

Гундарева Ирина Игоревна

**Терагерцовая спектроскопия на основе джозефсоновских переходов из  
высокотемпературных сверхпроводников для исследования  
электромагнитных структур**

Специальность: 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН) и в Исследовательском центре г. Юлиха (Германия), в рамках соглашения о научном сотрудничестве.

**Научный руководитель:** **Губанков Владимир Николаевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Тарасов Михаил Александрович**  
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории сверхпроводниковых устройств для приема и обработки информации ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

**Лукичев Владимир Федорович**  
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, зам. директора ФБГУН Физико-технологический институт РАН

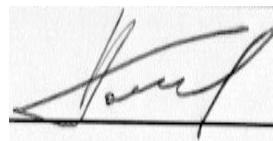
**Ведущая организация:** Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, (Москва)

Защита состоится 6 декабря 2013 г., в 10-00, на заседании диссертационного совета Д002.231.02 при ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



А.А.Потапов

**Актуальность работы.** Повышенный интерес к разработке и использованию электронных приборов и методов спектроскопии терагерцового диапазона частот наблюдается не только в радиофизике и физике твердого тела, но и в биологии, медицине, системах связи и безопасности. Этот диапазон, охватывающий область частот от 0.1 до 10 ТГц, является промежуточным между микроволновым и инфракрасным диапазонами и требует привлечения новых методов для разработки соответствующих устройств. В частности, нерешённой проблемой является характеристика активных и пассивных электронных компонент, таких как транзисторы, резонаторы, антенны и волноводные структуры при частотах свыше 100 ГГц. В настоящее время используется ряд методик для измерения комплексного частотно-зависимого импеданса в субмиллиметровом диапазоне длин волн, основанных на Фурье-спектроскопии прошедшего или отраженного излучения, применяемых для исследования спектров поглощения веществ, и на более универсальной технике спектроскопии с разрешением по времени, позволяющей исследовать, в частности, спектральные характеристики антенн и полупроводниковых приборов. Эти методики требуют использования внешних источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот или ультракоротких импульсов излучения оптического диапазона.

Среди современных новых подходов большой интерес представляет использование нестационарного эффекта Джозефсона в переходах из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Разработка детекторов и спектроанализаторов субтерагерцового и терагерцового диапазонов частот на основе джозефсоновских переходов (ДП) позволяет создать устройства, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с теми, в основе работы которых заложены другие принципы. Важными преимуществами устройств, функционирующих на основе ДП, являются возможность быстрой перестройки частоты в широком диапазоне, а также возможность исследования электромагнитных характеристик изучаемого объекта “на кристалле”, когда все сигналы терагерцовых частот сосредоточены в малом объеме вблизи джозефсоновского перехода и исследуемого объекта, расположенных в непосредственной близости друг от друга, а на внешних контактных площадках присутствуют только низкочастотные сигналы.

Характеристики ДП очень чувствительны к электромагнитному окружению. Помещение ДП в среду с дисперсией или подключение к схемным элементам с частотно-зависимыми характеристиками модифицирует форму джозефсоновских колебаний и приводит к изменению вольт-амперной характеристики (ВАХ) перехода. В рамках простой резистивной модели джозефсоновского перехода было теоретически показано, что изменения ВАХ пропорциональны действительной части адмиттанса  $\text{Re}Y(f_j)$  внешней

системы как функции джозефсоновской частоты  $f_j$ . Таким образом, на ВАХ ДП могут наблюдаться особенности, связанные с резонансами в структурах, соединённых с переходом, резонансными модами в подложке или с фоновными модами в подложке и берегах перехода. Это обстоятельство можно использовать для спектроскопии электромагнитного окружения перехода с высокой чувствительностью по коэффициенту поглощения излучения. Для осуществления джозефсоновской спектроскопии резонансных структур, присоединённых к переходу, кроме разработки самой методики необходимо также создать низкоомные высококачественные ДП с заданными свойствами и научиться обратимым образом изменять параметры уже изготовленных ДП. Решению этих задач с целью успешного применения джозефсоновской спектроскопии электромагнитных структур в терагерцовом диапазоне частот посвящена данная работа.

**Целью** настоящей работы явилась реализация метода джозефсоновской спектроскопии электромагнитных структур в терагерцовой области частот.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- Разработка методов приготовления бикристаллических джозефсоновских переходов из ВТСП и их оптимизация для терагерцовой спектроскопии.
- Экспериментальное исследование условий использования ВТСП переходов в спектроскопии электромагнитного окружения переходов.

На защиту выносятся оригинальные результаты, составляющие научную новизну и практическую ценность данной работы.

#### **Научная новизна работы и представленных в ней результатов:**

1. Впервые было выяснено, что электрические параметры джозефсоновского перехода могут изменяться обратимым образом при низкотемпературном отжиге в атмосфере озono-кислородной смеси и в вакууме. Обратимое изменение происходит в диапазоне температур 20°С - 140°С. Отжиг при больших температурах приводит к необратимым изменениям электрических характеристик джозефсоновского перехода.
2. Была разработана методика восстановления спектральных характеристик резонансных электромагнитных структур от частоты. Впервые была восстановлена зависимость действительной части адмиттанса широкополосной синусоидальной планарной антенны от частоты и получены параметры эквивалентной схемы антенны по изменению зависимости дифференциального сопротивления ДП от напряжения на переходе в диапазоне частот 0.06 до 1.2 ТГц.
3. Впервые показано, что при низкотемпературном отжиге в смеси озона и кислорода электромагнитные потери в пленке из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  уменьшаются. Это дает возможность

получить выраженные особенности на зависимости  $R_d(V)$  ДП, связанные с электромагнитными резонансами, в частности, с фоннными модами. При отжиге ДП с наклонными осями в смеси озона и кислорода удалось разрешить близкие фоннные моды при напряжениях 9.40 мВ и 9.56 мВ, соответствующих частотам колебаний  $152 \text{ см}^{-1}$ , и  $154 \text{ см}^{-1}$ .

**Практическая ценность:**

1. Разработана методика оптимизации процесса подготовки подложек из (110)  $\text{NGaO}_3$ , благодаря которой были получены атомарно-гладкие поверхности. Процесс оптимизации параметров напыления позволил получить хороший эпитаксиальный рост пленок из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  на подложках из  $\text{NGaO}_3$  и высокие плотности критического тока пленок до  $1.4 \cdot 10^7 \text{ А/см}^2$ . Выполненная оптимизация дала возможность повысить предельные токи, при которых можно наблюдать джозефсоновское поведение в бикристаллических ДП с взаимонаклоненными осями, изготавливать переходы с необходимыми параметрами для исследований с помощью джозефсоновской спектроскопии, а также для исследований в области сильноточных применений сверхпроводников.
2. Обнаружено, что форма вольтамперных характеристик пленок из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  при токах выше критического  $I_c$  хорошо описывается формулой  $V=V_0(I/I_c-1)^n$  с величинами показателей степени  $n$  в диапазоне от 1.4 до 4.1 в зависимости от наклона оси  $c$  пленки и температуры отжига подложек в атмосфере кислорода, что позволяет получать пленки с заданными параметрами.
3. Процесс оптимизации параметров напыления и обработки поверхности позволил получить высококачественные джозефсоновские переходы с взаимонаклоненными осями  $c$  с высокими значениями характеристического напряжения  $V_c=I_c R_n=1 \text{ мВ}$ , где  $I_c$  – критический ток ДП, а  $R_n$  – сопротивление в нормальном состоянии. Вольтамперные характеристики полученных переходов описываются в рамках резистивной модели в диапазоне тока смещения от  $I_c$  до  $5I_c$ , что позволяет успешно применять их в целях терагерцовой спектроскопии и детектирования.
4. Было продемонстрировано закономерное изменение параметров джозефсоновских бикристаллических переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  -  $I_c$  и  $R_n$  (в 1.75 раза),  $V_c$  (в 1.3 раза) при отжиге переходов в смеси озона и кислорода, в вакууме и релаксации на воздухе при комнатной температуре, что позволяет осуществлять тонкую подстройку параметров ДП для оптимизации их характеристик при использовании в качестве детекторов и для спектрального анализа.
5. Разработанный метод измерения спектральных характеристик электромагнитных структур позволяет, в частности, восстанавливать параметры эквивалентных схем

пассивных элементов терагерцовой электроники в полосе частот до 1.2 ТГц, в которой другие методики испытывают значительные трудности.

**Достоверность** полученных результатов подтверждена исследованиями на большом количестве  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок и бикристаллических переходов, большим объемом измерений основных характеристик, использованием различных методов контроля параметров пленок и переходов, а также результатами теоретических расчетов и компьютерного моделирования; признанием полученных результатов научной общественностью при обсуждениях на научных семинарах, конференциях, а также положительными рецензиями статей при публикациях результатов в научных журналах.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Достижение высоких плотностей критических токов  $j_c(78\text{K})$  до  $1.4 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$  у эпитаксиальных  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок, полученных методом распыления на подложках из  $\text{NdGaO}_3$  при оптимизации химической и термической обработки подложек.
2. Изготовление высококачественных  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  бикристаллических джозефсоновских переходов с взаимонаклоненными осями  $c$  с высокими  $V_c(78\text{K})$  до 1 мВ и вольт-амперными характеристиками, которые описываются в рамках резистивной модели в диапазоне токов смещения от  $I_c$  до  $5I_c$ .
3. Методика обратимого изменения электрических параметров бикристаллических джозефсоновских переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ,  $I_c$  и  $R_n$ , при помощи низкотемпературного (до  $140^\circ\text{C}$ ) отжига в озоне и вакууме.
4. Экспериментальный макет для варианта джозефсоновской спектроскопии, в котором исходными данными являются зависимости дифференциального сопротивления перехода от напряжения.
5. Применение метода джозефсоновской спектроскопии для восстановления спектральных зависимостей входного адмиттанса логопериодических антенн из ВТСП, как с идеальной периодичностью, так и с нарушенной симметрией, в диапазоне 65 - 1200 ГГц и восстановления полной эквивалентной схемы логопериодической антенны из ВТСП.
6. Применение метода джозефсоновской спектроскопии для исследования эволюции электромагнитных потерь в материале ВТСП при низкотемпературном отжиге в озоне.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались на следующих международных конференциях и конкурсах:

- The 12th International Superconductive Electronics Conference ISEC2009, Fukuoka, Japan (приглашенный постер);
- The 34 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave 2009, Busan, Korea;

- The 9th European Conference on Applied Superconductivity 2009, Dresden, Germany;
- Euroflux 2009 From devices to circuits and systems, Avignon, France;
- Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems, Sankt-Peterburg, Russia (первое место в рамках конкурса “Лучшая стендовая презентация”) 2009г., 2010г.
- Applied Superconductivity Conference 2010, Washington, D.C., USA;
- The 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2010, Rome, Italy;
- Superconductivity Centennial Conference 2011, The Hague, The Netherlands;
- Nature Conference: Frontiers in Electronic Materials 2012, Aachen, Germany;
- работы заняли 1 и 2 места в Конкурсах молодых ученых ИРЭ РАН 2008г. и 2009г.;
- работа выиграла конкурс «Инновационные проекты молодых изобретателей и рационализаторов Московской области» (2010).

**Личный вклад автора.** В диссертации изложены экспериментальные результаты полученные автором лично, либо при его непосредственном участии. Автором была проведена оптимизация процесса подготовки подложек из  $\text{NGaO}_3$ , оптимизированы параметры напыления эпитаксиальных пленок и ДП из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Часть ДП, на которых были проведены исследования, была изготовлена лично автором. Автором была разработана методика обратимого изменения параметров изготовленных бикристаллических джозефсоновских переходов путём низкотемпературного отжига в атмосфере озон-кислородной смеси, а также экспериментальная методика джозефсоновской спектроскопии для измерения параметров электромагнитных структур в терагерцовой области частот. Автор принимала участие в разработке методик измерений, изготавливала образцы джозефсоновских переходов для исследования, разрабатывала и изготавливала измерительные устройства, необходимые для проведения исследований, проводила исследования, обрабатывала и анализировала экспериментальные данные, проводила численные расчеты. При участии автора были написаны научные статьи и доклады, осуществлялась их подготовка к публикации. Пять докладов, включая один приглашенный, на зарубежных конференциях по материалам диссертации были сделаны лично автором.

**Полнота изложения.** Материалы диссертации достаточно полно изложены в работах, опубликованных соискателем.

**Ценность научных работ соискателя.** Работы опубликованы в ведущих научных журналах с высоким импакт-фактором.

**Специальность.** Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.03 – Радиофизика (физико-математические науки).

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 21 научная статья, из них 10 статей опубликованы в журналах, включенных в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 6 статей в российских [1, 2, 4, 9-10] и 4 статьи [3, 5-7] в зарубежных журналах, а также 11 статей в сборниках трудов российских и зарубежных конференций [11-21]. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 21 печатной работе, список которых приведен в конце автореферата.

**Содержание и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 137 страниц, работа содержит 55 рисунков, 2 таблицы и список цитированной литературы из 99 источников.

**Глава 1** посвящена обзору литературы, относящемуся к теме работы.

*В разделе 1.1* описано состояние электроники терагерцовых частот на данный момент времени: существует возможность создавать электронные устройства субмикронных размеров, работающие при частотах до 1 ТГц.

*В разделе 1.2* описаны методы измерения характеристик электронных устройств в терагерцовой области частот. Наиболее распространенной практикой является использование анализаторов цепей, которые созданы в США (фирмы Agilent, OML), Германии (Rohde & Schwartz), Японии (Anritsu EMEA) и Франции (AB Millimetre). Однако большинство промышленно выпускаемых анализаторов цепей в базовой конфигурации работают в частотном диапазоне не более 125 ГГц. Работа на более высоких частотах сопряжена с рядом трудностей и недостатков, в связи с чем необходим поиск новых принципов локального спектрального анализа активных и пассивных электромагнитных структур.

*В разделе 1.3* дано описание нестационарного эффекта Джозефсона, и представлены основные уравнения и соответствующая теоретическая резистивная модель [1].

*В разделе 1.4* описаны перспективы развития джозефсоновской спектроскопии электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот с открытием высокотемпературной сверхпроводимости.

*В разделе 1.5* прояснены возможности спектрального анализа веществ и электромагнитных структур с использованием нестационарного эффекта Джозефсона.

*Раздел 1.6* проясняет, какие типы существующих бикристаллических джозефсоновских переходов являются наиболее перспективными для использования в целях детектирования и спектроскопии.



В разделе 1.7 представлен метод изменения параметров ДП при отжиге в атмосфере озон-кислородной смеси.

В разделе 1.8 сформулированы актуальные задачи, которые необходимо решить для реализации метода джозефсоновской спектроскопии в терагерцовой области частот для анализа характеристик электромагнитных структур:

- получение эпитаксиальных плёнок из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и бикристаллических джозефсоновских переходов на их основе для применения в джозефсоновской спектроскопии;
- исследование возможности обратимого изменения параметров уже изготовленных образцов;
- теоретический анализ влияния электромагнитного окружения на статические характеристики ДП, и выбор методов экстракции частотных характеристик исследуемых объектов из данных измерений;
- создание экспериментальной установки для измерения статических характеристик ДП, модифицированных под влиянием исследуемых электромагнитных структур;
- проведения измерений спектральных характеристик тестовых объектов, и демонстрация возможностей новой методики.

В Главе 2 показано влияние различных способов обработки при подготовке подложек из  $\text{NdGaO}_3$  и выбора параметров напыления пленок из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  на морфологические и электрические характеристики эпитаксиальных пленок и бикристаллических переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .

В разделе 2.1 указано, какими свойствами должны обладать высококачественные джозефсоновские переходы из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  для успешного применения в целях терагерцовой спектроскопии.

Раздел 2.2 кратко описывает методы, которые использовались для изготовления  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок и бикристаллических переходов, а также технологические параметры изготовления. Приготовление эпитаксиальных пленок производилась распылением стехиометрической мишени из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  при температурах нагревателя подложки 910-990°C в атмосфере кислорода высокого давления (от 2.5 до 4 мбар) на подложки из  $\text{NdGaO}_3$  [2]. Конфигурация образцов в виде мостиков приготавливалась из полученных пленок с помощью УФ литографии. Электрические контакты к образцам наносились с помощью распыления металлов серебра или платины через маски или методом обратной литографии.

Раздел 2.3 описывает структурные и электрические характеристики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок в зависимости от степени предварительной обработки подложек и параметров напыления. В работе были использованы подложки из  $\text{NdGaO}_3$  с ориентациями (110), (230) и

(320). Сначала проводилась предварительная очистка поверхности подложки в ацетоне и этаноле в ультразвуковой ванне, а затем более тонкая тепловая и химическая [3] обработка. На подготовленные таким образом подложки наносились  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленки с вертикальной осью  $c$ , и проводилась оптимизация процесса эпитаксиального роста. Критерием для хорошей пленки является выраженный островковый рост  $c$ -ориентированных зерен и минимальное содержание  $a$ -ориентированных зерен. Лучший результат был получен при температуре нагревателя  $T = 950^\circ$  и давлении кислорода  $P = 3.4$  мбар.

Дальнейшее улучшение качества  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок было достигнуто посредством оптимизации времени травления подложек в ВНФ. В [A9] показано, что наилучшие пленки были изготовлены на подложках, время обработки которых в ВНФ не превышает 2 минут, что подтверждает выводы работы [3]. Такие пленки демонстрируют доминирующий островковый рост  $c$ -ориентированных зерен, а также являются однородными и обладают высокой температурой  $T_c=92K$  перехода из нормального состояния в сверхпроводящее. Для  $c$ -ориентированных пленок критические плотности тока  $j_c(78K)$  составили  $(4.2\div 6.3)\cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

Форма зависимости напряжения  $V$  от критической плотности тока  $j_c$  для  $c$ -ориентированных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок при токах выше  $I_c$  хорошо описывается формулой:

$$V = V_0 \text{sign}(j) \left( \frac{|j|}{j_c} - 1 \right)^n \quad |j| > j_c,$$

$$V=0 \quad |j| \leq j_c, \quad (1)$$

при этом величина индекса  $n$  зависит от предварительной обработки подложки. Для  $c$ -ориентированных пленок, напыленных на необработанную в ВНФ подложку,  $n=3.2$ , а для пленок, напыленных на обработанную в ВНФ в течение 2 минут поверхность,  $n=4.1$  (Рис. 1, кривые 1 и 2).

Использование подложек с малыми ( $1-2^\circ$ ) наклонами поверхности относительно кристаллографической плоскости (110) подложки привело к изменению морфологии  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок, свидетельствующему о переходе от островкового роста к послойному. Также проводилась оптимизация процесса распыления для пленок со значительным наклоном оси  $c$  ( $11.3^\circ$ ) в зависимости от продолжительности предварительного отжига  $NdGaO_3$  подложек при температуре  $950^\circ C$ .

Изменения в морфологии пленок, вызванные химической и тепловой обработкой поверхности подложек из  $NdGaO_3$ , отразились и в их электрических характеристиках, в частности, в зависимости их сопротивления от температуры  $R(T)$  при переходе пленок из нормального состояния в сверхпроводящее. Пленки, полученные на отожженных в течение

получаса подложках, являются однородными и обладают высокой критической температурой перехода  $T_c=92\text{K}$ . В то время как при длительном высокотемпературном отжиге подложек из (320)  $\text{NdGaO}_3$  (более получаса) на характеристике  $R(T)$  появляется перегиб,  $T_c$  уменьшается и ширина области перехода увеличивается до двух раз.

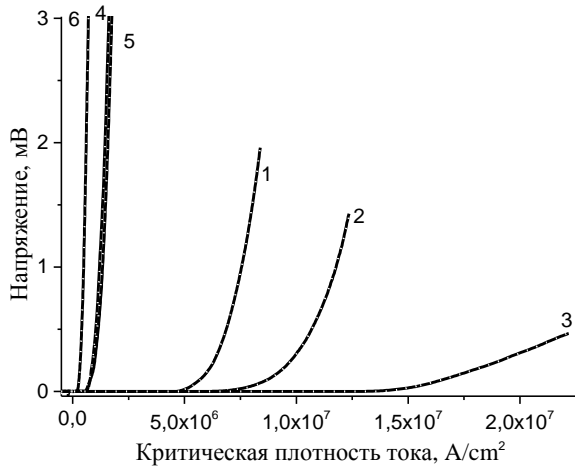


Рис. 1. Зависимости  $V(j_c)$  для мостиков из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок на подложках из (110)  $\text{NdGaO}_3$ : без обработки (1) и после 2 мин в ВНФ (2); пленок на подложках с осью  $c$ , наклоненной на  $1.7^\circ$  (3); а также пленок на подложках из (320)  $\text{NdGaO}_3$ : без отжига в кислороде (4), после отжига в течение 20 минут (6) и 4 часов (5). Сплошные линии – экспериментальные данные, светлые точки – подгонка по (1).

Из напыленных пленок были изготовлены мостики шириной 2-17 мкм и измерены электрические характеристики. Значительное увеличение критической плотности тока наблюдалось у  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок с наклоненными на  $1,7^\circ$  осями  $c$  при измерениях в направлении, перпендикулярном плоскости наклона:  $j_c(78\text{K}) = (1,1 \div 1,4) \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$ .

Для пленок с наклоненной на  $11^\circ$  осью  $c$ , которые были выращены на подложках (320)  $\text{NdGaO}_3$ , отожженных в кислороде при высокой температуре, были обнаружены интересные размерные эффекты в электрических характеристиках: при непродолжительном отжиге (менее 0,5 часа), плотности критических токов увеличивались от  $2,5 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$  (ширина мостика  $w=4 \text{ мкм}$ ) до  $1,2 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$  ( $w=17 \text{ мкм}$ ). Наблюдаемый размерный эффект для пленок указывает на наличие в них внутренней структуры тока, которая может быть обусловлена системой образованных зерен в пленке и барьерами для протекания тока между ними.

В [A9] показано, что форма ВАХ пленок при токах выше критического  $I_c$  хорошо описывается формулой (1) с величинами индексов  $n$  в диапазоне от 1.4 до 2.9 в зависимости от наклона оси  $c$  пленки и температуры отжига подложек в атмосфере кислорода (Рис. 1, кривые 3-6).

Согласно существующим теоретическим моделям, резистивное состояние (при токах  $I > I_c$ ) в ВТСП материалах обусловлено движением вихрей. При повышении тока  $I$  происходит частичное освобождение вихрей из центров пиннинга в резистивном состоянии, и все больше вихрей вовлекается в движение, что и приводит к нелинейной ВАХ.

Полученные ВАХ (Рис. 1 кривые 3-6) согласуются по функциональному виду с характеристиками, приведенными в работе [4] и выведенными исходя из общих представлений о скейлинге в области непрерывного фазового перехода.

В разделе 2.4 представлены электрические характеристики бикристаллических переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  с вертикальными и взаимонаклоненными осями  $c$ , полученные в ходе оптимизации. В процессе оптимизации были созданы качественные бикристаллические переходы с вертикальными осями  $c$ , для которых отклонение ВАХ от резистивной модели составило менее 1 процента. Также в результате оптимизации процесса приготовления пленок автором были получены джозефсоновские бикристаллические переходы из пленок с взаимонаклоненными осями  $c$ . ВАХ таких переходов описываются в рамках резистивной модели при токах смещения от  $I_c$  до  $5I_c$  и характеризуются высокими значениями характерного напряжения  $V_c(78\text{K}) = 1 \text{ mV}$  (Рис. 2), благодаря чему их можно успешно применять для детектирования и спектроскопии в терагерцовом диапазоне частот.

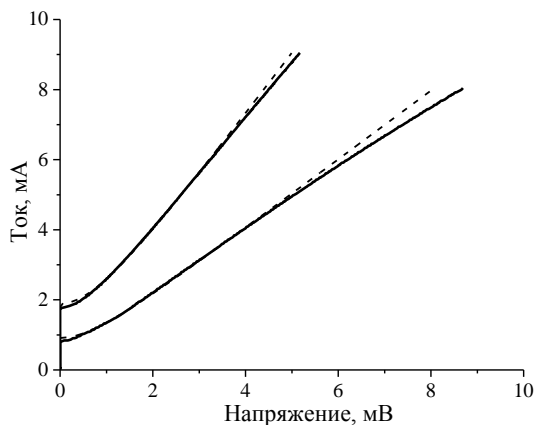


Рис. 2. ВАХ двух ДП из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок с взаимонаклоненными осями  $c$  на  $11.3^\circ$ , приготовленных при  $T = 970^\circ\text{C}$ ,  $P = 3.4$  мбар. Сплошная линия - эксперимент, штриховая - данные подгонки по резистивной модели.

В разделе 2.5 представлены выводы по соответствующей главе.

**В Главе 3** исследовано влияние низкотемпературного отжига в озоне и кислороде на электрические характеристики бикристаллических джозефсоновских переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .

В разделе 3.1 дано введение к соответствующей главе.

В разделе 3.2 описана методика низкотемпературного отжига бикристаллических джозефсоновских переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в атмосфере смеси озона и кислорода [5].

В разделе 3.3 исследовано влияние процедуры отжига на вольтамперные характеристики бикристаллических переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Процедура отжига позволяет улучшить рабочие характеристики перехода, транспортные свойства которого стали выражены слабее из-за кислородного обеднения, приближая их к «идеальным».

Важным параметром ДП, определяющим его высокочастотные характеристики, является  $V_c$ . При отжиге бикристаллических переходов из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в смеси озона и кислорода было выделено 3 характерных временных интервала [А6]: при отжиге до 30 минут значение  $V_c$  не претерпевает изменений, в то время как сопротивление в нормальном состоянии  $R_n$  уменьшается в 1.75 раза; при отжиге от 40 минут до 190 минут значения величин  $V_c$  и  $R_n$  уменьшаются на 30 %; при дальнейшем отжиге вплоть до 610 минут значения величин в пределах погрешности не изменяются (Рис. 3). Последующая релаксация образцов на воздухе при комнатной температуре в течение  $10^5$  минут не оказала существенного влияния на величину  $V_c$ , но привела к увеличению сопротивления в нормальном состоянии  $R_n$  на 30%.

В разделе 3.4. исследовано влияние процесса отжига в озон-кислородной смеси и в вакууме на свойства  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  бикристаллических джозефсоновских переходов. В работе [А7] автором было показано, что при отжиге ДП в вакууме или в смеси озона и кислорода при температурах  $100^\circ\text{C}$  -  $145^\circ\text{C}$  возможно обратимое изменение параметров перехода (Рис. 4) за счет последовательных процессов насыщения или обеднения кислородом бикристаллического шва и примыкающих берегов перехода. Высокотемпературный отжиг ( $T > 145^\circ\text{C}$ ) приводит к необратимым изменениям не только электрических характеристик перехода (Рис. 4.), но также к возникновению течения потока и неоднородности сверхпроводящей плёнки, выражающейся в существенном увеличении ширины перехода из нормального в сверхпроводящее состояние на зависимости  $R(T)$ . Таким образом, посредством изменения времени отжига от нескольких минут до нескольких часов и температуры отжига от  $20^\circ\text{C}$  до  $145^\circ\text{C}$  при загрузке или разгрузке переходов кислородом можно осуществлять управление рабочими параметрами  $I_c$ ,  $R_n$ ,  $V_c$  джозефсоновских бикристаллических переходов в целях джозефсоновской адмиттансной спектроскопии.

В разделе 3.5. сделан анализ полученных результатов исходя из представлений о диффузии кислорода в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и зависимости транспортных свойств границы зёрен от концентрации кислорода. Соответствующие изменения электрических параметров бикристаллических джозефсоновских переходов произошли вследствие насыщения и пересыщения [6] кислородом области бикристаллического шва и сверхпроводящих берегов перехода. При кратковременном отжиге кислород проникает в границу зёрен, но не затрагивает сверхпроводящие берега, что приводит к увеличению  $I_c$  и уменьшению  $R_n$ , но не изменяет  $V_c$  перехода. При дальнейшем отжиге, согласно модели движущейся границы [7], пересыщенные кислородом области движутся к сверхпроводящим берегам с постоянной скоростью, понижая параметр порядка вблизи бикристаллической границы, что и определяет величину  $V_c$ . Скорость движения границы была оценена как  $v = 5 \cdot 10^{-2}$  нм/мин.

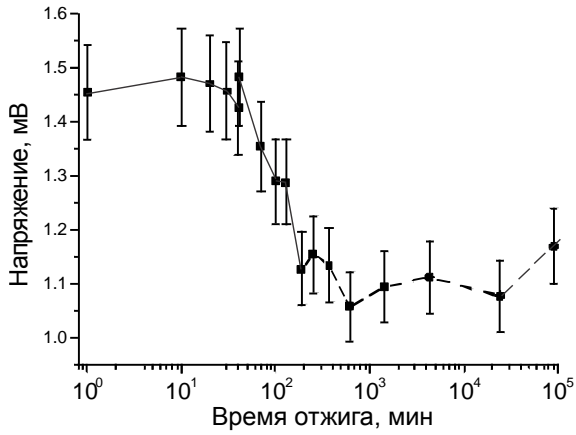


Рис. 3. Зависимость характеристического напряжения  $I_c R_n$  ДП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на подложке из (120)  $NdGaO_3$  от времени отжига в озон-кислородной смеси при  $T=100^\circ C$  (сплошная линия) и на воздухе при комнатной температуре (штриховая линия).

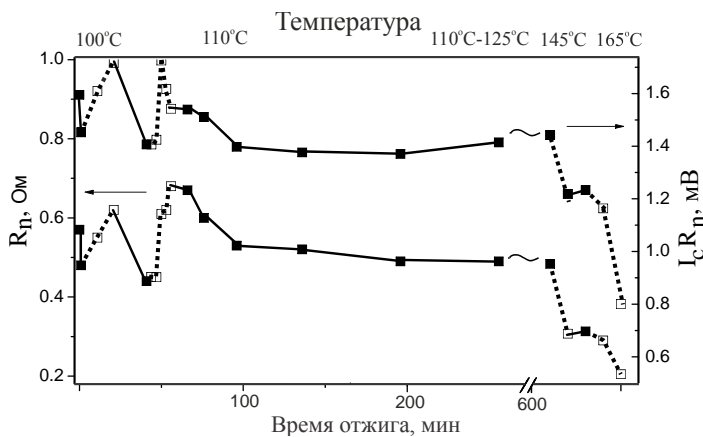


Рис. 4. Сопротивление в нормальном состоянии и характеристическое напряжение ДП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в зависимости от времени отжига в вакууме (точки) или смеси кислорода и озона (сплошная линия).

В разделе 3.6. представлены выводы по соответствующей главе.

В Главе 4 продемонстрирована возможность исследования спектральных характеристик различных резонансных структур методом джозефсоновской спектроскопии.

В Разделе 4.1 приведён теоретический анализ изменения статических характеристик ДП под влиянием электромагнитного окружения [8]. Показано, что на практике для джозефсоновского частотного анализа удобно использовать зависимость  $R_d(V)$ , полученную из данных измерений ВАХ и  $R_d(I)$ .

В разделе 4.2 представлены исследуемые структуры: джозефсоновские переходы и широкополосные антенны с различной геометрией. Метод джозефсоновской спектроскопии был реализован на ДП с вертикальными и взаимонаклоненными осями  $c$ . В качестве тестовой резонансной структуры была выбрана широкополосная, планарная, логопериодическая антенна, так как, во-первых, она охватывает нужный диапазон частот от 50 ГГц до единиц ТГц, а, во-вторых, все ее характеристики имеют периодическую зависимость от логарифма частоты, что связано с геометрией антенны (Рис. 5а).

В разделе 4.3. приведены схемы электронных устройств и описаны экспериментальные установки, использовавшиеся для спектрального анализа электромагнитных структур.

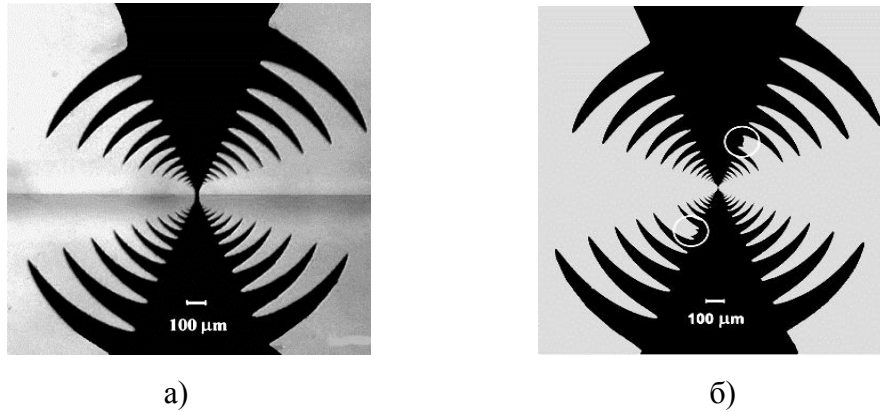


Рис. 5. Логопериодические антенны с регулярной структурой (а) и с модифицированной структурой, где дефекты обведены окружностью (б).

В разделе 4.4 показано, что влияние антенны на ДП, к которому она присоединена, проявляется в наличии периодических (в зависимости от логарифма напряжения) особенностей на ВАХ. Частотный диапазон, в котором проявляются особенности, можно регулировать либо варьируя температуру измерений, либо при помощи магнитного поля.

В разделе 4.5. представлена эквивалентная схема ДП с интегрированной логопериодической антенной. Теоретический расчет параметров системы показал, что для обеспечения хорошего совпадения рассчитанной характеристики с измеренной рассматриваемая электромагнитная система должна быть представлена в виде совокупности трёх частей, соответствующих компонентам эквивалентной схемы на Рис. 6а [А10]:

- ДП, описываемому простой резистивной моделью (1);
- антенне, представленной в виде набора из 12 последовательных колебательных контуров по числу наблюдаемых на зависимости  $R_d(V)$  логопериодических по частоте особенностей (2);
- остальной части электромагнитного окружения ДП с медленно меняющимся с частотой импедансом (3).

Параметры эквивалентной схемы вычислялись путём подгонки зависимости  $R_d(V)$  ДП, полученной с использованием эквивалентной схемы (сплошная линия на Рис. 6б) к данным измерений (пунктирная линия на Рис. 6б). Вычисления производились с помощью компьютерной программы, представленной в [9]. Таким образом, была получена эквивалентная схема антенны в диапазоне частот до 1070 ГГц.

В разделе 4.6. была исследована возможность расширения частотной полосы спектрального анализа путём её перестройки магнитным полем в процессе измерения. В качестве тестовой системы использовалась логопериодическая антенна. В частности, было проведено восстановление частотной зависимости действительной части адмиттанса антенны от частоты [А2-А4], т.к. такая зависимость допускает простую физическую

интерпретацию [8]. Для спектрального анализа логопериодической антенны, интегрированной с ДП из ВТСП были измерены ВАХ и зависимости  $R_d(V)$  при температуре 5 К. Чтобы расширить область спектрального анализа, использовалось изменение  $I_c$  ДП внешним магнитным полем [A8]. Таким способом удалось уменьшить низкочастотный предел спектрального анализа, определяемый тепловыми флуктуациями, до 64 ГГц. Была проанализирована эквивалентная схема интегрального устройства, состоящего из ДП и логопериодической антенны. Для анализа использовалась резистивная модель ДП с учетом тепловых флуктуаций и представление антенны в виде параллельных резонансных цепей с логарифмически масштабными резонансными частотами и с произвольной связью с ДП.

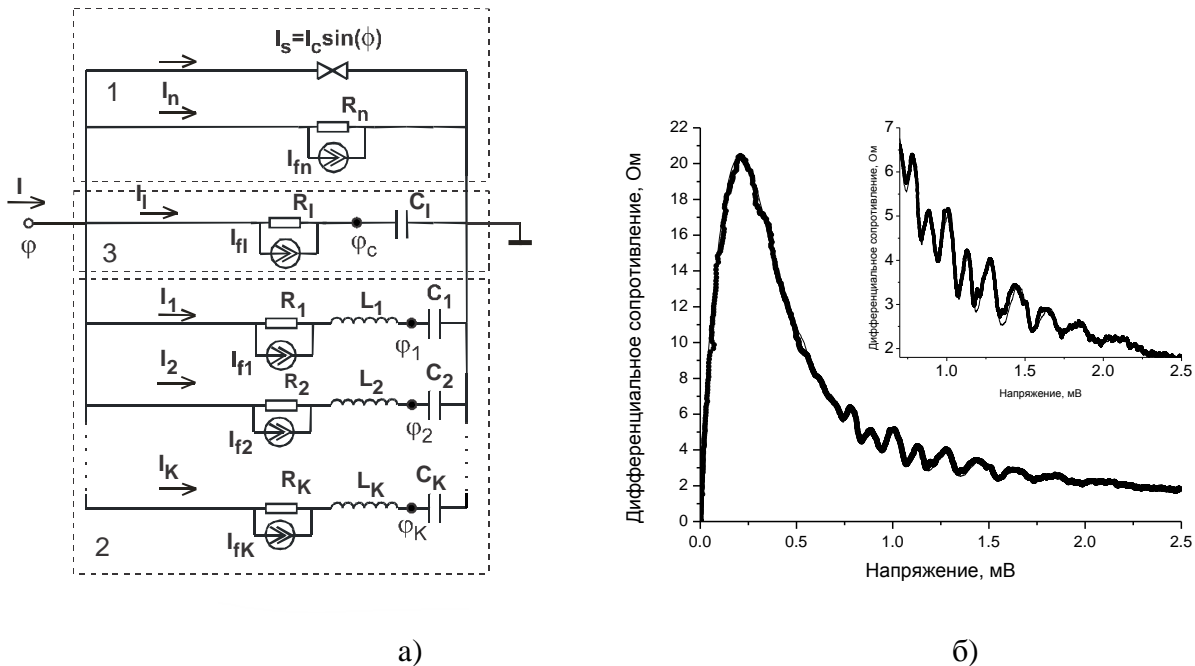


Рис. 6. Эквивалентная схема (а) и зависимость дифференциального сопротивления от напряжения  $R_d(V)$  (б) для ДП с интегрированной логопериодической антенной.

После измерений электрических характеристик  $I_c$ ,  $R_d(I)$  джозефсоновского перехода с присоединенной к нему антенной было проведено восстановление параметров эквивалентной схемы, по которым был вычислен общий импеданс системы. В результате, используя серию измеренных зависимостей  $R_d(V)$  при разных величинах критического тока, оказалось возможным определить спектральные характеристики антенны в широком частотном диапазоне: от 64 ГГц до 1130 ГГц (Рис. 7).

На Рис. 7 (кривая 2) представлены результаты численного моделирования частотной зависимости действительной части адмиттанса той же антенны, полученные с использованием Agilent Momentum. Таким образом, получено хорошее соответствие результатов экспериментальных данных и численного моделирования.



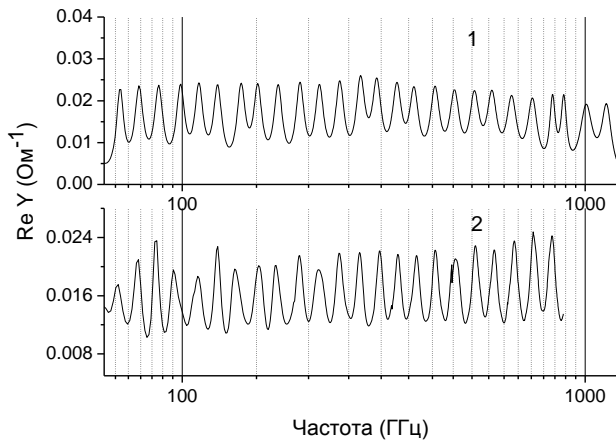


Рис. 7. Зависимость действительной части адмиттанса логопериодической антенны  $\text{Re}Y(f)$  от частоты  $f$ , полученная методом джозефсоновской спектроскопии из экспериментальных данных (1); методом компьютерного моделирования (2).

В разделе 4.7. проведено восстановление адмиттанса для резонансных структур с нарушенной геометрией. Было проанализировано три типа резонансных систем: две антенны с логопериодическими симметричными структурами типа изображённой на Рис. 5а, содержащие по 25 и 19 элементов с каждой из сторон, а также одна антенна с нерегулярной структурой (Рис. 5б), полученная из антенны с 25 элементами удалением 19-го элемента симметрично с каждой стороны. Согласно принципу Бабине-Буккера, это должно приводить к появлению выраженного резонанса, соответствующего 19-му элементу, но сдвинутому в сторону низких частот.

Для всех трех структур были измерены зависимости дифференциального сопротивления от напряжения (Рис. 8). На спектральной характеристике антенны с 19 элементами можно выделить ярко-выраженную особенность при частоте 118 ГГц, соответствующую ее низшему частотному резонансу (Рис. 8, кривая 2); антенна с 25 элементами и модифицированной структурой имеет резкую особенность при частоте 114 ГГц, соответствующую возбуждению структурного дефекта (Рис. 8, кривая 3); при частотах выше 160 ГГц характеристики для всех трех антенн практически совпадают. Для кривых 2 и 3 на рисунке Рис. 8 к измеренным зависимостям  $R_d(V)$  была выполнена подгонка зависимостью, рассчитанной по эквивалентной схеме с одним колебательным контуром (Рис. 8, пунктирная линия). В результате подгонки для низкочастотных резонансов антенн 2 и 3 были получены значения  $118 \pm 2$  ГГц и  $114 \pm 2$  ГГц соответственно.

При помощи программы Agilent Momentum проводилось численное моделирование зависимости действительной части адмиттанса от частоты для всех типов структур в низкочастотной области (Рис. 9). Данные численного моделирования находятся в хорошем соответствии с геометрией каждой из приведенных антенн и с соответствующими  $R_d(V)$  характеристиками [A5]. Для антенны с 19 элементами было выполнено восстановление

спектральных характеристик в диапазоне частот от 80 до 320 ГГц (Рис. 10, кривая 1) с использованием эквивалентной схемы ДП и антенны с 7 резонансными элементами.

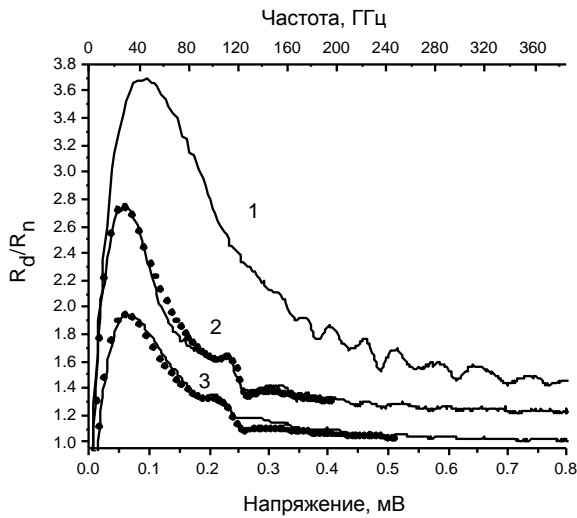


Рис. 8. Зависимости  $R_d(V)/R_n$  для антенн с логопериодическими регулярными структурами: 25 элементов (1), 19 элементов (2), и для модифицированной антенны (3). Сплошная линия- эксперимент, пунктирная- расчёт. Кривые (1) и (2) сдвинуты вдоль вертикальной оси на 0.4 и на 0.2 соответственно.

В качестве контура, эквивалентного передающей линии, был использован дополнительный  $R_c C$  контур с емкостью  $C = 10$  пФ и характеристическим импедансом  $R_c = 70$  Ом. Параметры контура были выбраны таким образом, чтобы подогнать  $R_d(V)$  в флуктуационной области. В случае подгонки эквивалентным контуром значение минимального адмиттанса определяется характеристическим адмиттансом  $1/R_c$  передающей линии. Адмиттанс при подгонке получился в 2 раза больше, чем адмиттанс при

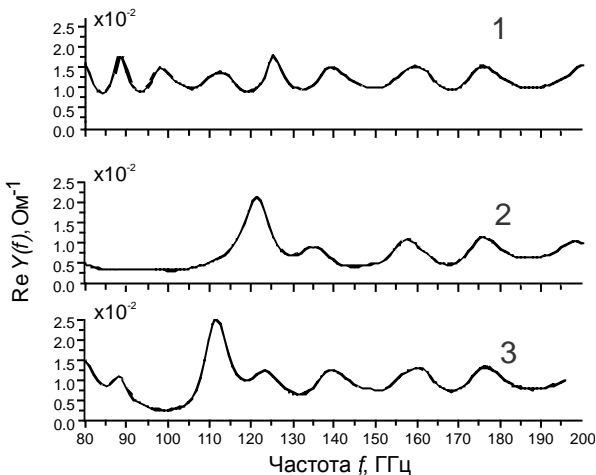


Рис. 9. Результаты компьютерного моделирования  $Re Y(f)$  для антенны с регулярной структурой и 25 элементами (1), с 19 элементами (2), а также с 25 элементами с дефектом (3).

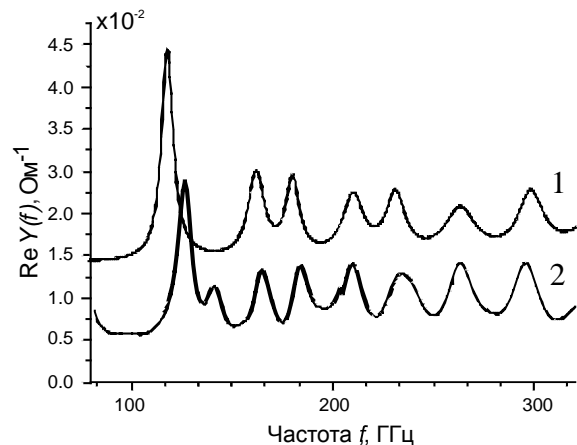


Рис. 10. Зависимость  $Re Y(f)$  для антенны с 19 элементами, полученная методом Джозефсоновской спектроскопии: эксперимент (1) и компьютерным моделированием (2).

моделировании программой AgilentMomentum (Рис. 10, кривая 2), что объясняется влиянием дополнительных элементов, вклад которых не был учтен при моделировании.

В разделе 4.8. описаны результаты исследования электромагнитных потерь в материале ВТСП при помощи джозефсоновской адмиттансной спектроскопии. Электродинамические свойства были исследованы при помощи джозефсоновского бикристаллического перехода с присоединённой антенной. Исследовалась эволюция отдельной особенности на кривой  $R_d(V)$ , соответствующей резонансу на частоте  $f_r = 673$  ГГц. Был создан эквивалентный контур с одним резонансным элементом, характеризуемым добротностью  $Q$  и сопротивлением связи  $R_r$ , который использовался для подгонки к экспериментальной кривой  $R_d(V)$  по мере изменения особенности с насыщением в озон-кислородной смеси. Отжиг в смеси озона и кислорода в течение первых 100 минут привел к уменьшению сопротивления связи  $R_r$  и увеличению добротности  $Q$  (Рис. 11), что свидетельствует об уменьшении электромагнитных потерь в пленке.

Дальнейший отжиг вплоть до 600 минут в пределах погрешности не привел к изменению обозначенных параметров.

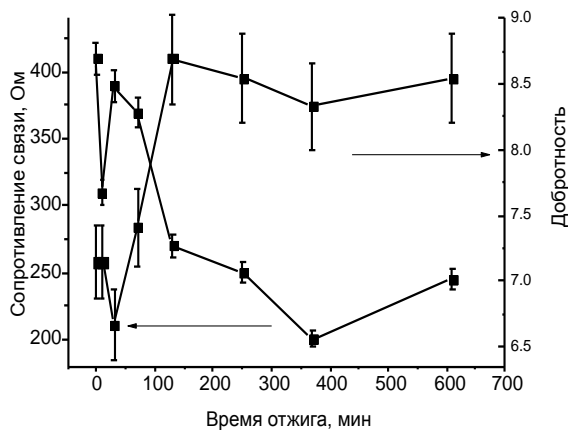


Рис. 11. Сопротивление связи и добротность в зависимости от времени отжига джозефсоновского перехода в смеси озона и кислорода.

Таким образом, вследствие низкотемпературного отжига в смеси озона и кислорода улучшилось согласование антенны с переходом и понизились электромагнитные потери, что может быть использовано для улучшения качества пленок.

Другим механизмом потерь в пленке является возбуждение внутренних колебательных мод. Для исследований был выбран образец с взаимонаклоненными осями  $c$  и углом разориентации  $2 \times 11.3^\circ$ . Были измерены его ВАХ и  $R_d(V)$  характеристики до и после отжига в озон-кислородной смеси. Особенности, наблюдаемые на приведенной характеристике (Рис. 12), могут быть интерпретированы как результат возбуждения оптических фононов. Наиболее сильные особенности наблюдаются при напряжениях 9.4 мВ и 9.56 мВ. Для оценки частот соответствующих им резонансов была осуществлена подгонка зависимости  $R_d(V)$ ,

вычисленной для модели ДП, взаимодействующего с двумя резонаторами. В результате были получены резонансные частоты  $152.0 \pm 0.1 \text{ см}^{-1}$  и  $154.3 \pm 0.1 \text{ см}^{-1}$ , которые близки к рассчитанным частотам поперечных оптических фононных мод  $151 \text{ см}^{-1}$  и  $153 \text{ см}^{-1}$  в  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  [10]. Амплитуда особенностей, связанных с колебательными модами, определяется степенью упорядоченности кристаллической решетки. Наличие вакансий кислорода и межузленных атомов приводит к уширению фононных спектральных линий. При диффузии кислорода вглубь берегов перехода, которая имеет место как при насыщении, так и при релаксации, создается более упорядоченная структура и особенности проявляются более явно, их амплитуда постепенно растет, что и наблюдалось на измеренных зависимостях.

В разделе 4.9. приведены выводы по соответствующей главе.

В Заключение приведены результаты диссертации и сформулированы выводы.

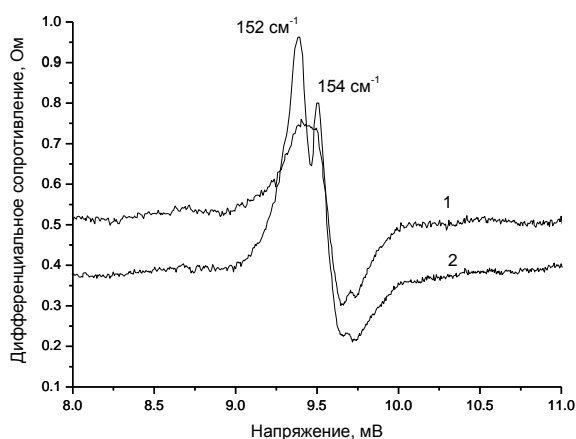


Рис. 12. Зависимость  $R_d(V)$  для ДП из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  до отжига в озонородной смеси (1), и после отжига (2).  $T = 5 \text{ K}$ .

## Список публикаций

### Список публикаций в журналах, входящих в перечень ВАК

- A1. Гундарева И.И. Усилитель с резонансным трансформатором для измерения особенностей вольтамперной характеристики бикристаллических джозефсоновских переходов из ВТСП-материалов. // Нелинейный мир. - 2009. - Т.7. - № 6. - С. 491.
- A2. О.Ю.Волков, В.Н.Губанков, И.И.Гундарева, Ю.Я.Дивин, В.В.Павловский. Джозефсоновская адмиттансная спектроскопия характеристик логопериодической антенны в субмиллиметровом диапазоне длин волн. // Радиотехника и электроника. - 2009. - Т. 54. - N11. - С. 1381–1386.
- A3. O.Volkov, Y.Divin, V.Gubankov, I.Gundareva, V.Pavlovskiy. Josephson admittance spectroscopy for frequency analysis of broadband THz antennas. // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. - V. 234. - P. 042026.
- A4. Гундарева И.И., Губанков В.Н. Применение джозефсоновской адмиттансной спектроскопии для исследования характеристик антенны в субмиллиметровом диапазоне длин волн. // Нелинейный мир. -2010. - Т. 8. - № 2. - С. 126.

- A5. O.Y. Volkov, Y.Y. Divin, V.N. Gubankov, I.I. Gundareva, V.V. Pavlovskiy. Terahertz characterization of external resonant systems by high- $T_c$  Josephson junctions. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2011. - V. 21. - N 3. -P. 306-310.
- A6. I. I. Gundareva, O.Y. Volkov, M. V. Lyatti, Y.Y. Divin, V. N. Gubankov, V.V. Pavlovskiy. Evolution of electrical and electro-dynamic properties of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  bicrystal Josephson junctions with oxygen loading. // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. – 2011. - V. 21. - N 3. - P. 147-150.
- A7. I.I. Gundareva, V.N. Gubankov, Y.Y. Divin, M.V. Lyatti, V.V. Pavlovskiy, O.Y. Volkov. Trimming of high-  $T_c$  bicrystal Josephson junctions by ozone and vacuum annealing. // *Physics Procedia*. – 2012. - V. 36. - P. 217 – 222.
- A8. В.В. Павловский, И.И. Гундарева, О.Ю. Волков, Ю.Я. Дивин, В.Н. Губанков. Расширение частотного диапазона импедансной джозефсоновской спектроскопии. // *Радиотехника и электроника*. – 2013. - Т. 58. –N5.
- A9. И.И. Гундарева, В.Н. Губанков, Ю.Я. Дивин. Оптимизация приготовления сверхпроводящих эпитаксиальных  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  пленок как базовых электродов для джозефсоновских переходов. // *Журнал Радиоэлектроники*. – 2013. - Т.59. –N3. – 21С.
- A10. О.Ю. Волков, В.Н. Губанков И.И. Гундарева, Ю.Я. Дивин, В.В. Павловский. Эквивалентная схема джозефсоновского перехода с интегрированной антенной в терагерцовой области частот. // *Журнал Радиоэлектроники*. – 2013. - Т.59. –N3. – 11С.

#### **Список публикаций в трудах конференций:**

- A11. Yu.Ya. Divin, V.N. Gubankov, I.I. Gundareva, O.Yu. Volkov, V.V. Pavlovskiy. Josephson Spectral Analysys of Log-periodic Antennas. // *Euroflux 2009 From devices to circuits and systems. Int. Conference- European project S-PULSE, Avignon, 21-23 September*. – 2009. - P. 71-72.
- A12. I.I. Gundareva, O.Y. Volkov, Y.Y. Divin, V.N. Gubankov, V.V. Pavlovskiy. Characterization of Terahertz Planar Antenna by Josephson Admittance Spectroscopy. // *12th International Superconductive Electronics Conference, June 16-19, 2009, Fukuoka, Japan, Extended Abstracts, HF-P26*.
- A13. O.Y. Volkov, Y.Y. Divin, V.N. Gubankov, I.I. Gundareva, V.V. Pavlovskiy Characterization of Therahertz Planar Antenna by Josephson Admittance Spectroscopy. // *Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. Preliminary Program and Abstracts. St. Peterburg, Russia*. - 2009. - P. 54-55.
- A14. O.Volkov, Y.Divin, V.Gubankov, I.Gundareva, V.Pavlovskiy. Josephson admittance spectroscopy for frequency analysis of broadband THz antennas. // *Proceedings of 9th European Conference on Applied Superconductivity*. – September 13-17. -2009 Dresden. – Germany. –P. 554.
- A15. O.Y. Volkov, Y.Y. Divin, V.N. Gubankov, I.I. Gundareva, V.V. Pavlovskiy Spectral features of terahertz resonant system in fine structure of the dc characteristics of bycrystal YBCO Josephson junctions. // *XIII International Conference for Young Researchers. Wave electronics and its applications in the information and telecommunication systems. Preliminary program and abstracts. Sankt-Peterburg, Russia*. – 2010. - P. 37.
- A16. V. V. Pavlovskiy, V.N. Gubankov, I. I. Gundareva. Parametric excitation of Josephson oscillator in external resonator at arbitrary coupling. // *Proc. Of 5 Int. Waveform Diversity and Design Conference, 8-13 August, 2010, Sheraton on the Falls, Niagara Falls, Canada, IEEE 2010*. - P. 000132.

- A17. O. Y. Volkov, Y. Y. Divin, V. N. Gubankov, I. I. Gundareva, V. V. Pavlovskiy. Terahertz characterization of external resonant systems by high-Tc Josephson junctions. // Applied Superconductivity Conference 2010 Abstracts. – 4EB-02. - P.427.
- A18. I.I. Gundareva, O.Y. Volkov, M. V. Lyatti, Y.Y. Divin, V. N. Gubankov, V.V. Pavlovskiy. Evolution of electrical and electro-dynamic properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> bicrystal Josephson junctions with oxygen loading. // Applied Superconductivity Conference 2010 Abstracts. – 1EPA-01. - P. 162.
- A19. Y. Divin, I. Gundareva, M. Lyatti, U. Poppe. Towards ideal high-Tc Josephson Junctions. // Nature Conference: Frontiers in Electronic Materials 2012, Aachen, Germany. – SUP 6.
- A20. O.Volkov, Y.Divin, V.Gubankov, I.Gundareva, V.Pavlovskiy. Characterization of Terahertz Planar Antenna by Josephson Admittance Spectroscopy. // 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave. - 2009. - V. 1- 2. - P. 15-16.
- A21. Gundareva, I.I., Volkov, O.Y., Divin, Y.Y., Gubankov, V.N., Pavlovskiy, V.V. Spectral analysis of subterahertz resonant system by Josephson admittance spectroscopy. // The 35 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave. - 2010.

### Список цитированной литературы

1. К. К. Лихарев, Б. Т. Ульрих. Системы с джозефсоновскими контактами. Москва: МГУ, 1978.
2. Y. Y. Divin, I. M. Kotelyanskii, V. N. Gubankov, Bicrystal Josephson junctions for terahertz Hilbert-transform spectroscopy. Journal of communications technology & electronics, vol. 48, no. 10, pp. 1137-1147, 2003.
3. V. Leca Heteroepitaxial growth of copper oxide superconductors by pulsed laser deposition. Enschede: Printpartners Ipskamp, 2003.
4. L. F. Cohen, H. J. Jensen. Open questions in the magnetic behaviour of high-temperature superconductors Reports on Progress in Physics, vol. 60, no. 12, pp. 1581-1672.
5. М. В. Ляйти Детекторные характеристики YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> бикристаллических джозефсоновских переходов с взаимнонаклоненными осями [001] в терагерцовой области частот. Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук ИРЭ РАН. Москва, 2006.
6. J. L. Tallon, C. Bernhard, H. Shaked et al. Generic Superconducting Phase-Behavior in High-T<sub>c</sub> Cuprates - T<sub>c</sub> Variation with Hole Concentration in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>. Physical Review B, vol. 51, no. 18, pp. 12911-12914, 1995.
7. K. Conder. Oxygen diffusion in the superconductors of the YBaCuO family: isotope exchange measurements and models. Materials Science & Engineering R-Reports, vol. 32, no. 2-3, pp. 41-102, 2001.
8. А.Ф. Волков Влияние импеданса внешней цепи на вольтамперную характеристику джозефсоновского перехода. Радиотехника и электроника, Т.17, № 12, С. 2581-2583, 1972
9. В. В. Павловский, Моделирование электромагнитной резонансной системы с джозефсоновским переходом. Журнал Радиоэлектроники, vol. 59, no. 3, pp. 11, 2013.
10. J. Humlicek, A. P. Litvinchuk, W. Kress et al. Lattice-Vibrations of Y<sub>1-x</sub>Pr<sub>x</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub>. Theory and Experiment. Physica C, vol. 206, no. 3-4, pp. 345-359, 1993.