ячеек и широкополосных активных устройств, реализованных на базе СКР, в том числе активных электрически малых антенн (ЭМА), является крайне актуальной.

## **Цель работы**

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование достижимых характеристик сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) на основе дифференциальных квантовых ячеек, изучение широкополосных активных устройств, реализованных на базе СКР, в том числе активных электрически малых антенн (ЭМА), а также разработка и реализация прототипа активной ЭМА на основе тонкопленочной ниобиевой технологии интегральных схем.

## **Научная новизна**

1. Разработаны и применены методы многопараметрического анализа и оптимизации многоэлементных джозефсоновских устройств с высокой линейностью характеристик до 100 дБ, к которым относятся изучаемые в диссертационной работе сверхпроводящие квантовые ячейки.

2. Впервые рассмотрена задача анализа влияния нагрузки на линейность характеристик квантовых ячеек, а также достижимой степени и условий компенсации этого воздействия.

3. Исследована и сформулирована стратегия решения задачи построения интерфейса, мало возмущающего характеристики активной сверхпроводящей антенны при ее сопряжении с низкоомными устройствами.

4. Впервые изучены размерные эффекты в активных сверхпроводящих электрически малых антеннах и их влияние на линейность выходного сигнала антенны за счет фазового сдвига входных сигналов в плечах дифференциальных квантовых ячеек и нарушения симметрии распределения магнитного потока внутри квантовых ячеек.

5. Реализован и исследован прототип активной электрически малой антенны бестрансформаторного типа с общим числом дифференциальных квантовых ячеек 588. Достигнуты значения крутизны линейного преобразования магнитного сигнала в напряжение 8000 мкВ/мкТ с размахом отклика напряжения до 100 мВ.

## **Практическая ценность работы**

Практическая ценность данной работы заключается в развитии физических основ построения сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) на основе дифференциальных квантовых ячеек, а также в изучении широкополосных активных устройств, реализованных на базе СКР, в том числе активных электрически малых антенн (ЭМА), и обосновании достижимых характеристик таких устройств.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке сверхпроводниковой электроники и информационных технологий и служить основой для последующих опытно-конструкторских разработок в области приема, обработки и защиты информации. Разработка технологии приема большого числа сигналов от различных источников с последующей параллельной обработкой сигналов является актуальной, и результаты исследования смогут найти широкое применение в разных системах беспроводной связи:

- в стационарных станциях радиосвязи, работающих с большим количеством источников сигналов разного уровня, для увеличения их производительности и «пропускной» способности, для одновременного приема контента различного типа и назначения;
- в системах, реализующих задачи удаленного доступа к вычислительным центрам и «облачные» технологии хранения и обработки информации;
- в системах, реализующих новые принципы функционирования систем защиты информации посредством программно-определяемой связи, в рамках которой частота и тип кодировки радиосигнала устанавливается динамически в широкой полосе частот;
- в программно-аппаратных комплексах специального назначения.

## **Достоверность результатов**

Достоверность результатов, приведенных в диссертации, подтверждается тем, что они были получены автором с использованием современных математических методов, вычислительных средств и программного обеспечения, а также современных технологий и экспериментального оборудования. Численный анализ сосредоточенных джозефсоновских структур проводился с использованием программного обеспечения PSCAN, являющегося одним из наиболее эффективных программных пакетов для численного моделирования сверхпроводниковых схем [16]. Полученные результаты находятся в соответствии с имеющимися литературными данными. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями, выполненными автором на измерительном оборудовании фирмы Nupres (США), а также опубликованными результатами других независимых исследований, в том числе результатами публикаций [17, 18].

## **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялись: разработка ряда методов численного моделирования; конструирование узлов экспериментальной установки; проведение экспериментов и интерпретация полученных результатов; совместно с научным руководителем была поставлена научная задача. Соискателем совместно с соавторами проводилась подготовка публикаций и докладов на конференциях. Значительная часть результатов исследований докладывалась лично автором.

## **Апробация и публикация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и симпозиумах, таких как:

- Всероссийская научно-техническая конференция «Микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, Россия, 4–12 июня 2012 г.;
- Международная конференция «Микро- и наноэлектроника – 2012», Звенигород, Россия, 1–5 октября 2012 г.;
- XIV Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» («Волны-2013»), Можайск, Россия, 20–25 мая 2013 г.;

- 14-ая Международная конференция по сверхпроводниковой электронике (14th International Superconducting Electronics Conference, ISEC-2013), Кембридж, Массачусетс, США, 7–11 июля 2013 г.;
- Европейская школа для молодых ученых «Новые тенденции в сверхпроводниковых квантовых детекторах» (“New Trends with Superconducting Quantum Detectors”), Генуя, Италия, 9–13 сентября 2013 г.;
- 11-ая Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (11th European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS-2013), Генуя, Италия, 15–19 сентября 2013 г.;
- 12-ая Международная конференция по наноструктурированным материалам (XII International Conference on Nanostructured Materials, NANO-2014), Москва, Россия, 13–18 июля 2014 г.;
- Международная конференция по прикладной сверхпроводимости (Applied Superconductivity Conference, ASC-2014), Шарлотт, Северная Каролина, США, 10–15 августа 2014 г.;
- 15-ая Международная конференция по сверхпроводниковой электронике (15th International Superconducting Electronics Conference, ISEC-2015), Нагоя, Япония, 6–9 июля 2015 г.;
- 12-ая Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (12th European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS-2015), Лион, Франция, 6–10 сентября 2015 г.;
- Итоги реализации в 2015 году ПНИЭР по приоритетным направлениям в рамках ФЦП «Исследования и разработки 2014–2020», Москва, Россия, 2–4 декабря 2015 г.

По материалам диссертации было опубликовано 9 статей, из них 6 [А1–А6] в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций, и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. По материалам диссертации подана заявка на патент [А7].

## Содержание работы

В разделе «**Общая характеристика диссертационной работы**» рассмотрены вопросы актуальности темы исследования, сформулирована цель работы, раскрыты научная новизна, практическая ценность работы, приведена информация о личном вкладе автора, достоверности и апробации результатов диссертационной работы.

**Глава 1** содержит введение, аналитический обзор литературы и постановку задачи диссертационной работы.

Основной задачей диссертационной работы является теоретическая разработка физических основ использования макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках для создания высокочувствительных широкополосных активных устройств приема и усиления сигналов, в том числе сверхпроводящих активных электрически малых антенн (ЭМА) гигагерцового диапазона частот на основе сверхпроводящих квантовых решеток, а также экспериментальное подтверждение теоретических исследований.

Постановка указанной задачи определяется востребованностью создания широкополосных устройств, обладающих высокой чувствительностью, присущей сквидам, и характеризующихся при этом высокой линейностью и большим динамическим диапазоном. Такие устройства необходимы для развития новых технологий приема информации по различным каналам связи, обработки и защиты информации с использованием широкополосных приемных систем с прямой оцифровкой сигналов и их последующей цифровой фильтрацией и идентификацией.

Решение этой задачи может быть достигнуто с использованием специальных многоэлементных джозефсоновских структур, которые получили название сверхпроводящих квантовых решеток (СКР). Линейность выходного сигнала СКР определяется линейностью откликов ячеек решетки, а динамический диапазон возрастает с увеличением числа ячеек в решетке. При этом импеданс СКР может изменяться за счет использования комбинированного последовательно-параллельного электрического соединения ячеек.

Задачи, решаемые в диссертационной работе, разделяются на следующие части: разработка методов оптимизации базовых ячеек сверхпроводящей квантовой решетки – дифференциальных квантовых ячеек; разработка методов ана-



лиза линейности радиотехнических структур; исследование поведения дифференциальных ячеек в качестве компонентов электрически малой антенны; исследование коллективного поведения ячеек в составе сверхпроводящей квантовой решетки и активной электрически малой антенны на ее основе; экспериментальное подтверждение теоретического анализа и результатов численного моделирования.

В Главе 2 дается описание использованных методов численного анализа линейности отклика напряжения квантовых ячеек с использованием математических алгоритмов, позволяющих анализировать высокий уровень линейности в пределах до 100 дБ. Рассматриваются методы оптимизации параметров и режимов работы дифференциальных квантовых ячеек.

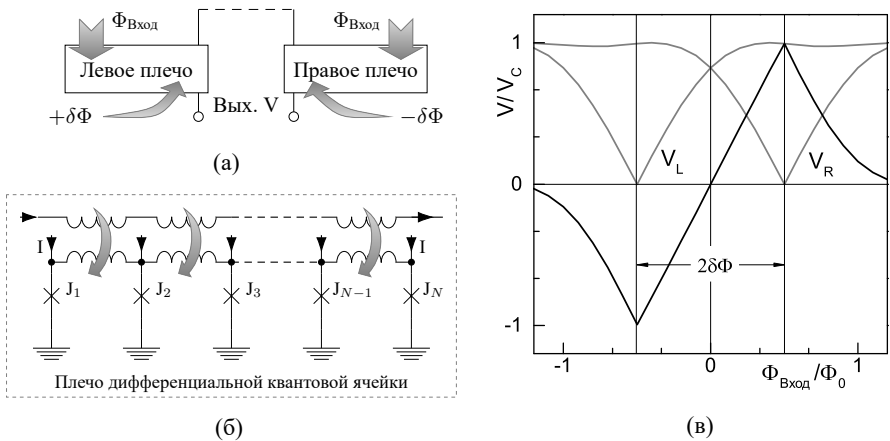


Рис. 1 – Блок-схема дифференциальной квантовой ячейки (а) и принципиальная схема каждого из ее плеч (б) – параллельной цепочки джозефсоновских переходов  $J_1; J_2; \dots; J_N$ , магнитное поле к которой прикладывается посредством индуктивно связанной с ней управляющей линии (задание магнитного потока смещения  $\delta\Phi$ , входного сигнала  $\Phi_{\text{Вход}}$ ). Полный ток смещения цепочки превышает максимальную величину критического тока цепочки  $I_C = \sum I_{Ck}$  и, таким образом, обуславливает резистивное состояние цепочки. (в) Отклик напряжения  $V$  дифференциальной ячейки, а также индивидуальные отклики напряжения левого ( $V_L$ ) и правого ( $V_R$ ) плеч ячейки (светлые линии), смещенные по магнитному потоку на величину  $+\delta\Phi$  и  $-\delta\Phi$  соответственно.

Дифференциальная ячейка состоит из двух низкоиндуктивных параллельных цепочек джозефсоновских переходов (плеч ячейки) в резистивном состоянии, включенных дифференциально и смещенных взаимно-противоположно некоторым магнитным потоком  $\delta\Phi$ . За счет задания топологии цепочек можно реализовывать как однородное распределение потока вдоль цепочки, так и изменяющееся по определенному закону. В последнем случае плечо дифференциальной ячейки будет представлять собой сверхпроводящий квантовый интерференционный фильтр (СКИФ). На рисунках 1а и 1б показана блок-схема дифференциальной квантовой ячейки и принципиальная схема каждого из ее плеч – параллельной цепочки джозефсоновских переходов, магнитное поле к которой прикладывается посредством индуктивно связанной с ней управляющей линии, обеспечивающей задание магнитного потока смещения  $\delta\Phi$ . Полный ток смещения цепочки  $I_B$  должен несколько превышать величину критического тока цепочки  $I_C = \sum I_{c,k}$  и, таким образом, обуславливать резистивное состояние цепочки ( $I_{c,k}$  – критический ток  $k$ -ого перехода цепочки).

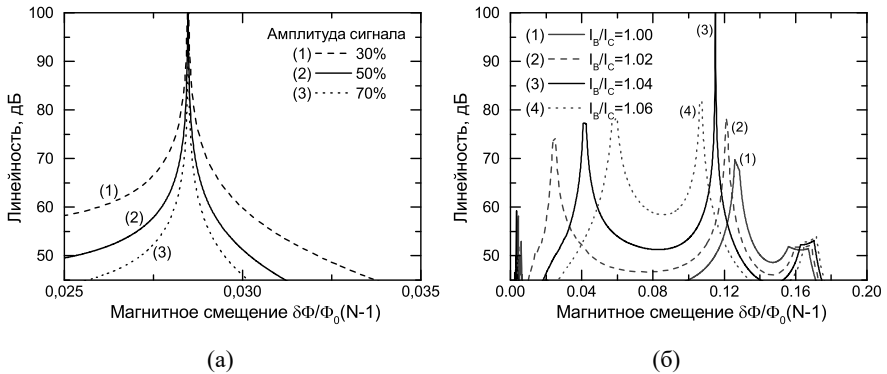


Рис. 2 – (а) Зависимость линейности от смещения по магнитному потоку  $\delta\Phi$  дифференциальной квантовой ячейки с нулевыми индуктивностями с  $N = 20$  переходами в каждом плече для различных амплитуд входного гармонического сигнала, составляющих 30%, 50% и 70% от полного размаха отклика ячейки по потоку. (б) Зависимость линейности дифференциальной квантовой ячейки с индуктивностями связи  $l = 0,5$  для плеча из  $N = 20$  переходов от смещения по магнитному потоку  $\delta\Phi$  для различных величин тока смещения при амплитуде входного потока, составляющего 50% от полного размаха отклика ячейки по потоку.

Поскольку форма основного пика отклика напряжения плеча ячейки близка к параболической, разность откликов напряжения плеч ячейки (разность парабол), дает линейный отклик такой дифференциальной ячейки. Для более точного описания отклика цепочки следует учесть в виде малых дополнительных членов параболы более высокого порядка (четвертого и шестого), существование которых ограничивает линейность отклика ячейки. Если приложенное магнитное смещение  $\delta\Phi$  совпадает с положением вершины параболы четвертой (или шестой) степени вклад этой параболы в отклик напряжения становится нулевым. Поскольку вершины этих парабол в общем случае не совпадают, их вклад всегда остается конечным, и оптимальным магнитным смещением является такое смещение, при котором вклад этих парабол становится минимальным.

Линейность функции отклика напряжения на внешний магнитный поток дифференциальной квантовой ячейки с нулевыми индуктивностями связи (идеализированный случай) достигает значений выше 100 дБ (при амплитудах сигнала, достигающих 50% от амплитуды отклика напряжения ячейки) при оптимальном магнитном смещении (см. рис. 2а), однако даже при малом отклонении смещения от оптимальной величины линейность резко падает. Уменьшить влияние точности задания рабочей точки позволяет применение структур с нерегулярным заданием площадей ячеек плеча дифференциальной квантовой структуры – СКИФ-структур.

В случае реальной цепочки переходов с конечными индуктивностями связи джозефсоновских переходов форма откликов с ростом числа переходов становится близкой к параболической за исключением некоторой начальной части отклика в области малых напряжений (низкие частоты джозефсоновской генерации). Эта область может быть исключена из отклика путем небольшого увеличения тока (на 4% – 6%) выше значения критического тока цепочки. При оптимальном магнитном смещении плеч такой ячейки линейность отклика может достигать 100 дБ (см. рис. 2б). При этом необходимая точность задания рабочей точки оказывается значительно ниже, чем для рассмотренного идеализированного случая. В случае малого влияния «размерных» эффектов применение СКИФ-структур вместо регулярной цепочки не имеет преимуществ перед обычной цепочкой параллельных переходов. Кроме того, конструирование

СКИФ-структур приводит к уменьшению общей величины потока, задаваемого в систему.

Необходимо подчеркнуть, что высокая линейность преобразования магнитного сигнала в напряжение (порядка 100 дБ и выше), достигается при практически реализуемых параметрах ячеек и диапазонах токового и магнитного смещения ячеек.

Таким образом, дифференциальная квантовая ячейка позволяет достичь высокой линейности функции отклика напряжения на внешнее магнитное поле при оптимальных параметрах и является наиболее перспективным элементом для использования в качестве базового блока сверхпроводящей квантовой решетки.

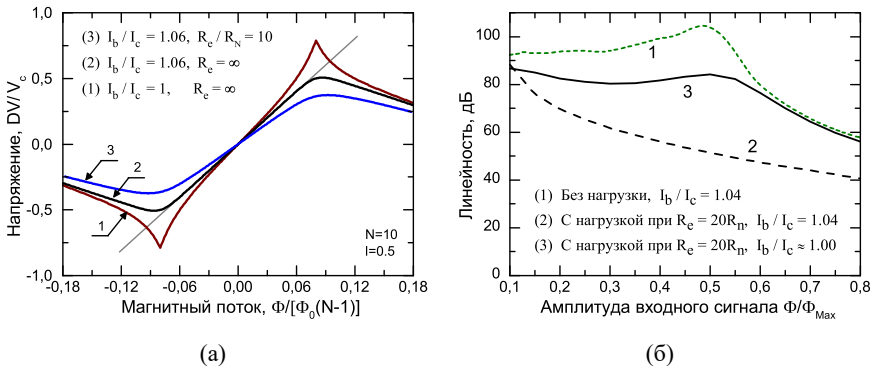


Рис. 3 – (а) Отклик напряжения квантовой дифференциальной ячейки, каждое плечо которой содержит 10 джозефсоновских элементов с нормированной величиной индуктивности связи этих элементов  $l = 0,5$ , без нагрузки при токах смещения  $I_b = I_C$  и  $I_b = 1,06I_C$  (оптимальном), а также нагруженной на резистивный импеданс  $R_c = 10R_N$  при том же токе смещения  $I_b = 1,06I_C$ , где  $R_N$  нормальное сопротивление плеча ячейки. Уменьшение тока смещения позволяет в значительной степени скомпенсировать влияние нагрузки и получить линейный отклик, близкий к отклику, показанному кривой 2. (б) Зависимость линейности выходного сигнала (напряжения) дифференциальной ячейки с индуктивностью связи  $l = 0,5$  из  $N = 20$  джозефсоновских элементов в каждом плече ячейки от амплитуды сигнала в ненагруженном состоянии при оптимальном токе смещения и нагруженном состоянии (импеданс нагрузки  $20R_N$ ) при том же токе смещения и уменьшенной величине тока смещения до нового оптимального значения.

В Глава 3 рассматривается влияние нагрузки, подключенной к сверхпроводящей квантовой решетке, на линейность выходного напряжения решетки как двухполюсного элемента.

Подключение нагрузки к сверхпроводящей квантовой решетке на основе дифференциальных квантовых ячеек существенно уменьшает линейность выходного сигнала. Как показано в диссертационной работе, для сохранения высокой линейности импеданс нагрузки должен превышать на порядок импеданс решетки (определяемого нормальным сопротивлением  $R_N$  плеч решетки), в этом случае влияние нагрузки может быть скомпенсировано за счет определенного уменьшения тока смещения  $I_b$  плеч решетки (см. рис. 3).

В условиях, когда импеданс нагрузки является заданной величиной, выполнение указанного соотношения между импедансами нагрузки и решетки может быть достигнуто за счет использования одновременного последовательного соединения ячеек и параллельного соединения блоков ячеек. При этом полное

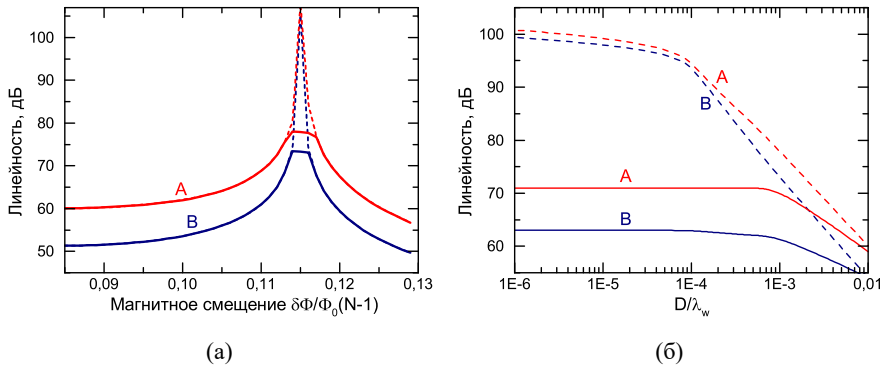


Рис. 4 – (а) Зависимость линейности отклика напряжения дифференциальной квантовой ячейки от магнитного смещения плеч ячейки при пренебрежимо малом размере ячейки  $D/\lambda_w \approx 0$  (штриховая линия) и при  $D/\lambda_w = 10^{-3}$  (сплошная линия) для амплитуд сигналов, использующих 30% (А) и 50% (В) полного размаха отклика напряжения ячейки. (б) Влияние размерного эффекта на линейность отклика напряжения дифференциальной квантовой ячейки при оптимальном смещении плеч ячейки (штриховые линии) и смещении, отличающемся на 3% от оптимального (сплошные линии). Расчеты выполнены для амплитуд сигналов, использующих 30% (А) и 50% (В) полного размаха отклика напряжения ячейки.

число ячеек определяется в соответствии с необходимой величиной динамического диапазона.

**Глава 4** посвящена изучению размерных эффектов в активной электрически малой антенне на основе СКР из дифференциальных квантовых ячеек и исследованию влияния этих эффектов на линейность выходного напряжения антенны. В случае одноконтурных ячеек (например, би-сквида) размерные эффекты в ячейках и СКР отсутствуют, однако при использовании дифференциальных квантовых ячеек размерные эффекты могут возникать как внутри каждого плеча ячейки, так и при сложении сигналов от этих плеч.

Если принимаемая электромагнитная волна распространяется перпендикулярно цепочке джозефсоновских переходов в плече ячейки, первый размерный эффект отсутствует, а при распространении волны вдоль цепочки возникает нарушение симметрии распределения входного магнитного потока вдоль ячейки. Такая асимметрия сильно снижает линейность выходного сигнала ячейки (см. рис. 4а). Практически этот размерный эффект проявляется при размерах ячейки, превышающих  $10^{-4}\lambda_W$ , где  $\lambda_W$  – длина волны (см. рис. 4б).

Второй размерный эффект возникает за счет появления сдвига фаз между

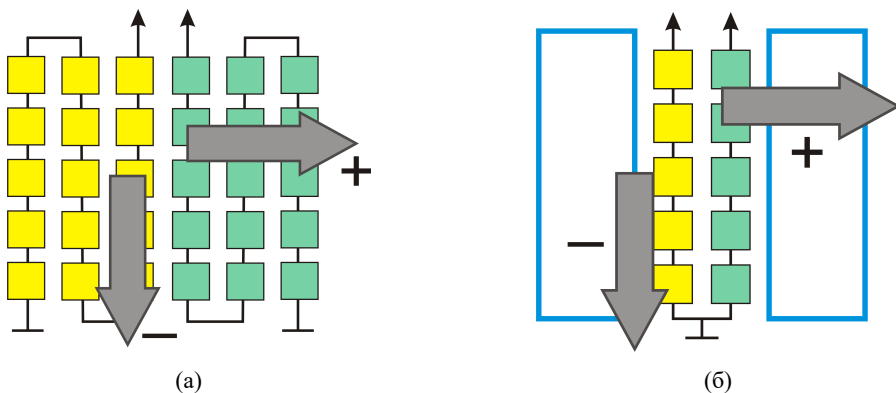


Рис. 5 – Влияние размерных эффектов на антенну, состоящую из двух дифференциально включенных последовательных цепочек плеч дифференциальной квантовой ячейки для случаев бестрансформаторной (а) и трансформаторной антенны с двумя трансформаторами (б). Стрелками показано направление распространения падающей волны в случаях наличия (+) и отсутствия (-) размерного эффекта.

входными сигналами плеч ячейки в том случае, когда плечи оказываются пространственно смещенными друг от друга в направлении распространения волны (см. рис. 5а).

Наибольшее влияние (примерно на порядок) на линейность оказывает первый эффект, то есть одинаковый вклад эффектов достигается в случае, когда смещение плеч вдоль распространения волны примерно в десять раз больше, чем длина цепочки (размер плеча).

При использовании трансформаторной конструкции антенны с одним общим трансформатором оба размерных эффекта отсутствуют, однако, в случае, когда используются два трансформатора, каждый из которых подключен к одноименным плечам квантовых ячеек решетки, будет иметь место размерный эффект второго типа, когда контуры трансформаторов смещены друг относительно друга в направлении распространения волны (см. рис. 5б).

Диаграмма направленности антенны бестрансформаторного типа совпадает с диаграммой направленности одной дифференциальной квантовой ячейки, изображенной на рисунке 6, эта диаграмма близка к диаграмме направленности обычной магнитной антенны (витка). В случае сверхпроводящей активной антенны трансформаторного типа диаграмма направленности будет определяться

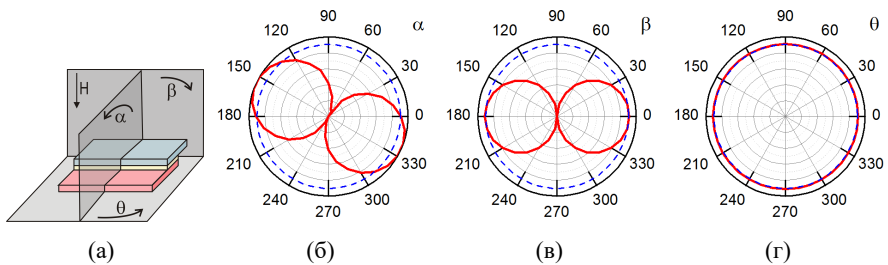


Рис. 6 – (а) Трехслойная структура сверхпроводник – диэлектрик – сверхпроводник, которая использовалась в качестве модели плеча дифференциальной квантовой ячейки при выполнении трехмерного моделирования в поле электромагнитной волны, и три взаимно перпендикулярных плоскости поворота этой структуры в пространстве с обозначением углов поворота в этих плоскостях  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\theta$ . (б, в, г) Диаграммы направленности, соответствующие вращению модельной структуры в плоскости  $\alpha$  при  $\beta = \theta = 0$  (б), в плоскости  $\beta$  при  $\alpha = \theta = 0$  (в) и в плоскости  $\theta$  при  $\alpha = \beta = 0$  (г).

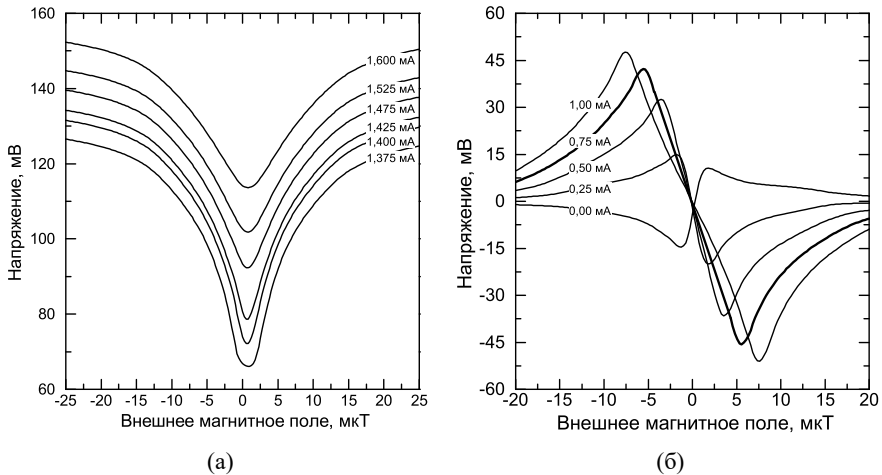


Рис. 7 – (а) Вольт-полевая характеристика плеча экспериментального прототипа электрически малой антенны для различных значений тока смещения от  $I_B = 1,375$  мА (нижняя кривая) до  $I_B = 1,600$  мА (верхняя кривая). (б) Вольт-полевая характеристика экспериментального прототипа электрически малой антенны при различных значениях тока задания магнитного смещения  $I_{Frust}$  для тока смещения  $I_b = 1,425$  мА.

контуром сверхпроводящего трансформатора и, таким образом, так же фактически совпадать с диаграммой направленности пассивной электрически малой антенны магнитного типа (витка).

**Глава 5** посвящена экспериментальному изучению прототипа активной электрически малой антенны на основе СКР из дифференциальных квантовых ячеек. Результаты экспериментального исследования подтверждают теоретических исследований и результаты численного моделирования.

С использованием стандартной ниобиевой тонкопленочной технологии с плотностью критического тока джозефсоновских элементов  $4,5$  кА/см<sup>2</sup> был изготовлен прототип бестрансформаторной антенны, содержащей 588 дифференциальных квантовых ячеек с оптимизированной топологией и занимающий площадь  $4,3$  мм  $\times$   $4,3$  мм на кремниевой подложке размером  $5$  мм  $\times$   $5$  мм.

Для выполнения экспериментального изучения прототипа активной электрически малой антенны, охлаждаемой жидким гелием внутри сосуда Дьюара, был разработан специальный держатель микросхемы, на котором располага-



лась также многovitковая катушка для задания магнитного поля, перпендикулярного плоскости чипа.

Были исследованы вольт-амперные и вольт-поточковые характеристики плеч активной электрически малой антенны (см. рис. 7а), а также отклик напряжения всей ЭМА на внешний магнитный сигнал (см. рис. 7б). Получены значения крутизны линейного преобразования магнитного сигнала в напряжение 8000 мкВ/мкТ с размахом (удвоенная амплитуда) отклика напряжения до 100 мВ, что позволяет сделать прогнозную оценку чувствительности антенны на уровне  $3 \cdot 10^{-14}$  Тл/Гц<sup>1/2</sup>.

В разделе «**Заключение**» приведены основные выводы диссертационной работы.

Работа также содержит два приложения. В **Приложении А** описаны разработанные методы анализа линейности отклика напряжения квантовых ячеек. **Приложение Б** посвящено вопросам трехмерного анализа поведения сверхпроводящих структур в поле падающей волны.

## **Выводы диссертационной работы**

В диссертационной работе выполнено исследование сверхпроводящих квантовых решеток (СКР) на основе дифференциальных квантовых ячеек для создания широкополосных активных устройств, в том числе широкополосных активных электрически малых антенн (ЭМА). Получены следующие основные результаты.

1. Выполнен аналитический и численный анализ дифференциальных квантовых ячеек, направленный на оптимизацию параметров ячеек и режимов их работы. Показано, что использование таких ячеек в основе сверхпроводящих квантовых решеток позволяет достичь линейности выходного напряжения в ненагруженном состоянии до 100 дБ.

2. Выполнено исследование влияния нагрузки на линейность выходного напряжения сверхпроводящей квантовой решетки как активного двухполосного элемента. Показано, что влияние достаточно высокоомной нагрузки может быть в значительной степени скомпенсировано за счет коррекции тока смещения. Для достижения линейности на уровне 90 дБ импеданс нагрузки должен на порядок превышать импеданс решетки.

3. Разработана стратегия оптимального сопряжения активной электрически малой антенны с последующими элементами приемной системы с низким входным импедансом, такими как сверхпроводниковый аналого-цифровой преобразователь, импеданс которого составляет несколько ом. Необходимые меры включают в себя уменьшение импеданса антенны за счет структуры электрического соединения квантовых ячеек в решетке, а также использование сверхпроводящего трансформатора импеданса в интерфейсе сопряжения антенны.

4. Выполнено изучение размерных эффектов в активной электрически малой антенне и их влияния на линейность выходного сигнала. Показано, что наибольшее влияние (на порядок) оказывает эффект нарушения симметрии распределения магнитного потока сигнала в квантовой ячейке, который возникает при распространении принимаемой волны вдоль цепочки джозефсоновских переходов ячейки.

5. Выполнено экспериментальное изучение прототипа активной электрически малой сверхпроводящей антенны площадью  $4,3 \text{ мм} \times 4,3 \text{ мм}$  на основе сверхпроводящих квантовых решеток, содержащей 588 дифференциальных квантовых ячеек с оптимизированной топологией, подтверждающее результаты теоретических исследований. Достигнуты значения крутизны линейного преобразования магнитного сигнала в напряжение  $8000 \text{ мкВ/мкТ}$  с размахом (удвоенная амплитуда) отклика напряжения до  $100 \text{ мВ}$ , что позволяет сделать прогнозную оценку чувствительности антенны на уровне  $3 \cdot 10^{-14} \text{ Тл/Гц}^{1/2}$ .

## Список печатных работ автора по материалам диссертации

### I. Статьи в журналах из Перечня ВАК

- [A1] **Kolotinskiy N.**, Kornev V., Sharafiev A., Soloviev I., Mukhanov O. Multi-element Josephson structures for implementing broadband devices // Physics of Wave Phenomena. — 2013. — Vol. 23, no. 4. — pp. 294–299. doi:10.3103/S1541308X13040110.
- [A2] Kornev V., **Kolotinskiy N.**, Skripka V., Sharafiev A., Soloviev I., Mukhanov O. High Linearity Voltage Response Parallel-Array Cell // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Vol. 507, no. 4. — p. 042018. doi:10.1088/1742-6596/507/4/042018.
- [A3] Kornev V., Sharafiev A., Soloviev I., **Kolotinskiy N.**, Mukhanov O. Su-

perconducting Quantum Arrays for Broadband RF Systems // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Vol. 507, no. 4. — p. 042019. doi:10.1088/1742-6596/507/4/042019.

- [A4] *Kornev V. K., Sharafiev A. V., Soloviev I. I., **Kolotinskiy N. V.**, Scripka V. A., Mukhanov O. A.* Superconducting Quantum Arrays // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2014. — Vol. 24, no. 4. — p. 1800606. doi:10.1109/TASC.2014.2318291.
- [A5] *Kornev V., **Kolotinskiy N.**, Scripka V., Sharafiev A., Mukhanov O.* Output power and loading of Superconducting Quantum Array // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2015. — Vol. 25, no. 3. — p. 1602005. doi:10.1109/TASC.2014.2373036.
- [A6] *Sharafiev A., Kornev V., **Kolotinskiy N.**, Mukhanov O.* Microwave Dynamics of Superconducting Quantum Cell // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2015. — Vol. 25, no. 3. — p. 1602306. doi:10.1109/TASC.2015.2390141.

## II. Патент

- [A7] Заявка на патент № 2015149223, 17.11.2015 г. *Соловьев И.И., Корнев В.К., Кленов Н.В., **Колотинский Н.В.**, Шарафиев А.В.* Сверхпроводящая квантовая решетка на основе СКИФ-структур.

## III. Другие публикации

- [A8] ***Kolotinskiy N.V.**, Kornev V.K., Soloviev I.I., Klenov N.V.* Synthesis issue of Josephson junction structures for microwave applications. // Материалы международной конференции «Новые материалы и нанотехнологии в электронике СВЧ». — Спб., 2010. — 18–20 ноября. — с. 50–52.
- [A9] ***Колотинский Н.В.**, Корнев В.К., Соловьев И.И., Кленов Н.В., Шарафиев А.В.* Численное моделирование устройств сверхпроводниковой электроники // Всероссийская конференция «Микроэлектроника СВЧ»: Сборник трудов, том 1. — Спб, 2012. — 4–12 июня. — сс. 217–222.
- [A10] *Kornev V., **Kolotinsky N.**, Skripka V., Mukhanov O.* High linearity voltage response differential cell // 14th International Superconductive Electronics

Conference (ISEC): Conference Program, Abstract and Papers. — Cambridge, MA, USA : IEEE Council on Superconductivity, 2013. — pp. 268–270. doi:10.1109/ISEC.2013.6604307.

- [A11] **Колотинский Н.В.**, Корнев В.К., Шарафиев А.В., Соловьев И.И. Широкополосные устройства на основе многоэлементных джозефсоновских структур // Ученые записки физического факультета МГУ. — 2013. — Т. 2, № 5. — с. 135006.
- [A12] *Kornev V., **Kolotinskiy N.**, Wang X., Liang S., Yusheng H.* Matching Issues of Active Superconductor Antenna // 15th International Superconductive Electronics Conference, ISEC 2015: Extended Abstracts. — Nagoya, Japan, 2015. — pp. HF–P12.
- [A13] *Kornev V., **Kolotinskiy N.**, Sharafiev A., Mukhanov O.* Size Effects in Active Superconductor Antennas // Superconductive Electronics Conference (ISEC), 2015 15th International. — 2015. — p. 7383481. doi:10.1109/ISEC.2015.7383481.
- [A14] *Kornev V., **Kolotinskiy N.**, Soloviev I., Sharafiev A., Mukhanov O.* Superconducting Quantum Arrays with High Spurious-Free Dynamic Range // Superconductive Electronics Conference (ISEC), 2015 15th International. — 2015. — p. 7383484. doi:10.1109/ISEC.2015.7383484.

### Список использованной литературы

- [1] *Kirichenko D., Sarwana S., Kirichenko A.* Zero Static Power Dissipation Biasing of RSFQ Circuits // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — pp. 776–779. doi:10.1109/TASC.2010.2098432.
- [2] *Mukhanov O.* Energy-Efficient Single Flux Quantum Technology // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — pp. 760–769. doi:10.1109/TASC.2010.2096792.
- [3] *Reich T., Febvre P., Ortlepp T., Uhlmann F. H., Kunert J., Stolz R., Meyer H.-G.* Experimental study of a hybrid single flux quantum digital superconducting quantum interference device magnetometer // Journal of Applied Physics. — 2008. — Vol. 104, no. 2. — p. 024509. doi:10.1063/1.2958327.

- [4] *Mukhanov O. A.* History of Superconductor Analog-to-Digital Converters / Ed. by H. Rogalla, P. Kes. — 100 Years of Superconductivity. London : CRC Press, 2011. — ISBN: 978-1-4398-4946-0.
- [5] *Gupta D., Inamdar A., Kirichenko D., Kadin A., Mukhanov O.* Superconductor analog-to-digital converters and their applications // Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International. — 2011. — pp. 1–4. doi:10.1109/MWSYM.2011.5972910.
- [6] *Inamdar A., Rylov S., Talalaevskii A. et al.* Progress in Design of Improved High Dynamic Range Analog-to-Digital Converters // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2009. — Vol. 19, no. 3. — pp. 670–675. doi:10.1109/TASC.2009.2017767.
- [7] *Vernik I., Kirichenko D., Filippov T. et al.* Superconducting High-Resolution Low-Pass Analog-to-Digital Converters // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2007. — Vol. 17, no. 2. — pp. 442–445. doi:10.1109/TASC.2007.898613.
- [8] *Fujimaki A., Katayama M., Hayakawa H., Ogawa A.* Advanced base-station based on superconductive devices and software-defined radio technology // Superconductor Science and Technology. — 1999. — Vol. 12, no. 11. — p. 708. doi:10.1088/0953-2048/12/11/305.
- [9] *Gupta D., Kirichenko D. E., Dotsenko V. V. et al.* Modular, Multi-Function Digital-RF Receiver Systems // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — pp. 883–890. doi:10.1109/TASC.2010.2095399.
- [10] *Kirichenko D. E., Filippov T. V., Gupta D.* Microwave Receivers with Direct Digitization // Microwave Symposium Digest. — 2009. — p. 1449 – 1452. doi:10.1109/MWSYM.2009.5165980.
- [11] *Mitola III J.* Software Radio Architecture Evolution : Foundations, Technology Tradeoffs, and Architecture Implications // IEICE Transactions on Communications (Special Issue on Software Defined Radio and Its Technologies). — 2000. — Vol. 83, no. 6. — pp. 1165–1173.
- [12] *Mukhanov O., Kirichenko D., Vernik I. et al.* Superconductor Digital-RF Re-

- ceiver Systems // IEICE Transactions on Electronics. — 2008. — Vol. E91-C, no. 3. — pp. 306–317. doi:10.1093/ietele/e91-c.3.306.
- [13] *Vernik I., Kirichenko D., Dotsenko V., Webber R., Miller R., Shevchenko P., Gupta D.* Progress in the Development of Cryocooled Digital Channelizing RF Receivers // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2009. — Vol. 19, no. 3. — pp. 1016–1021. doi:10.1109/TASC.2009.2018424.
- [14] *Wikborg E., Semenov V., Likharev K.* RSFQ front-end for a software radio receiver // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 1999. — Vol. 9, no. 2. — pp. 3615–3618. doi:10.1109/77.783811.
- [15] *Dillinger M., Madani K., Alonistioti N.* Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions. Wiley Series in Software Radio. — Wiley, 2003. — ISBN: 9-780-470-85164-7.
- [16] *Fourie C., Volkmann M.* Status of Superconductor Electronic Circuit Design Software // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2013. — Vol. 23, no. 3. — pp. 1300205–1300205. doi:10.1109/TASC.2012.2228732.
- [17] *Mukhanov O., Prokopenko G., Romanofsky R.* Quantum Sensitivity: Superconducting Quantum Interference Filter-Based Microwave Receivers // Microwave Magazine, IEEE. — 2014. — Vol. 15, no. 6. — pp. 57–65. doi:10.1109/MMM.2014.2332421.
- [18] *de Andrade M., de Escobar A., Taylor B. et al.* Detection of Far-Field Radio-Frequency Signals by Niobium Superconducting Quantum Interference Device Arrays // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2015. — Vol. 25, no. 5. — p. 1603005. doi:10.1109/TASC.2015.2470677.