

На правах рукописи

Клушин Александр Моисеевич

**КОГЕРЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПОЧКАХ
ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ КОНТАКТОВ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРА-
ТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

**05.27.01. - Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых
эффектах**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Нижний Новгород - 2009

Работа выполнена в Федеральном Государственном Унитарном Предприятии «Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «КВАРЦ» и в Исследовательском Центре Юлих ГмбХ (Forschungszentrum Jülich GmbH), г. Юлих, Германия.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Григорий Наумович Гольцман, Московский государственный педагогический университет, г. Москва

доктор физико-математических наук, профессор Валерий Владимирович Рязанов, Институт физики твёрдого тела РАН, г. Черноголовка

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Александр Александрович Андронов, Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород

Ведущая организация: Физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, г. Москва

Защита диссертации состоится “ ” октября 2009 г. в часов на заседании Диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН (603950, Нижний Новгород, ГСП-105)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН.

Автореферат разослан “ ” сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

К. П. Гайкович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Открытие эффекта Джозефсона [1] способствовало с одной стороны лучшему пониманию природы сверхпроводимости, а с другой положило начало развитию современной сверхпроводниковой электроники. Для эффекта Джозефсона характерны высокая чувствительность к магнитным и электрическим полям, а также высокие характерные частоты f_c , ограниченные величиной сверхпроводниковой щели. Величина f_c джозефсоновских элементов на основе низкотемпературных сверхпроводников лежит в диапазоне сотен гигагерц, а в случае высокотемпературных сверхпроводников может достигать единиц и, возможно, даже десятков терагерц.

На основе этого эффекта были разработаны принципиально новые приборы - сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы), позволившие создать сверхчувствительные магнитометры и градиометры с энергетическим разрешением близким к постоянной Планка \hbar в частотном диапазоне от долей герца до единиц мегагерц [2]. Такие магнитометры нашли применение во многих областях науки и техники.

Высокое быстродействие и малая энергия переключения джозефсоновских контактов $E_J \approx 10^{-18}$ Дж позволило приступить к разработке устройств быстрой одноквантовой логики [3], а также высокочувствительных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей на их основе. Заметным достижением в этой области сверхпроводниковой электроники является создание цифрового приемника высокочастотного аналогового сигнала с тактовой частотой до 11,5 ГГц [4].

Решение многих задач в области разработки перспективных как аналоговых, так и цифровых устройств сверхпроводниковой электроники связывается в настоящее время с использованием многоэлементных джозефсоновских структур. Среди них особое место занимают когерентно осциллирующие цепочки джозефсоновских контактов, которые используются как при разработке генераторов джозефсоновского излучения, так и в эталонах напряжения. Принципиальная важность последнего применения связана с тем, что неизвестны другие физические эффекты, которые могли бы составить конкуренцию эффекту Джозефсона в квантовой метрологии по точности воспроизведения единицы напряжения.

Основой использования эффекта Джозефсона в квантовой метрологии является тот факт, что под воздействием внешнего электромагнитного поля с частотой f на вольтамперной характеристике (ВАХ) контакта возникают ступени тока при напряжениях

$$V_n = nf / K_J, \quad (1)$$

где $K_J = 2e/h \approx 483$ ГГц/мВ – постоянная Джозефсона, а n – целое число. Квантованное напряжение, возникающее на одном джозефсоновском контакте под воздействием внешнего электромагнитного поля, обычно мало, и для его увеличения необходимо включение последовательно большого числа когерентно осциллирующих контактов. Важнейшими условиями для синхронизации цепочек контактов являются малый разброс их параметров, а также наличие электродинамической системы, обеспечивающей эффективное и равномерное взаимодействие контактов с внешним электромагнитным излучением, обеспечивающим их синхронизацию.

Создание Gurvitch и др. [5] в 1982 году основ технологии изготовления джозефсоновских переходов типа Nb/Al-AIO_x/Nb, а также предложенное Niemeуer и др. [6] встраивание цепочек таких переходов в микрополосковую линию с антенной типа fin-line обеспечило синхронизацию большого числа последовательно включённых переходов электромагнитным излучением миллиметрового диапазона волн. Развитие этих достижений позволило создать за последние десятилетия джозефсоновские эталоны постоянно и переменного напряжений, широко используемые в мире [7].

Открытие в 1986 году Bednorz и Müller [8] высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и последующее открытие Wu, Chu и др. [9] сверхпроводимости в иттрий-бариевой керамике YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) при температуре выше температуры кипения жидкого азота инициировали работы по созданию джозефсоновских контактов из этих материалов [10]. Основными преимуществами джозефсоновских контактов из ВТСП по сравнению с низкотемпературными сверхпроводниками являются их более высокая рабочая температура, а также более высокая характерная частота. Поэтому джозефсоновские контакты из ВТСП представляют значительный интерес для использования в квантовой метрологии напряжения, а также при разработке источников терагерцового (ТГц) излучения.

К моменту начала работы над диссертацией (1989 г.) технология джозефсоновских контактов только начинала развиваться и по настоящее время уступает в развитии технологии низкотемпературных джозефсоновских переходов на основе ниобия и его соединений. Наибольшие успехи в технологии контактов из ВТСП связаны с обнаружением в 1988 году эффекта Джозефсона на искусственно созданной границе двух монокристаллов и получением бикристаллических контактов [11]. Вскоре было опубликовано несколько статей [12], [13], [14], [15], в которых обсуждались высокочастотные свойства одиночных контактов при температуре жидкого азота, однако отсутствовали публикации по технологии многоконтактных систем из ВТСП и рассмотрению когерентных процессов в них.

В этой связи важной становится задача по изучению когерентных процессов в многоконтактных джозефсоновских схемах из ВТСП под воздействием электромагнитного излучения. Решение задачи о захвате частоты собственных колебаний массивов джозефсоновских переходов полем

внешнего излучения позволит перейти к проблеме создания джозефсоновского источника излучения на базе самосинхронизованных когерентно осциллирующих цепочек джозефсоновских контактов.

При проведении исследований предстояло получить ответы на следующие вопросы: возможно ли воспроизводимое изготовление цепочек джозефсоновских контактов из ВТСП? Описываются ли свойства этих контактов в рамках резистивной модели [16] и какие параметры контактов при этом достижимы? Можно ли в принципе синхронизовать внешним сигналом цепочки последовательно соединённых контактов из ВТСП несмотря на значительный разброс их параметров? Какие электродинамические системы пригодны для синхронизации цепочек таких джозефсоновских контактов? Могут ли цепочки из этих контактов использоваться в квантовой метрологии и прецизионной измерительной технике?

Перечисленный круг вопросов, составляющий основное содержание диссертационной работы, обуславливает её важность и актуальность.

Цели диссертационной работы

1. Разработка методов изготовления многоконтактных джозефсоновских схем на основе высокотемпературных сверхпроводников с контролируемыми величинами их нормальных сопротивлений и критических токов.
2. Исследование коллективного поведения и электрофизических параметров цепочек джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников.
3. Изучение механизмов синхронизации в цепочках джозефсоновских контактов из ВТСП в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн, встроенных в различные электродинамические схемы.
4. Апробация многоконтактных когерентно осциллирующих цепочек из высокотемпературных джозефсоновских контактов для применения в квантовых эталонах напряжения.

Научная новизна

1. Разработаны метод синхронизации джозефсоновских контактов, заключающийся в уменьшении разброса их сопротивлений, а также методы изготовления цепочек бикристаллических шунтированных контактов. Впервые реализована синхронизация внешним электромагнитным полем цепочек контактов из ВТСП с малым разбросом сопротивлений, но большим разбросом их критических токов.

2. Предложена оригинальная концепция построения криоэлектронной схемы, в которой джозефсоновские контакты включаются последовательно по постоянному току смещения и параллельно по току СВЧ, что облегчает их синхронизацию электромагнитным полем. Показана эффективность использования микрополосковой и копланарной линий, а также резонатора поверхностной волны для синхронизации исследованных цепочек контактов в диапазоне частот до 40 ГГц.
3. Проведены прецизионные измерения формы ступенек тока, возникающих на ВАХ цепочек джозефсоновских контактов при взаимодействии с электромагнитным излучением. Впервые показано совпадение квантованных напряжений, генерируемых на цепочках джозефсоновских контактов из ВТСП при температуре жидкого азота, и ниобиевых контактах при температуре жидкого гелия. С неопределённостью $1,8 \times 10^{-8}$ доказано постоянство джозефсоновской константы в исследованном диапазоне температур
4. Исследован механизм синхронизации цепочек джозефсоновских контактов в резонаторе Фабри-Перо, обеспечивающий их взаимодействие с основной модой резонатора. Разработана топология и способ включения цепочек контактов в резонатор Фабри-Перо. Реализована синхронизация цепочки из 620 джозефсоновских контактов и получено рекордное значение квантованного напряжения 0,1 В при температуре жидкого азота.
5. Проведена апробация концепции построения эталона вольта на цепочках когерентно осциллирующих джозефсоновских контактов из ВТСП и аппаратуры для его реализации. Показана воспроизводимость единицы напряжения с относительной неопределённостью, ограниченной только собственными шумами стабилитронов. Существенным преимуществом предложенного эталона по сравнению с существующими эталонами на стабилитронах является независимость выходного напряжения новых приборов от температуры, влажности и давления окружающей среды.

Научная и практическая значимость

В ФГУП НИИПИ КВАРЦ результаты диссертации используются при проведении научно-исследовательской работы по созданию калибратора напряжения на основе джозефсоновских контактов из ВТСП. Низкотемпературный зонд с резонатором Фабри-Перо и встроенной цепочкой джозефсоновских контактов из ВТСП используются в ИФМ РАН при проведении научно-исследовательской работы по созданию джозефсоновского источ-

ника ТГц излучения; в национальном метрологическом центре в Монтевидео (Уругвай) при разработке эталона вольта; в национальном метрологическом институте Италии (I.N.R.I.M, Турин) в исследовательских целях для проведения метрологических экспериментов. В метрологических институтах России, в Международном бюро мер и весов (МБМВ), а также метрологических центрах ряда европейских стран, Китая и Сингапура используется малогабаритный синтезатор миллиметрового диапазона волн в составе эталонов вольта на ниобиевых схемах.

Основные положения, выносимые на защиту. Следующие результаты получены впервые и выносятся на защиту:

1. Метод синхронизации джозефсоновских контактов, заключающийся в уменьшении разброса их сопротивлений, а также метод изготовления цепочек бикристаллических шунтированных контактов, устойчивых к термоциклированию и допускающих хранение в обычных лабораторных условиях. Реализована синхронизация внешним электромагнитным полем цепочек контактов из ВТСП с малым разбросом их сопротивлений и неизбежным разбросом их критических токов.
2. Концепция построения криоэлектронной схемы, в которой джозефсоновские контакты включаются последовательно по постоянному току смещения и параллельно по току СВЧ, что облегчает их синхронизацию электромагнитным полем. Показана эффективность использования микрополосковой и копланарной линий, а также резонатора поверхностной волны для синхронизации исследованных цепочек контактов в диапазоне частот до 40 ГГц.
3. Результаты прецизионных сличений квантованных напряжений, генерируемых на цепочках джозефсоновских контактов из ВТСП при температуре жидкого азота, и ниобиевых контактах при температуре жидкого гелия доказавшие постоянство с неопределённостью $1,8 \times 10^{-8}$ джозефсоновской константы в исследованном температурном интервале и возможность построения квантовых эталонов вольта на основе сверхпроводниковых схем, работающих при температуре жидкого азота.
4. Механизм синхронизации цепочек джозефсоновских контактов в резонаторе Фабри-Перо, обеспечивающий их взаимодействие с основной модой резонатора, а также топология и схема встраивания контактов в резонатор Фабри-Перо. Продемонстрирована синхронизация цепочки из 620 джозефсоновских контактов и получено квантованное напряжение 0,1 В при температуре жидкого азота.
5. Концепция построения эталона напряжения на основе цепочек джозефсоновских контактов из ВТСП и аппаратура для её реализации. Экспериментально доказано, что разработанная концепция обеспечивает вос-

произведение единицы напряжения с относительной неопределенностью, ограниченной только собственными шумами стабилитронов. Существенным преимуществом предложенного эталона по сравнению с известными приборами на стабилитронах является независимость эталонного напряжения от температуры, влажности и давления окружающей среды.

Апробация работы

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на семинарах и конференциях в ФГУП НИИПИ «КВАРЦ», ИФМ РАН, Институте Био- и Наносистем Исследовательского центра Юлих (Германия), университета Вупперталь (1995, Wuppertal, Германия), Исследовательского Центра Карлсруэ (1998, Karlsruhe, Германия), заседаниях Немецкого Физического Общества (1996, 2000, 2002, 2004, 2007), а также приглашённых семинарах в National Institute of Standards and Technology (1996, Boulder, CO, США); Conductus, Inc. (1998, Sunnyvale, CA, США); HYPRES (1998, Elmsford, NY, США); State University of New York (1996, SUNY, Stony Brook, США); University of Cambridge (2001, Cambridge, Великобритания); МБМВ (2002, Paris, Франция); Национальном метрологическом институте Франции (2002, Laboratoire National d'Essais, Paris, Франция); Национальном метрологическом институте Италии (2003, L'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, I.N.R.I.M., Torino, Италия); Физико-техническом институте Германии (2002, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB, Braunschweig). Результаты диссертации также докладывались на международных конференциях по прикладной сверхпроводимости (*Applied Superconductivity Conference, ASC*), ASC98, ASC00, ASC02, ASC04, ASC06; на международных конференциях по сверхпроводниковой электронике (*International Superconductive Electronics Conference, ISEC*), ISEC95, ISEC97, ISEC99, ISEC01, SEC03, ISEC05, ISEC07; на европейских конференциях по прикладной сверхпроводимости (*European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS*), EUCAS95, EUCAS97, EUCAS99, EUCAS01, EUCAS03, EUCAS05, EUCAS07, EUCAS09; на международной конференции по точным электромагнитным измерениям (*Conference on Precision Electromagnetic Measurements, CPEM*), CPEM94, CPEM96, CPEM00, CPEM02, CPEM04, CPEM08, а также многих других конференциях и семинарах.

Публикации

Результаты диссертации отражены в 110 печатных работах, в том числе 32 статьи и 2 патента опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации материалы получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. В работах [A18, A24-A26, A30, A41-A46, A48-A50] вклад соавторов равноправен. В работах [A6, A9, A11, A13, A14, A17, A19, A23, A28, A31] вклад соискателя является определяющим в постановку задачи и равноценным в получении результатов. В работах [A1-A5, A7, A8, A12, A15, A16, A20, A21, A27, A29, A32-A40, A47] соискателю принадлежит основная роль как в постановке задачи, так и проведении измерений, а также интерпретации результатов. Работы [A10, A22] выполнены без соавторов. Все выносимые на защиту результаты получены лично соискателем.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, 5 Глав, Заключение, в котором сформулированы основные выводы. Каждая из глав диссертации заканчивается разделом кратких выводов, в котором формулируются основные результаты, полученные в этой части. Объем диссертации составляет 196 страниц, включая 172 рисунка, 8 таблиц и список цитированной литературы с общим числом 218 наименований, в том числе работы автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности рассматриваемой темы, научная новизна и практическая ценность исследований, а также перечислены основные результаты. В конце введения кратко описана структура диссертации.

Глава 1 посвящена изучению электродинамических свойств одиночных джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников. **Раздел 1.1** посвящён изучению различных типов джозефсоновских контактов из ВТСП с целью выбора оптимальной технологии для изготовления цепочек таких контактов. Оптимальная технология должна обеспечивать воспроизводимое изготовление цепочек контактов с малым разбросом параметров и вольтамперными характеристиками, описываемыми резистивной моделью при температуре жидкого азота. В этом разделе приведены результаты исследований джозефсоновских контактов на межзёренных границах гранул массивной металлооксидной керамики, а также тонкоплёночных контактов, использующих гетерозепитаксиальные плёнки из ВТСП. В **подразделе 1.1.1** изучены джозефсоновские свойства контактов, изготовленных из керамики $YBCO$ и $Tl_{1.4}BaCaCu_{1.5}O_y$ ($TlBaCuCaO$). Переходы Джозефсона получались из брусочков керамики путём утоньшения в середине образца в одном или двух измерениях. При температуре жидкого

азота такие контакты имели критический ток от 1 - 3 мА. Были исследованы ВАХ контактов при воздействии тока СВЧ на частоте 8.6 ГГц и измерен наклон возникающих при этом ступенек напряжения с индексами $n = 1 \div 3$. Найдено, что в центре ступенек наклон не превышает 5×10^{-6} Ом и быстро растёт при смещении к краю ступеньки. Разнесение ступенек по току значительно превосходило то, которое следует из резистивной модели. На мостиках из керамики $TiBaCuCaO$ эффект Джозефсона наблюдался при рекордно высоких температурах выше 100 К. Как в любой гранулированной системе, в контактах из массивной керамики с увеличением тока происходило постепенное разрушение отдельных, более слабых, участков перехода. Таким образом, наблюдаемые ВАХ обычно являлись результатом сложения ВАХ отдельных контактов. Этот факт приводил к наклону индуцированных ступенек напряжения. Всё сказанное, а также плохая воспроизводимость параметров контактов делает невозможным их использование даже в самых простых криоэлектронных устройствах. В подразделе 1.1.2 описаны результаты исследований контактов, созданных на искусственно изготовленной ступеньке в подложке [17]. При выращивании гетероэпитаксиальной плёнки в местах изгиба плоскости подложки появляются как минимум два, а обычно больше джозефсоновских контактов. Из таких контактов была разработана G. Kunkel [18] схема, позволившая автору диссертации зарегистрировать излучение из 10 контактов, включённых параллельно по постоянному току смещения и последовательно по току СВЧ. Достоинством этой технологии является возможность свободного размещения джозефсоновских контактов в любой точке подложки. Однако обсуждаемая технология не обеспечивает удовлетворительной воспроизводимости параметров контактов. ВАХ контактов на ступеньке практически не описываются резистивной моделью. Амплитуда ступенек тока обычно существенно меньше, чем это следует из этой модели. В подразделе 1.1.3 исследованы биэпитаксиальные джозефсоновские контакты. Этот метод создания бикристаллической границы был предложен в работе [19] и основан на возможности роста тонкой гетероэпитаксиальной плёнки ВТСП на подложке, несмотря на сильное рассогласование их кристаллических решёток. В случае такого роста кристаллографические оси в плёнке некоторых материалов поворачиваются на 45° относительно подложки. Были исследованы СВЧ свойства биэпитаксиальных контактов, изготовленных С.А.Сopetti. Наблюдались небольшие ступеньки Шапиро на ВАХ контактов при гелиевых температурах. При азотных температурах ВАХ биэпитаксиальных контактов хорошо описываются резистивной моделью. Однако низкая плотность критического тока (10^2 - 10^3 А/см²) и малая величина характерного напряжения, а также большой разброс параметров препятствуют использованию этой технологии для создания цепочек джозефсоновских контактов из ВТСП. В подразделе 1.1.4 изучены электрофизические свойства квази-

планарных джозефсоновских контактов, в которых слабая связь создавалась за счёт подавления сверхпроводящих свойств на торце нижнего электрода [20]. Исследования поведения критического тока в магнитном поле показали сильную зависимость периода модуляции $I_c(H)$ от угла ориентации магнитного поля относительно плоскости контакта. Аналогичные измерения на квазипланарных ниобиевых контактах выявили качественно аналогичную зависимость $I_c(H)$. Таким образом, проведённые исследования показали, что необычная зависимость $I_c(H)$ связана с геометрией контакта, что ограничивает область применения квазипланарных структур.

В разделе 1.2 обсуждаются свойства одиночных бикристаллических контактов (БК). В подразделе 1.2.1 описана технология изготовления бикристаллических джозефсоновских контактов. Проведённый анализ имеющихся экспериментальных данных показал, что для создания цепочек контактов наиболее пригодны бикристаллические подложки из окиси циркония, стабилизированной иттрием (YSZ). Преимуществом YSZ являлось наличие хорошо разработанной технологии выращивания гетероэпитаксиальных плёнок YBCO, а также возможность изготовления из этого материала подложек с множеством бикристаллических границ, что очень важно для получения многоконтактных джозефсоновских схем. В диссертации описаны результаты, полученные на плёнках YBCO, напылённых в основном методом термического напыления [21]. Типичная толщина плёнки была равна 0,25-0,3 мкм, хотя исследовались плёнки с толщинами 0,1 мкм до 1,5 мкм. Этот метод напыления позволил наряду с высококачественными плёнками YBCO получать двухслойные структуры YBCO-Au, используемые для создания цепочек шунтированных бикристаллических контактов, исследованных в нашей работе. Плёнки золота толщиной от 20 нм до 200 нм напылялись при температуре около 100°C в одном вакуумном цикле с YBCO, что гарантировало низкие контактные сопротивления между двумя слоями. Контакты Джозефсона образуются в месте пересечения спая бикристалла мостиками шириной w в несколько микрон. Обычно в наших экспериментах $w = 4-6$ мкм, хотя были исследованы мостики шириной от 1 до 10 мкм. Для формирования мостиков использовалась фото- или электронная литография с последующим ионно-лучевым травлением.

В подразделе 1.2.2 обсуждаются свойства и модель контакта YBCO-Au. Шунтированный бикристаллический контакт является основным активным элементом ВТСП схем, исследованных в диссертации. В качестве материала шунта использовались плёнки из золота. Этот металл не вызывает подавления сверхпроводимости и обеспечивает малое контактное сопротивление между слоями из ВТСП и золота. Контактное сопротивление оценивалось на основании модели шунтированного бикристаллического контакта, схематически показанного на рис. 1. Благодаря сопротивлению бикристаллического контакта постоянный ток протекает частично через бикристаллическую границу, а частично по плёнке золота. Перераспределение

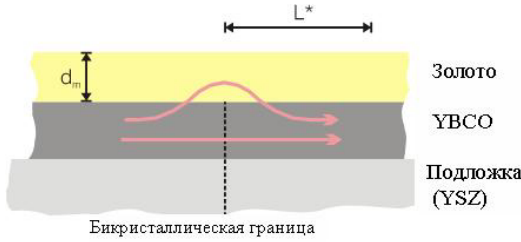


Рис.1. Схематическое изображение шунтированного джозефсоновского контакта

Au и YBCO. Было найдено, что в практически интересном случае длинного шунта $L > L_{\perp}$ его сопротивление

$$R_s = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{\rho_c \rho_m}{d_m}} \quad (2)$$

может быть уменьшено за счёт увеличения толщины плёнки золота и уменьшения удельных сопротивлений ρ_c , ρ_m . Однако толщину плёнки целесообразно увеличивать только до некоторой величины $d_m \leq \rho_c \rho_m^{-1}$. Принимая во внимание, что типичная величина ρ_c порядка 10^{-8} Ом·см, а $d_m < 1$ мкм получаем $L_{\perp} \approx 10$ мкм. Для проверки формулы (2) соискателем была измерена зависимость сопротивления шунтированного контакта от толщины плёнки золота. Из этой зависимости было найдено произведение $\rho_c \rho_m$, являющееся важной характеристикой поверхности раздела ВТСП-золото. Независимые измерения ρ_m позволили оценить величину $\rho_c = (1 \div 3) \times 10^{-8}$ Ом·см², которая совпадает с лучшими опубликованными результатами [22], а также показывает, что модель правильно описывает наши шунтированные контакты.

В подразделе 1.2.3 приведены результаты исследований электрофизических свойств одиночных бикристаллических контактов. Критический ток джозефсоновского контакта при условии равномерного распределения тока по площади, т.е. при $w / \lambda_J \leq 4$, равен $I_c = j_c w d$, где w – ширина контакта, λ_J – джозефсоновская глубина проникновения, j_c – плотность критического тока, d – толщина плёнки YBCO. С целью получения максимальных значений критических токов и соответственно амплитуд ступеней были проведены исследования контактов, изготовленных на бикристаллических подложках с разными углами разориентации бикристаллической границы, а также при разных толщинах плёнок ВТСП, ширинах мостиков и температурах. Одними из первых были исследованы нешунтированные контакты при разных температурах от 77 К до 50 К, как в автономном режиме, так и при электромагнитном облучении. Было найдено, что при температуре кипения

тока происходит в районе бикристаллической границы на некоторой характерной длине L_{\perp} . Сопротивление шунта R_s определяется как сопротивлением плёнки золота с удельным сопротивлением ρ_m , толщиной d_m и шириной w , так и контактным сопротивлением ρ_c между

жидкого азота ВАХ контактов и осцилляции амплитуд ступеней тока в зависимости от электромагнитного излучения идеально и в деталях описываются расчётными кривыми, следующими из резистивной модели. С понижением температуры и ростом I_c наблюдалось отклонение ВАХ контактов от резистивной модели в связи с ростом w/λ_J и переходом к распределённому контакту. Проведённые исследования показали, что полное соответствие с резистивной моделью наблюдается только для сосредоточенных контактов с не очень большим значением параметра $w/\lambda_J \leq 4$. Однако в этом случае критические токи далеки от оптимальных значений (~ 1 мА), необходимых для получения ступенек тока с такой же амплитудой. Одним из путей повышения критических токов БК является увеличение его плотности. Известно [23], что j_c очень сильно зависит от угла разориентации монокристаллов Θ . Мы измерили эту зависимость при температуре $T \approx 77$ К. Было найдено, что плотность критического тока в бикристаллических контактах, изготовленных на подложках с симметричными границами [23] выше, чем при использовании подложек с несимметричными границами. В первом случае плотность критических токов при температуре 77 К достигала величин $j_c = 5 \times 10^4$ А/см² при $\Theta = 24^\circ$ и $j_c = 10^5$ А/см² при $\Theta = 19^\circ$. В лучших образцах характерные напряжения нешунтированных контактов равнялись 0,25-0,3 мВ при азотных температурах и возрастали до 0,6-0,7 мВ при охлаждении до 50 К. При фиксированной плотности критического тока увеличение I_c возможно за счёт увеличения площади контакта. Выше было показано, что ширина контакта не может быть увеличена существенно по сравнению с величиной $w = 4 \div 6$ мкм. Однако увеличение толщины плёнки YBCO может оказаться эффективным для увеличения I_c . В диссертации приводятся зависимости I_c бикристаллических контактов шириной 4 мкм от толщины плёнок YBCO в диапазоне от 0,2 до 1 мкм, напылённых на подложки с симметричными границами и углом разориентации $\Theta = 19^\circ$. Было установлено, что с ростом d критический ток растёт линейно и при этом сохраняется высокое качество БК. При воздействии электромагнитного излучения на частоте около 20 ГГц наблюдались ступени тока с рекордно высокими амплитудами равными $\Delta I_1 = 1$ мА при температуре 80 К и $\Delta I_1 = 2$ мА при температуре 50 К.

Для определения значений величин разброса критических токов и нормальных сопротивлений δR были измерены 12 цепочек шунтированных бикристаллических джозефсоновских контактов. Десять цепочек состояли из 100 джозефсоновских контактов и две – из 512 контактов. Было найдено, что величина δR не превышала 20%, что, как будет показано ниже, позволяет синхронизовать цепочки, состоящие из большого числа последовательно включённых контактов. Разброс минимальных значений критических токов также не превышал 20%, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости параметров БК. *Стабильность параметров БК* в процессе

термоциклирования является важным критерием пригодности этих джозефсоновских контактов для практического применения. Известно [24], что сильное подавление сверхпроводящих свойств ВТСП вызывает конденсация паров воды на плёнках. Для защиты от воздействия влаги применяют различные материалы. Однако лучшим методом является размещение бикристаллических контактов в среде инертного сухого газа. Автор использовал комбинацию этих двух методов: схемы покрывались тонким слоем фоторезиста и охлаждались в среде газообразного гелия. Изготовленные таким образом образцы исследовались в течение двух месяцев при термоциклировании от комнатной температуры до температуры жидкого азота. За время исследований было проведено около 60 термоциклов. Результаты измерений критического тока $2I_c$, нормального сопротивления R и характерного напряжения контактов V_c показали, что деградация параметров в процессе термоциклирования отсутствует.

Для метрологических применений важно, чтобы, во-первых, положение ступеней тока на оси напряжения точно соответствовало джозефсоновскому соотношению и, во-вторых, амплитуда ступенек должна быть достаточно большой, позволяющей минимизировать влияние теплового шума на наклон ступеней при азотной температуре. Другая возможная причина проявления наклона ступеней тока может быть связана с тем, что джозефсоновский контакт из ВТСП представляет собой множество слабых связей. Поэтому при воздействии электромагнитного излучения некоторые участки ВТСП мостика могут переходить в резистивное состояние с малым сопротивлением. Наклон, вносимый этим сопротивлением, может быть выявлен только путём сравнения ступенек ВАХ контактов из ВТСП с контактами из ниобия. Для измерения формы ступени тока ВАХ одиночного бикристаллического ВТСП контакта сравнивалась с ВАХ точечного контакта Nb-Nb [25]. Выполненные эксперименты показали, что ступени на контактах из ВТСП и контактах Nb-Nb совпадают с неопределённостью $\sim 10^{-6}$. Были исследованы также ступени тока при напряжении $\sim 1,8$ мВ, генерируемые на коротких цепочках из бикристаллических контактов. Измеренная разность напряжений на ступеньках не превышала значения $\delta V_j = 1,2 \text{ нВ} \pm 1,12 \text{ нВ}$. Таким образом, ступени совпали с неопределённостью $\delta V_j / V_j = 3 \times 10^{-7}$. Наши измерения показали, что БК охлаждённые до температуры жидкого азота могут использоваться в квантовой метрологии и прецизионной измерительной технике. В разделе 1.3 главы 1 сформулированы краткие выводы.

Глава 2 посвящена исследованию теоретических и экспериментальных основ процессов синхронизации цепочек безгистерезисных джозефсоновских контактов. При синхронизации последовательно включённых джозефсоновских контактов с безгистерезисной ВАХ необходимо обеспечить условия, при которых бы при общих токах смещения как постоянного, I_0 , так

и переменного, I_{rf} , на ВАХ наблюдались бы суммарные ступеньки тока. В идеальном случае равных I_c , R_N и I_{rf} ВАХ контактов полностью определены и идентичны, так что возможен выбор такого тока смещения I_0 , при котором рабочие точки всех контактов находятся на ступенях их ВАХ. Однако в реальности существует разброс значений указанных параметров, что препятствует синхронизации контактов внешним СВЧ сигналом. Распределение СВЧ тока I_{rf} вдоль цепочки контактов зависит от выбора схемы согласования контактов с СВЧ трактом, что в принципе позволяет добиться высокой степени равномерности смещения контактов микроволновым током. Следует отметить, что требования к равномерности распределения СВЧ тока вдоль цепочки контактов не такие жёсткие по сравнению с требованиями к разбросу параметров контактов на постоянном токе, I_c , R_N .

В разделе 2.1 рассматривается вопрос о возможности создания цепочки последовательно соединённых контактов Джозефсона, у которых рабочая точка задаётся общим током смещения, и все они при этом находятся на ступеньке своей вольтамперной характеристики. Эта задача рассматривалась нами ранее в работе [26]. Для решения поставленной задачи в рамках резистивной модели на множестве параметров I_c , R_N были найдены области

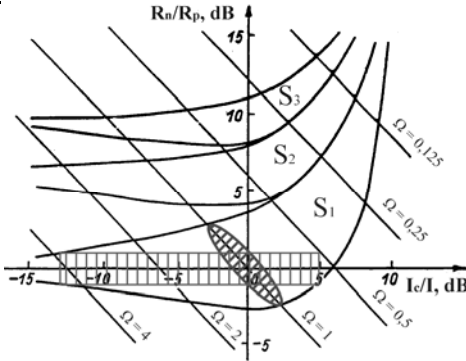


Рис. 2. Области параметров S_n , допускающие работу на суммарной первой (S_1), второй (S_2) и третьей (S_3) ступенях тока.

S_n для контактов с безгистерезисной ВАХ. Все контакты, параметры которых попадают в эти области при общих токах постоянного I и СВЧ I_{rf} смещений, находятся на ступеньке с одинаковым номером n . На рис. 2 в логарифмическом масштабе для режима $I / I_{rf} = 0,5$ на плоскости параметров R_N / R_0 ($R_0 = \Phi_0 f / I$), и I_c / I изображены области S_1 , S_2 и S_3 соответственно для первой, второй и третьей ступенек тока. Там же нанесены линии равных значений нормированной частоты Ω . Уширения этих областей отвечают тем значениям

параметров I_c , R_N , где допускается их большой разброс одновременно. В зависимости от технологии характер разброса параметров может быть различным. Если в цепочку соединены контакты с одинаковыми характеристическими напряжениями, то значения отношений δI_c , δR_N наибольших $I_{c,max}$, $R_{N,max}$ к наименьшим $I_{c,min}$, $R_{N,min}$, при достижении которых амплитуда ступеней ΔI_1 , ΔI_2 , ΔI_3 становится равной нулю, составляют 1,78, 1,48 и 1,23

соответственно для первой, второй и третьей коллективной ступенек. При этом оптимальные значения Ω должны быть порядка 1, 0,5 и 0,33. Заштрихованная область овальной формы на рис. 2 выделяет наиболее благоприятные параметры контактов, которые допускают работу на первой ступеньке тока при максимальном разбросе параметров I_c , R_N , но примерно одинаковыми частотами Ω . Этим условиям обычно удовлетворяют существующие технологии изготовления джозефсоновских контактов из низкотемпературных сверхпроводников, таких как ниобий, или нитрид ниобия. Ранее справедливость этого условия была также показана экспериментально [26], [27].

Для темы данной диссертации особый интерес представляет прямоугольная заштрихованная область. В этой области допустим большой разброс δI при малой величине δR . Таким образом, подбором R_0 , I можно добиться, что одновременно на ступеньке будут находиться контакты со значительно различающимися значениями I_c . В отличие от технологии низкотемпературных контактов для технологии изготовления высокотемпературных джозефсоновских контактов, особенно бикристаллических контактов, характерен малый разброс нормальных сопротивлений δR по сравнению δI . Режим синхронизации контактов с примерно равными сопротивлениями мы и будем использовать в дальнейших исследованиях. Для гарантированного подавления разброса сопротивлений была разработана технология изготовления шунтированных контактов, описанная ранее в разделе 1.2.

В разделе 2.2 изучается влияние шунта на синхронизацию контактов внешним электромагнитным излучением. Для исследования влияния индуктивности шунта рассмотрим модель джозефсоновского контакта [28], в которой полный ток через контакт является суммой трёх токов: джозефсоновского сверхпроводящего тока $I_c \sin\varphi$, где φ разность фаз волновых функций, тока через нормальное сопротивление контакта и тока I_s через шунт, состоящий из сопротивления R_s и индуктивности L_s .

Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение джозефсоновского контакта в этой модели, решалась методом численного моделирования для различных значений безразмерной индуктивности $\beta_L \equiv L_s/L_c$, где $L_c = \Phi_0/2\pi I_c$ – индуктивность джозефсоновского контакта. Для малых $\beta_L \ll 1$ ВАХ шунтированных переходов идеально описывается резистивной моделью. С увеличением β_L появляется большой избыточный ток по сравнению с ВАХ, рассчитанной для контакта с $\beta_L = 0$. Учёт индуктивности шунта позволил также воспроизвести в расчётной ВАХ уменьшение амплитуды ступеньки тока, а также появление субгармонических ступеней тока. Численное моделирование зависимости амплитуды ступени Шапиро от частоты облучения показало, что при возрастании β_L её относительная амплитуда $\delta = \Delta I_1/I_c$ слегка превышает соответствующие значения

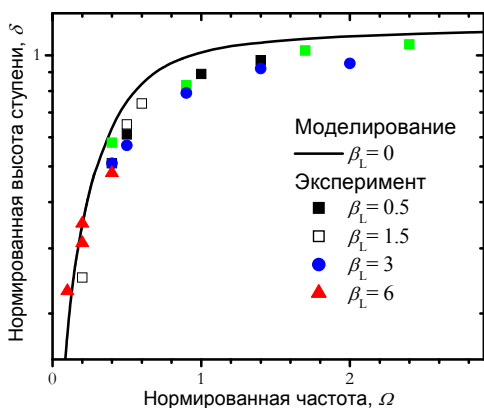


Рис. 3. Экспериментальные и расчётная (сплошная линия) зависимости амплитуды ступени от частоты

ширину шунта w от 3 мкм до 18 мкм, так и его длину от L от 20 мкм до 4 мкм.

Изменение индуктивности контакта L_c достигалось за счёт изменения ширины контакта и температуры в дьюаре с жидким азотом в диапазоне от 65 К до 77 К. Критический ток варьировался в диапазоне от 0,1 мА to 5 мА. Результаты измерений представлены на рис. 3 для экспериментальных значений β_L от 0,5 до 6. При малых значениях нормированной частоты $\Omega < 0,2$ амплитуда ступеньки δ следует зависимости, рассчитанной для $\beta_L = 0$ (сплошная линия) даже для больших индуктивностей $\beta_L = 6$ (сплошные треугольники). Однако с ростом частоты отличие значений δ от кривой, вычисленной для $\beta_L = 0$ возрастает с Ω . Для малых $\beta_L \leq 1,5$ (квадраты) измеренные значения δ немного меньше расчётных величин для всех значений Ω от 0,3 до 2,5. В соответствии с расчётами амплитуда ступени уменьшается на 20% для $\beta_L = 3$ и $\Omega = 1$.

В диссертации также методом численного моделирования было изучено влияние индуктивности шунта на зависимость амплитуды первой ступени тока от мощности электромагнитного излучения. Было получено, что максимальная величина ступени падает с ростом β_L от $\delta = 1$ для $\beta_L = 0$ до $\delta = 0,65$ для $\beta_L = 6$. Также важно отметить, что зависимость амплитуды ступени от СВЧ мощности становится более сильной с ростом β_L . Это приводит к тому, что возрастают требования к равномерности распределения СВЧ тока вдоль цепочки последовательно включённых контактов, а также требования к равномерности распределения критических токов у контактов в цепочке. Например, если мы примем, что величина разброса критических токов контактов в цепочке $\delta I = 2$, то максимальная величина амплитуды суммарной ступени уменьшится с $\delta = 0,8$ для $\beta_L = 0$ до $\delta = 0,5$ для $\beta_L = 6$.

для $\beta_L = 0$ при низких частотах $\Omega < 0,2$. Однако при $\Omega > 0,3$ относительная амплитуда ступени уменьшается по сравнению с классическим случаем. Относительное подавление первой ступени δ возрастает с β_L и достигает 20% для $\beta_L = 3$ и 35% для $\beta_L = 6$. Для экспериментальной проверки результатов численного счёта была измерена зависимость ΔI_1 от Ω для различных значений β_L . Для изменения индуктивности шунта мы варьировали как

Интересно отметить, что с ростом β_L амплитуда ступени не убывает до нуля в зависимости от мощности, как это характерно для случая $\beta_L = 0$. Эта особенность также наблюдалась автором экспериментально.

Приведённый анализ показывает, что джозефсоновские контакты шунтируются эффективно как на постоянном, так и переменном токах только на низких частотах $\Omega \leq 0,2$. На этих частотах импеданс контакта определяется в основном активной частью $R_s > 2\pi f L_s$ и его поведение хорошо описывается резистивной моделью при $\beta_L = 0$. На высоких частотах $\Omega > 0,3$ ситуация осложняется. Импеданс шунта становится реактивным и определяется индуктивностью шунта. В этом случае эффективность шунтирования на переменном токе падает с ростом β_L , т.к. импеданс шунта на переменном токе становится больше, чем импеданс джозефсоновского контакта. Проведённые расчёты показали, что отклонение от резистивной модели начинается уже при $\beta_L = 1,5$. Это условие ограничивает максимальное значение критического тока величиной $I_{c,max} = 0,75 \Phi_0 / \pi L_s$. Для оценки $I_{c,max}$ необходимо определить индуктивность шунта. Для типичной величины поверхностной индуктивности $L_{\square} = 1$ пГн получаем $I_{c,max} \approx 0,7$ мА. Это ограничение может оказаться существенным, если учесть влияние тепловых шумов на наклон ступеней тока при азотных температурах.

В разделе 2.3 приведены первые результаты исследования синхронизации электромагнитным излучением сильно шунтированных ВТСП джозефсоновских бикристаллических контактов с примерно равными сопротивлениями, но большими значениями δI . При этом также выполнялось условие $\Omega_{min} \geq 1$. Используемые в экспериментах джозефсоновские контакты имели средний критический ток $I_c \approx 0,3$ мА при температуре 15 К. Среднее сопротивление контактов было примерно равным 0,1 Ом, а величина δR не превышала 5%. Эти параметры соответствовали оптимальным условиям для наблюдения первой коллективной ступени в выбранном частотном диапазоне.

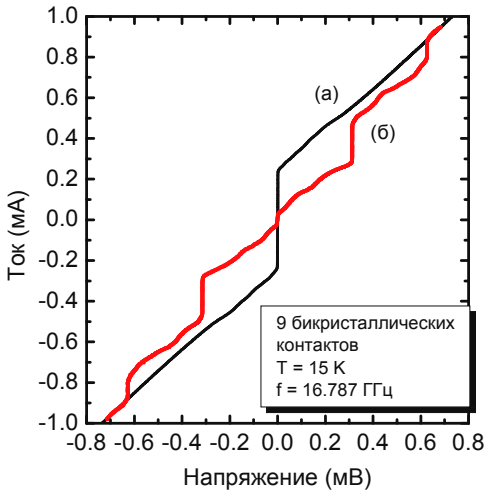


Рис. 4. ВАХ цепочки из 9 бикристаллических контактов: а) в автономном режиме и б) при воздействии СВЧ облучения.

При этом также выполнялось условие $\Omega_{min} \geq 1$. Используемые в экспериментах джозефсоновские контакты имели средний критический ток $I_c \approx 0,3$ мА при температуре 15 К. Среднее сопротивление контактов было примерно равным 0,1 Ом, а величина δR не превышала 5%. Эти параметры соответствовали оптимальным условиям для наблюдения первой коллективной ступени в выбранном частотном диапазоне.

На рис. 4 показаны ВАХ цепочки из 9 бикристаллических контактов в автономном

режиме (кривая (а)) и под действием СВЧ излучения на частоте 16,787 ГГц (кривая (б)). Видно, что амплитуда первой суммарной ступени тока примерно равна 0,2 мА, т.е. критическому току цепочки, несмотря на большой разброс критических токов $\delta I = 2,2$. Согласно теоретическому анализу, изложенному выше, при синхронизации контактов с примерно равными характеристическими частотами первая коллективная ступенька тока становится равной нулю при $\delta I > 1,78$, т.е. меньшем разбросе, чем наблюдался в эксперименте. В нашем случае контакты имели малый разброс нормальных сопротивлений δR . При малых значениях δR , несмотря на большие различия в критических токах, была зарегистрирована первая коллективная ступенька тока с амплитудой, равной $I_{c,\min}$. Проведённые эксперименты впервые подтвердили возможность синхронизации цепочек джозефсоновских контактов с примерно равными сопротивлениями, но большим разбросом критических токов, как это и было теоретически предсказано разделе 2.1. В **разделе 2.4** главы 2 сформулированы краткие выводы.

В **главе 3** рассмотрены вопросы синхронизации цепочек джозефсоновских ВТСП контактов электромагнитным полем, сосредоточенным в тонкоплёночных линиях передачи. В **разделе 3.1** изучена возможность синхронизации цепочки джозефсоновских контактов из ВТСП, встроенных в копланарную линию (КПЛ). Проведённые измерения показали, что при использовании ВТСП контактов, сверхпроводящие электроды которых покрыты тонкой плёнкой золота, в КПЛ возникает большое затухание СВЧ сигнала. К недостаткам этого подхода также следует отнести зависимость размеров контактов от размеров КПЛ, которые определяют импеданс линии. Для уменьшения потерь в линии необходимо использовать контакты большого размера, что также отрицательно сказывается на перспективности использования данного подхода.

В **разделе 3.2** исследована синхронизация цепочек джозефсоновских контактов электромагнитным излучением из передающей линии. Как уже упоминалось ранее, для синхронизации джозефсоновских контактов необходимо равномерное распределение внешнего СВЧ тока вдоль цепочки. Однако потери, связанные с поглощением СВЧ мощности в джозефсоновских контактах, покрытых золотом электродах, а также в линии в форме меандра, препятствуют равномерному возбуждению больших цепочек контактов. Дополнительным фактором, вызывающим затухание в линиях, являются большие диэлектрические постоянные и диэлектрические потери в подложках, применяемых для эпитаксиального роста ВТСП плёнок. Для преодоления указанных выше ограничений автором была предложена оригинальная концепция построения криоэлектронной микросхемы. В новом подходе передающие СВЧ линии и цепочки джозефсоновских контактов были разделены. Цепочка в форме меандра из последовательно включённых джозефсоновских контактов располагается вдоль СВЧ электрода пере-

дающей линии и близко к его краю. В этом случае джозефсоновские контакты включены по СВЧ току параллельно, что позволяет реализовать равномерное распределение переменного тока вдоль цепочки. В диссертации методом численного моделирования изучены оптимальные условия синхронизации цепочек контактов в предложенной схеме включения. Изучаемая интегральная схема состоит из двух основных частей: цепочки джозефсоновских контактов и передающей линии (рис.5). Вдоль бикристаллической границы (GB) расположены джозефсоновские контакты, показанные крестиками. По постоянному току эти контакты соединены последовательно.

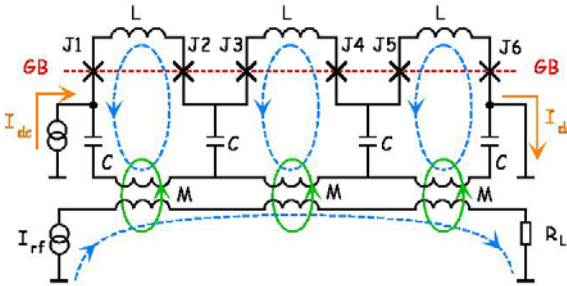


Рис. 5. Схематическое изображение цепочки джозефсоновских контактов и передающей линии.

По постоянному току эти контакты соединены последовательно. По СВЧ току контакты соединены в кольца, подключённые параллельно передающей линии. Каждое кольцо включает два джозефсоновских контакта, индуктивность L и две ёмкости C . Этот вариант включения контактов может обеспечивать

как взаимную синхронизацию контактов в соседних кольцах, так и их индуктивную связь с передающей линией. Для исключения отражений в линии важно использовать согласованную нагрузку. Затухание СВЧ тока вдоль передающей линии и соответственно спадание амплитуды микроволновых токов смещения может быть легко компенсировано за счёт усиления взаимной индукции M . Усиление индуктивной связи достигается простым уменьшением расстояния между линией и цепочкой контактов.

Разработанная концепция схемы позволяла выбирать независимо подложки для передающей линии и ВТСП джозефсоновских контактов и создавать схемы с оптимальными параметрами. Для нахождения оптимальных параметров схем были проведено численное моделирование процессов, происходящих в схеме. Тип соединения джозефсоновских контактов по переменному току – параллельный или последовательный – зависит от отношения индуктивного Z_L и ёмкостного Z_C импедансов на рабочей частоте (рис. 5). В оптимальном случае эта частота должна быть в 1,5-2 раза больше характерной частоты джозефсоновских контактов f_c . При $Z_L \ll Z_C$ все контакты соединены по току СВЧ последовательно и их взаимная синхронизация невозможна. Однако при обратном соотношении величин импедансов, т.е. $Z_L \gg Z_C$, пары контактов включаются параллельно, что может приводить к взаимной синхронизации контактов. Результаты числен-

ного моделирования подтвердили результаты простого анализа. В численном моделировании рассматривалась цепочка из 6 контактов. Было показано, что при $Z_L / Z_C = 0,2$ фазовая синхронизация контактов в цепочке отсутствует. Однако при соотношении $Z_L / Z_C = 2$ в цепочке контактов возникает синхронизация. При этом можно выделить два типа резонансных частот. Синхронизация джозефсоновских контактов, возникающая при напряжении $V \approx 6,9 V_c$, соответствует резонансной частоте $f = 1,5f_c$, определяемой резонансной частотой большого кольца обратной связи, включающего три индуктивности и две ёмкости (рис. 5). Вторая область синхронизации при напряжении $V \approx 12 V_c$ соответствует частоте $f = 2,0f_c$ и определяется резонансной частотой малого кольца обратной связи. При воздействии внешнего СВЧ сигнала на частоте $1,5f_c$ на ВАХ цепочки возникают суммарные ступени тока. Амплитуда ступенек возрастает с ростом СВЧ сигнала. Результаты численного моделирования показали, что при этом роль взаимной синхронизации падает или исчезает совсем при усилении синхронизации внешним сигналом.

Для экспериментальных исследований синхронизации цепочек БК с помощью передающей линии были изготовлены несколько вариантов схем. Одной из лучших оказалась конструкция, в которой, в качестве передающей, использовалась щелевая линия, встроенная в волноводную секцию, работающую в диапазоне частот от 26 ГГц до 40 ГГц. Щелевая передающая линия изготавливалась на подложке из поликора толщиной 0,25 мм. Электроды толщиной 2 мкм изготавливались из золота по толстоплёночной технологии для уменьшения затухания в линии. Антенны типа *fin-line*, установленные на входе и выходе передающей линии, обеспечивали её хорошее согласование с волноводом. На выходе волновода была установлена согласованная нагрузка для реализации в плёночной линии режима бегущей волны. Затухание СВЧ сигнала в диапазоне от 20 ГГц до 40 ГГц не превышало 1 дБ. Дизайн ВТСП микросхемы был выполнен с учётом результатов, полученных численным моделированием. Была создана микросхема, в которой выполнялось условие $Z_L \gg Z_C$, необходимое для синхронизации контактов в цепочке, связанных с передающей линией. Для возбуждения цепочек контактов электромагнитным излучением линия располагалась на расстоянии около 10 мкм поверх исследуемой подложки. Для исключения паразитных резонансов, которые могли бы возникать в подложке, её толщина была уменьшена с $d = 0,5$ мм до $d = 0,15$ мм. В этой схеме облучения было впервые получено джозефсоновское напряжение более 10 мВ, пригодное для использования в прецизионных или метрологических приборах. Однако для практического применения цепочек из ВТСП контактов необходимо измерить параметры ступени (напряжение, амплитуда по току и наклон) с высокой точностью.

В **подразделе 3.3** изложены методы прецизионных измерений квантованных ступенек напряжения на ВАХ цепочек БК и полученные экспери-

ментальные результаты. Для использования джозефсоновских контактов из высокотемпературных сверхпроводников в прецизионной измерительной технике, а также метрологии необходимо найти ответы на два вопроса. Во-первых, необходимо подтверждение универсальности джозефсоновского соотношения (1) в широком интервале температур. Во-вторых, необходима экспериментальная проверка отсутствия наклона ступеньки тока на ВАХ ВТСП контактов, измеренного с высокой точностью. Ниже мы рассмотрим два метода измерения наклона ступенек. Первый, простой и быстрый, заключается в сопоставлении формы измеренной ступеньки тока с её расчётной формой, полученной в рамках резистивной модели джозефсоновского контакта. Второй, более точный, заключается в прямом сравнении ступенек, генерируемых на контактах или цепочках из ВТСП с такими же ступеньками, генерируемыми на ВАХ ниобиевых контактов.

Предложенный метод измерения заключается в следующем. Во-первых, за короткое время $\sim \tau$ проводится запись вольтамперной характеристики в области исследуемой ступени тока (или критического тока) $V_k = F(I_k)$, где индекс k изменяется от 1 до N . Во-вторых, полученный массив данных аппроксимируется математическим выражением $V = F(I, p_1, p_2, p_3, \dots)$, где V – напряжение на переходе, I – ток смещения, а $p_1, p_2, p_3 \dots$ параметры теоретической модели. Средние значения параметров и их стандартные отклонения находятся методом наименьших квадратов. Таким образом, задача сводится к поиску аппроксимирующей кривой, адекватно описывающей измеренные экспериментальные данные. В качестве кривой $V(I)$, описывающей вольтамперную характеристику джозефсоновского контакта в области ступени тока (или I_c), было выбрано выражение

$$V = V_0 + r(I - i_0) + \frac{r_d}{i_1 + i_2} (i_1^2 \cdot e^{(I-i_0)/i_1} - i_2^2 \cdot e^{-(I-i_0)/i_2}). \quad (3)$$

Зависимость (3) содержит шесть параметров. Параметр V_0 определяет положение ступени тока на оси напряжений и в оптимальном случае стремится к V_J . Коэффициент r отражает наличие паразитных параметров в цепи измерения. Исследование этого коэффициента может позволить определить величину и характер паразитных параметров и по возможности исключить или довести их до приемлемого уровня. Аппроксимирующая кривая (3) имеет точку перегиба, в которой ток и дифференциальное сопротивление в равны, соответственно, i_0 и r_d . Параметр i_0 определяет положение середины ступени тока на оси токов. Параметры i_1 и i_2 имеют размерность тока и описывают степень плавности загиба вольтамперной характеристики на краях ступеней. Эти параметры в основном определяются разбросом величин R_N контактов, включённых последовательно в цепочку и степенью однородности амплитуды СВЧ поля вдоль цепочки. Формула (3) является хорошим приближением к измеряемой характеристике только в окрестно-

сти напряжений V_0 , а при больших напряжениях вольтамперная характеристика переходит на резистивные участки, на которых выражение (3) не применимо. Развита методика была исследована форма первой ступени тока, генерированной при напряжении $V_J \approx 10$ мВ. Эта ступенька была получена при облучении цепочки из 136 контактов СВЧ сигналом частотой $f = 36174,0$ МГц и мощностью 30 мВт при температуре $T = 66$ К. Так как измерение напряжения ступени проводилось на шкале вольтметра 30 мВ, то шумы измерений были довольно большими. С помощью уравнения (3) мы исследовали области ВАХ, соответствующие ступеням с номерами $n = \pm 1$. В обоих случаях измерения были проведены в $N = 280$ точках. В результате численного моделирования форма ступени была воспроизведена очень точно, со стандартным отклонением $\sigma = 10$ нВ, которое примерно на порядок меньше, чем шумы нашей измерительной установки. Это означает, что полученная в эксперименте ступенька тока вертикальная, с относительной неопределённостью 10^{-6} . Для проведения более точных измерений шумы измерительной установки должны быть значительно понижены.

Для уменьшения неопределённости измерения наклона ступеней тока, генерируемых на ВАХ цепочек шунтированных бикристаллических контактов, а также с целью измерения джозефсоновской постоянной в ВТСП, были выполнены эксперименты по прямому сличению квантованных напряжений на ВАХ ВТСП ($V_{J,YBCO}$) и ниобиевых контактов ($V_{J,Nb}$). В качестве опорного использовалось $V_{J,Nb}$, генерируемое на цепочке ниобиевых контактов используемой в программируемом эталоне напряжения Физико-технического института ФРГ, Брауншвайг (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB, Braunschweig) [29]. При сличении цепочки из ВТСП и ниобия включались навстречу и разностное напряжение $\Delta V = V_{J,YBCO} - V_{J,Nb}$ измерялось нановольтметром. Было выполнено два эксперимента. В первом эксперименте был исследован наклон ступени тока на ВАХ цепочки из ВТСП контактов. Для этого измерялась разность напряжений ΔV при фиксированном постоянном токе смещения в центре ступени на ВАХ ниобиевой цепочки и последовательном изменении тока вдоль ступени на ВТСП цепочке. Для уменьшения влияния дрейфа ТЭДС на неопределённость измерений, каждое третье измерение проводилось при возврате тока смещения на середину ВТСП ступени. Результаты этих измерений использовались для вычисления временной зависимости дрейфа ТЭДС и последующей корректировки полученных данных. В течение трёх дней было выполнено 12 циклов измерений. Каждый цикл включал измерения ΔV при 30-50 значениях тока смещения вдоль ВТСП ступени. Неопределённость этих измерений определялась стандартным отклонением среднего значения σ в каждой точке, которое изменялось от цикла к циклу и ограничивалось шумами нуля-детектора и дрейфом ТЭДС в процессе измерений. Ступенька измерялась при напряжениях от 9 мВ до 9.4 мВ. В качестве

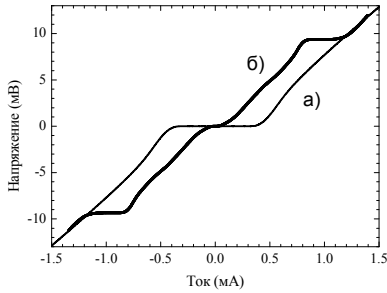


Рис. 6. ВАХ цепочки из 136 шунтированных бикристаллических контактов: (а) в автономном режиме и (б) при воздействии микроволнового излучения на частоте 32,059 ГГц

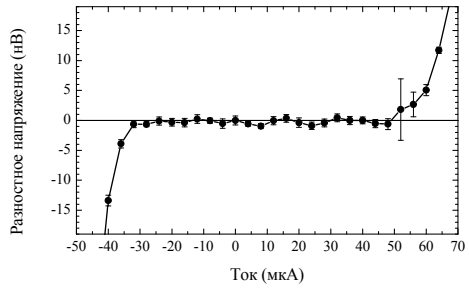


Рис. 7. Прецизионные измерения ступени тока на ВАХ цепочки контактов из ВТСП. Стандартные отклонения (тип А) равны $\pm 1\sigma$.

примера на рис. 6 приведена ВАХ как в автономном режиме, так и при облучении на частоте 32.05918 ГГц. Измерения показали, что амплитуды ΔI_1 ступеней Шапиро с индексами $n = \pm 1$ были одинаковы и примерно равны $0.25 I_c$. Абсолютные значения ΔI_1 изменялись от 70 мкА до 90 мкА в зависимости от частоты облучения и равномерности распределения СВЧ тока смещения вдоль цепочки.

Для точного измерения формы ступени напряжение $V_{J,YBCO}$ компенсировалось напряжением с программируемой цепочки из 62 ниобиевых контактов, облучаемых на частоте $f = 70,34009$ ГГц. Стандартные отклонения средних значений (1σ) ΔV , измеренные вдоль ΔI_1 не превышали 1 нВ для 90% измерений (рис. 7). Этот результат доказывает, что у ступени тока с амплитудой $\Delta I_1 = 80$ мкА наклон отсутствует с неопределённостью 6×10^{-8} .

Во втором эксперименте была измерена разность между напряжениями $V_{J,YBCO}$ и $V_{J,Nb}$ равная величине $\Delta V = -0,04$ нВ $\pm 0,17$ нВ. Следовательно, джозефсоновская постоянная в ВТСП и низкотемпературных сверхпроводниках совпадает с относительной неопределённостью 1.8×10^{-8} . В разделе 3.4 главы 3 сформулированы краткие выводы.

В главе 4 изучалась синхронизация цепочек джозефсоновских бикристаллических контактов включённых в резонатор поверхностной волны (РПВ) и резонатор Фабри-Перо (РФП). В разделе 4.1 исследовались процессы синхронизация джозефсоновских контактов, встроенных в резонаторы поверхностной волны [30]. РПВ состоит из диэлектрической подложки с напыленной на неё плёнкой из ВТСП. Резонатор устанавливается в прямоугольном волноводе перпендикулярно его широкой стенке. В общем случае угол φ между плоскостью плёнки и широкой стенкой волновода не

обязательно равен 90° . Путём изменения этого угла можно регулировать связь между РПВ и волноводом. Был выполнен электродинамический анализ влияния продольных и поперечных, по отношению к направлению протекания СВЧ тока, разрезов на резонансную частоту РПВ. Теоретически и экспериментально, что в случае расположения таких разрезов параллельно микроволновым токам даже при удалении половины токопроводящей поверхности плёнки уход резонансной частоты не превышает 1%. Экспериментально продемонстрирована возможность использования РПВ для синхронизации цепочек джозефсоновских контактов. Для облучения контактов РПВ возбуждался на резонансной частоте $f_r = 32950,8$ МГц. Амплитуда первой ступени тока достигала максимальной величины $\Delta I_c = I_{c\min}$ при мощности $P \approx 0,2$ мВт. Несмотря на большой разброс критических токов контактов, наблюдалась не только максимально возможная амплитуда первой ступени тока, но и чётко выраженная вторая ступенька. Это означает, что СВЧ ток распределён исключительно равномерно вдоль резонатора на длине 8 мм, как это и предсказывается теорией РПВ, если он возбуждается на основной моде. Дополнительные эксперименты и численное моделирование показали, что примерно 20% от тока, протекающего в резонаторе, проходит через контакты. Это доказывает очень хорошее согласование контактов с микроволновым полем в РПВ. Таким образом, продемонстрировано, что в полном соответствии с теорией в РПВ реализуется равномерное распределение СВЧ тока по всей ширине резонатора и доказана сильная связь джозефсоновских контактов с полем СВЧ. Проведённые исследования показали, что РПВ целесообразно применять для синхронизации джозефсоновских контактов в частотном диапазоне до 30–40 ГГц.

В разделе 4.2. изучена синхронизация цепочек джозефсоновских контактов встроенных в резонатор Фабри-Перо, конструкция которого схематически представлена на рис. 8. В экспериментах, описанных в диссертации, использовался полуконфокальный резонатор Фабри-Перо. Преимущества такого типа резонатора перед другими заключается в использовании небольшого плоского зеркала вместо второго сферического, небольшая чувствительность к отклонению от строго параллельного расположения и отсутствие необходимости точно настраивать расстояние между зеркалами. Система зеркал в нашей экспериментальной установке имела следующие геометрические параметры: радиус кривизны сферического зеркала равнялся 25 мм или 50 мм, его диаметр 23 мм. На вставке справа вверху показан образец вместе с держателем. Образец устанавливался в резонаторе таким образом, что цепочка контактов была обращена к сферическому зеркалу. Возможен также другой вариант расположения образца в резонаторе, показанный слева вверху на вставке рис. 8, при котором образец облучался с тыльной стороны подложки, а схема была обращена к плоскому зеркалу. В обоих случаях расстояние между плоским зеркалом и образцом могло

изменяться с помощью специальной тяги. Внутри держателя были закреплены платиновый термометр и резистор в качестве нагревательного элемента. Резонатор представляет собой компактное устройство, позволяющее использовать для охлаждения стандартный дьюар для жидкого азота или даже бытовой металлический термос.

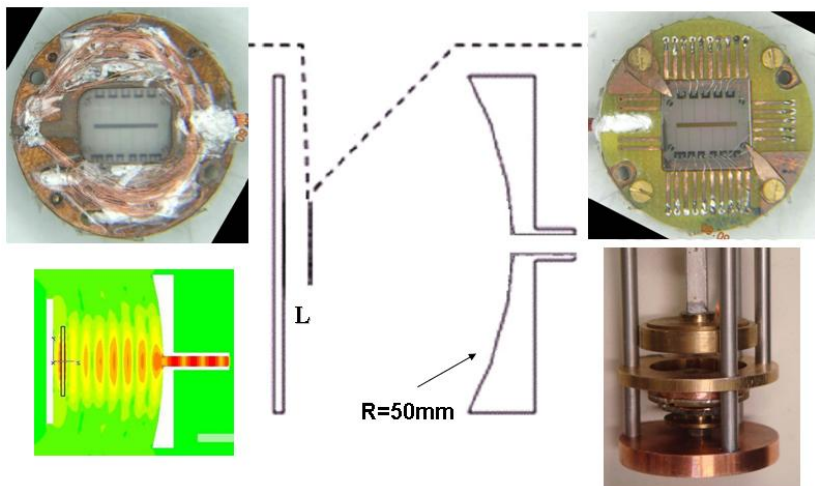


Рис. 8. Конструкция резонатора Фабри-Перо. На вставках сверху показаны образцы, установленные в держателе. На вставке слева внизу показано распределение электрического поля в резонаторе, на вставке справа внизу вариант исследованного резонатора.

В диссертации проведено исследование механизма синхронизации цепочек джозефсоновских контактов, встроенных в резонатор. Определена оптимальная топология включения цепочек контактов в резонатор Фабри-Перо в форме меандра шириной порядка $\lambda_{\text{eff}}/2$, где λ_{eff} – эффективная длина волны в бикристаллической подложке. Экспериментально и методом численного моделирования установлено, что электродинамическое взаимодействие решётки контактов с полем основной моды в резонаторе аналогично по принципу действия поляризационной решётке. Показано, что при ориентации вектора напряжённости электрического поля в резонаторе параллельно бикристаллической границе, а также при расположении образца на расстоянии $\lambda/4$ от плоского зеркала возникает максимальная связь джозефсоновских контактов с полем и соответственно максимальное напряжение ступеней тока. Установлено, что облучение контактов сквозь подложку, обращённую к плоскому зеркалу, обеспечивает равномерное распределение в решетке контактов наведённых токов миллиметрового диапазона волн.

С учётом проведённых экспериментов была разработана схема из 620 бикристаллических джозефсоновских контактов, в которой ширина меандра была равна $\lambda_{\text{eff}}/2 = 0.48$ мм, а ширина джозефсоновских контактов равнялась 6 мкм. Схема состояла из 10 сегментов по 62 контакта в каждом. Расстояние между контактами было равно 12 мкм, а вся схема имела длину около 7.5 мм, т.е. была близка к размеру подложки. Схема была изготовлена на подложке из YSZ, толщина плёнки YBCO равнялась 300 нм, а золотой плёнки – 30 нм. К каждому сегменту были сделаны подводы по постоянному току. С целью минимизации влияния этих подводов на распределение высокочастотного поля в образце, они формировались из высокоомного материала, ниобия, и присоединялись к схеме в точках, соответствующих минимуму СВЧ тока. Было исследовано два образца такой схемы. На первом образце все 10 сегментов были отличного качества, а на втором один сегмент, расположенный на краю подложки был повреждён. На первом образце было получено максимальное джозефсоновское напряжение $V_{J, \text{YBCO}} \cong 0,1$ В, а на втором - $V_{J, \text{YBCO}} \cong 0,09$ В. На рис. 9 показаны ВАХ первого образца измеренные при температуре 79,2 К: (а) в автономном режиме и (б) при облучении внешним сигналом на частоте 77,465 ГГц. Среднее значение критического тока на обоих образцах было равно $I_c = 0,53$ мА, а среднее сопротивление шунтированных контактов равнялось 0,18 Ом. Следовательно, величина характерного напряжения контактов, равная $V_c \cong 0,1$ мВ была оптимальна для синхронизации контактов в мм диапазоне волн. Вставки на рис. 9 показывают вертикальность ступней тока и их

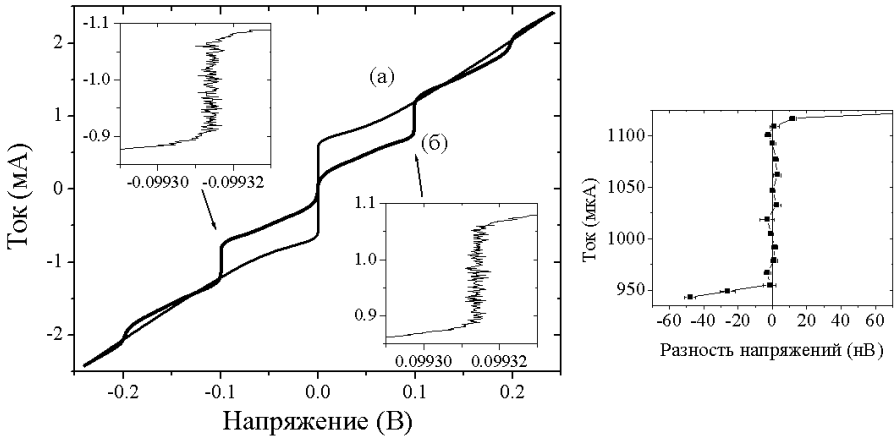


Рис. 9. ВАХ цепочки из 620 джозефсоновских контактов: (а) в автономном режиме и (б) при воздействии электромагнитного излучения. На вставке справа показана ступенька тока, измеренная с высоким разрешением при 70 мВ.

большую амплитуду. Таким образом, впервые была получена полная синхронизация высокотемпературных джозефсоновских контактов в цепочке длиной 7.5 мм.

Мы также провели прецизионные измерения профиля ступеньки, возникающей в результате синхронизации большого числа контактов при напряжении $V_{J,YBCO}$. Измерения проводились путём прямого сравнения $V_{J,YBCO}$ относительно постоянного напряжения $V_{J,Nb}$, генерируемого на цепочке ниобиевых контактов. Схемы из ВТСП и ниобия помещались в разные дыры и облучались двумя синтезаторами миллиметрового диапазона волн, синхронизованными от общего опорного сигнала частотой 10 МГц. Для задания рабочих точек использовались два источника токов смещения. Разность напряжений $\Delta V = V_{J,Nb} - V_{J,YBCO}$ измерялась нуль детектором, в качестве которого использовался цифровой нановольтметр типа НР34420. Ниобиевые контакты охлаждались до температуры жидкого гелия. При облучении 512 контактов на частоте 66,448 ГГц на цепочке генерировалась первая ступенька тока при напряжении $V_{J,Nb} \cong 70,35$ мВ. ВТСП контакты охлаждались до температуры жидкого азота. Для достижения квантового напряжения $V_{J,YBCO} \cong V_{J,Nb}$ мы синхронизовали 434 бикристаллических контактов на частоте 78,390 ГГц. Для исключения влияния дрейфа ТЭДС и токов утечки, токами смещения выбирались ступеньки с примерно равными напряжениями, но противоположной полярности. При измерениях формы ступеньки, возникающей на ВТСП контактах, мы фиксировали ток смещения в центре ступеньки, возникающей на ниобиевых контактах, а ток через контакты из ВТСП последовательно изменяли от 0,93 мА до 1,15 мА. Было выполнено 16 циклов измерений, каждый из которых включал 30 измерений, а одно измерение длилось 15 сек. Неопределённость измерений, определяемая как стандартное отклонение от среднего значения σ , и изменяющееся от цикла к циклу ограничивалась тепловыми шумами нуль-детектора и дрейфом ТЭДС. Форма ступени, измеренная при напряжении около 70,35 мВ, показана на рис. 9, вставка внизу, справа. Было найдено, что ступени с индексами $n = \pm 1$ симметричны и их амплитуда ΔI_1 равна $0.3 I_c$. Стандартное отклонение 1σ при измерении положения ВТСП ступеньки относительно опорного напряжения на ниобии не превышало 1 нВ. Этот результат продемонстрировал, что наблюдаемая ступенька вертикальна с относительной неопределённостью 4×10^{-8} в пределах диапазона токов 150 мкА.

Наши результаты показали, что разработанные схемы из джозефсоновских ВТСП контактов являются перспективными для применения в квантовой метрологии для создания эталонов вольта, как на постоянном, так и переменном токах. Квантованное напряжение не ограничено существующей технологией и может возрастать с увеличением числа контактов, что возможно благодаря использованию подложек с несколькими бикристал-

лическими границами, а также увеличению площади подложек. Предложенный квазиоптический метод синхронизации цепочек джозефсоновских контактов может быть также применен как для создания генераторов, так и детекторов электромагнитного излучения на частотах вплоть до терагерцового диапазона волн. Использование этого метода для синхронизации цепочек контактов из низкотемпературных сверхпроводников позволит существенно упростить существующую технологию изготовления схем из них и увеличить частоту облучения. В **разделе 4.3** главы 4 сформулированы краткие выводы.

В **главе 5** описана аппаратура, разработанная для апробации использования когерентно осциллирующих цепочек из джозефсоновских ВТСП контактов в квантовых эталонах вольта. Конкурентоспособными с полупроводниковыми эталонами на стабилитронах могут стать приборы с встроенными микросхемами на джозефсоновских ВТСП контактах с азотным уровнем охлаждения. Они должны иметь выходные напряжения от 0 до 10 В с относительной неопределённостью менее 10^{-7} . В новых джозефсоновских калибраторах будут совмещены функции сегодняшних эталонов и калибраторов напряжения. Таким образом, появление наряду с традиционными джозефсоновскими эталонами приборов с азотным уровнем охлаждения расширит область их применения в квантовой метрологии и радиоизмерительной технике.

В **разделе 5.1** рассмотрены принцип построения эталона напряжения на основе цепочки джозефсоновских контактов из ВТСП, алгоритм работы прибора и его блок схема. В нашем приборе джозефсоновское эталонное напряжение $V_J = 10 \div 100$ мВ преобразовывается в выходное напряжение эталона 0,1 – 10 В с помощью 3-х декадного резистивного делителя напряжения. В схемах сравнения эталонного напряжения с напряжением на отводах делителей используется нановольтметр с собственными шумами менее 1 нВ при постоянной времени $5 \div 10$ сек. Для уменьшения дрейфа ТЭДС резистивные делители напряжения с переключателями, нановольтметр и два источника тока размещаются в термостате. С целью снижения электромагнитных наводок, схемы, гальванически связанные с джозефсоновскими контактами, были окружены металлическим экраном. Сопротивление изоляции между экраном и схемой было порядка 10^{12} Ом.

В **разделе 5.2** приведены параметры основных блоков эталона напряжения, которые включают низкотемпературный зонд с цепочкой джозефсоновских контактов; синтезатор СВЧ или миллиметрового диапазона волн; нановольтметр, используемый в качестве нуль-детектора; делитель напряжения и стабильный источник тока для питания делителей. В автореферате мы опишем параметры разработанного синтезатора миллиметрового диапазона волн. Предложенный прибор состоит из задающего синтезатора сантиметрового диапазона волн, активного умножителя частоты, блоков микропроцессорного управления и питания. На вход умножителя пода-

ётся сигнал в диапазоне частот от 8,5 ГГц до 9,5 ГГц с шагом по частоте 500 Гц. На выходе умножителя мы имеем электромагнитное излучение в диапазоне частот от 68 ГГц до 76 ГГц. Точность и стабильность выходной частоты определяется параметрами опорной частоты 10 МГц. Выходная частота может перестраиваться с шагом 4 кГц, что обеспечивает перестройку джозефсоновского напряжения с шагом 5×10^{-8} . Амплитуда фазовых шумов разработанного прибора не превышает -48 дБс на частоте 2 кГц от несущей частоты. Выходная мощность синтезатора достигает 17 дБм и может регулироваться с минимальным шагом 0,01 дБ. Малые размеры синтезатора $90 \times 45 \times 190$ мм и его вес 0,75 кг сделали этот прибор привлекательным для работы в составе различных джозефсоновских эталонов, использующих цепочки ниобиевых контактов. Синтезатор используется в составе джозефсоновских эталонов с выходными напряжениями 1 В и 10 В в метрологических институтах России, МБМВ, а также метрологических центрах ряда европейских стран, Китая и Сингапура.

В **разделе 5.3** описаны результаты исследования лабораторного макета эталона вольта, построенного на основании разработанной аппаратуры. Для определения точности воспроизведения напряжений 1 В и 10 В было проведено два цикла сличений. В первом цикле выходное напряжение нашего прибора сличалось с напряжением 1 В на цепочке ниобиевых джозефсоновских контактов, входящей в состав эталона напряжения ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Было получено совпадение напряжений с неопределённостью $4,6 \times 10^{-8}$. Далее напряжение 10 В сличалось с выходным напряжением транспортируемой меры напряжения на стабилитроне, аттестованной в Физико-техническом институте Германии, ПТБ, (РТВ, Braunschweig) и было получено совпадение с неопределённостью $3,3 \times 10^{-8}$. Следует отметить, что в процессе этих сличений было проведено 14 циклов измерений. После этого транспортируемая мера напряжения была отправлена в ПТБ, где была проведена её калибровка относительно джозефсоновского эталона напряжения. По возвращении транспортируемой меры было проведено ещё одно сличение с нашим эталоном. В результате этих сличений результаты совпали с неопределённостью $1,8 \times 10^{-8}$. Проведённые исследования показали, что разработанная концепция эталона вольта может обеспечивать воспроизведение единицы напряжения с неопределённостью, ограниченной только собственными шумами стабилитронов. Существенным преимуществом исследованного эталона по сравнению с эталонами на стабилитронах является независимость выходного напряжения новых приборов от температуры, влажности и давления окружающей среды. В **разделе 5.4** главы 5 сформулированы краткие выводы.

В **Заключении** диссертации сформулированы основные результаты:

1. Изучены одиночные шунтированные бикристаллические контакты и исследовано влияние индуктивности шунта на параметры контактов на постоянном и переменном токах. Разработан метод изготовления цепочек бикристаллических шунтированных контактов, устойчивых к термоциклированию и допускающих хранение в обычных лабораторных условиях.
2. Предложен метод синхронизации джозефсоновских контактов, заключающийся в уменьшении разброса их сопротивлений, а также реализована синхронизация внешним электромагнитным полем цепочек контактов из ВТСП с малым разбросом их сопротивлений, но большим разбросом их критических токов.
3. Показана эффективность использования различных передающих линий, а также резонатора поверхностной волны для синхронизации цепочек контактов встроенных в схемы, в которых джозефсоновские контакты включаются последовательно по постоянному току смещения и параллельно по току СВЧ, что облегчает их синхронизацию электромагнитным полем.
4. Впервые проведены прецизионные сличения квантованных напряжений, генерируемых на цепочках джозефсоновских контактов из ВТСП при температуре жидкого азота, и ниобиевых контактах при температуре жидкого гелия. Доказано постоянство джозефсоновской константы в исследованном диапазоне температур с неопределённостью $1,8 \times 10^{-8}$.
5. Развита метод облучения контактов, встроенных в резонатор Фабри-Перо и объяснён механизм синхронизации цепочек джозефсоновских контактов в резонаторе; получено рекордное квантованное напряжение 0,1 В при температуре кипения жидкого азота.
6. Проведённые исследования показали, что предложенная концепция эталона вольта на основе цепочек когерентно осциллирующих джозефсоновских контактов из ВТСП и разработанная оригинальная малогабаритная аппаратура для её реализации обеспечивают воспроизведение единицы напряжения с относительной неопределённостью, ограниченной только собственными шумами стабилитронов. Существенным преимуществом предложенного эталона по сравнению с существующими эталонами на стабилитронах является независимость выходного напряжения новых приборов от температуры, влажности и давления окружающей среды.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- A1. Klushin A. M. Optimization of the coupling of mm wave power to arrays of high-Tc Josephson junctions/ A. M. Klushin, M. He, M. Yu. Levitchev, V. V. Kurin, N Klein // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2008. – V.97 – P.012268 (6 Pages).
- A2. He M. Meandering bicrystal Josephson junction arrays in a hemispherical Fabry–Perot resonator / M. He, A. M. Klushin, N. Klein // *Supercond. Sci. Technol.* – 2007. – V.20. – No.10 – P.413-418.
- A3. He M. Optimization of the bicrystal Josephson junctions and Arrays in a Fabry-Perot Resonator / M. He, A. M. Klushin, S. L. Yan, N. Klein // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2007. – V.17. – No.2. – P.934-937.
- A4. Sosso A. Metrological study of YBCO arrays integrated in a Fabry-Perot resonator / A. Sosso, D. Andreone, V. Lacquaniti, A. M. Klushin, M. He, N. Klein // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2007. – V.17. – No.2. – P.874-877.
- A5. Klushin A. M. Arrays of high-Tc Josephson junctions in mm wave resonator // A. M. Klushin, M. He, S. L. Yan, N. Klein / *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – V.89. – P.232505-232507.
- A6. He M. Characterization of bicrystal Josephson junction arrays embedded in a Fabry-Perot resonator // M. He, T.G. Zhou, L. Ji, X. Zhang, T. Zou, Q.L. Xie, L. Fang, S. L. Yan, A. M. Klushin, N. Klein, A. Dmitriev / *Cryogenics & Superconductivity.* – 2006. – V. Special 2006. – P.54 – 57.
- A7. Klushin A. M. A new millimeter wave synthesizer for Josephson voltage standards/ A. M. Klushin, S. Solve, R. Behr, G. Wende, M. Schubert, A. S. Katkov, R. Otto, Ch. Buchal, V.A. Shumilov // Conference on precision electromagnetic measurements (CPEM'2006), Conference Digest, Torino, Italy, 9-14 July, 2006. – P.368–369.
- A8. Klushin A. M. Bicrystal Josephson Junctions and Arrays in a Fabry-Perot Resonator / A. M. Klushin, D. M. Druzhnov, N. Klein // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2006. – V.43 – P.1155-1158.
- A9. Sosso A. Test for operating conditions for metrological application of HTS Josephson arrays / A. Sosso, D. Andreono, V. Lacquaniti, A. M. Klushin // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2006. – V.43 – P.1370-1372.
- A10. B 4 19617330 DE H 01 L 39/22. Mehrzahl aus in Serie geschalteter, hysteresefreier Josephson-Kontakte Bauelement und Spannungsnormal / Klushin A.M. (Forschungszentrum Jülich GmbH). № 19617330; Заявл. 30.04.96 // *Deutsche Patent und Markenamts.* – 28.04.2006.
- A11. Sosso A. Study and operations conditions of HTS Josephson arrays for metrological applications / A. Sosso, D. Andreono, V. Lacquaniti, R. Carry, A. M. Klushin // *Physica C.* – 2006. – V.435. – P.125-127.
- A12. A. M. Klushin, A. S. Katkov, D. Druzhnov, N. Klein, Progress in the voltage calibrator based on arrays of high-temperature superconductor Josephson junctions // *Proceedings of 6th International Seminar on Electrical Metrology,*

- September 21- 23, Rio de Janeiro, Brazil. – 2005, P. 28-31.
- A13.** Ivanyuta O. M. Microwave detection using Josephson junction arrays integrated in a resonator/ O. M. Ivanyuta, O. V. Prokopenko, V. M. Raksha, A. M. Klushin // *Phys. stat. sol. (c)*. - 2005. – V.2. – No.5. – P.1688–1691.
- A14.** Ivanyuta O. M. The Effect of the external magnetic field on the current-voltage characteristic of HTS Josephson junction arrays / O. M. Ivanyuta, O. V. Prokopenko, Ya. I. Kishenko, V. M. Raksha, A. M. Klushin // *J. Low Temp. Phys.* – 2005. – V.139. – No 1/2 – P.97-102.
- A15.** Klushin A. M. DC voltage calibrator based on arrays of high-temperature superconductor Josephson junctions / A. M. Klushin, A. V. Komkov, V. D. Gelikonova, S. I. Borovitskii, M. Siegel // *IEEE Trans. Meas.* – 2003. – V.52 – No.2. – P.529-532.
- A16.** Klushin A. M. Lumped arrays of shunted bicrystal Josephson junctions / A. M. Klushin, S. Ilin, M. Siegel // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2003. – V.13. – No.2. – P. 606-609.
- A17.** Боровицкий С. И. Метод оценки погрешностей измерения вольтамперных характеристик джозефсоновских контактов / С. И. Боровицкий, В. Д. Геликонова, А. В. Комков, Х. А. Айнитдинов, А. М. Клушин // *ЖТФ*. – 2002. – Т.72. – №11. – С.64-68.
- A18.** Мелков Г. А. Джозефсоновская генерация цепочки джозефсоновских контактов в резонаторе поверхностной волны / Г. А. Мелков, Ю. В. Егоров, А. Н. Иванюта, А. М. Клушин, М. Зигель, Р. Семерад // *Известия высших учебных заведений, Радиоэлектроника*. – 2002. – Т.45. – №7/8. – С.38-45.
- A19.** Klushin A. M. Irradiation of multi-junction Josephson arrays embedded in a surface wave resonator / A. M. Klushin, A. N. Ivanyuta, K. Numssen, G. A. Melkov, M. Siegel // *Physica C*. – 2002. – V.372-376. – P.305-308.
- A20.** Klushin A. M. Microwave performance of bicrystal Josephson junction arrays / A. M. Klushin, V. D. Gelikonova, K. Numssen, S. I. Borovitskii, M. Siegel // *Physica C*. – 2002. – V.372-376. – P.301-304.
- A21.** Klushin A. M. Accurate Measurements of Quantum Voltage Steps on Arrays of Bicrystal Josephson Junctions / A. M. Klushin, R. Behr, K. Numssen, M. Siegel J. Niemeyer // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – V.80. – P.1972-1974.
- A22.** C 2 19606907 DE H 01 L 39/22. Schaltungsanordnung für Spannungsnormale / Klushin A.M. (Forschungszentrum Jülich GmbH). – № 19806907; Заявл. 19.02.98 // *Deutsche Patent und Markenamts*. – 21.02.2002.
- A23.** Heinsohn J.-K. Influence of the magnetic-field orientation on the modulation of the critical current of ramp-type Josephson junctions / J.-K. Heinsohn, R. Dittmann, J. Rodrigues Contreras, E. Goldobin, A. M. Klushin, M. Siegel, D. Hadedorn, R. Pöpel, R. Dolata, F.-Im. Buchholz, J. Niemeyer // *J. Appl. Phys.* – 2001. – V.90 – P.4623-4631.
- A24.** Heinsohn J.-K. Current transport in ramp-type junctions with engineered interface / J.-K. Heinsohn, R. Dittmann, J. Rodrigues Contreras, J. Scherbel,

- A. Klushin, M. Siegel, C. L. Jia, A. Golubov, M. Yu. Kupryanov // *J. Appl. Phys.* – 2001. – V.89 – P.3852-3860.
- A25.** Heinsohn J.-K. Influence of La-doping of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ on transport properties of interface-engineered ramp-edge junctions / J.-K. Heinsohn, R. Dittmann, J. Rodrigues Contreras, J. Scherbel, A. Klushin, M. Siegel // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2001. – V.11. – No.1 – P.795-798.
- A26.** Luine J. A. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ bicrystal grain boundary T_c microstructure / J. A. Luine, A. M. Klushin, V. Z. Kresin // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2001. – V.11. – No.1 – P.426-429.
- A27.** Klushin A. M. Frequency locking of Josephson junctions in a surface wave resonator / A. M. Klushin, E. Goldobin, G. A. Melkov, A. N. Ivanyuta, Y. V. Egorov, K. Numssen, M. Siegel // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 2001. – V.11 – No.1. – P.944-947.
- A28.** Platov K. Yu. Design optimization for microwave coupling of a digital-to-analog converter based on series arrays of high-temperature superconducting Josephson junctions / K. Yu. Platov, A. M. Klushin, M. Yu. Kupriyanov, M. Siegel // *Physica C.* – 2000. – V.350. – P.302-308.
- A29.** Klushin A. M. Integrated microwave circuits for digital-to-analog converters based on high-temperature superconductor Josephson junction arrays / A. M. Klushin, C. Weber, M. Siegel, S. I. Borovitskii, R. K. Starodubrovskii, K. Yu. Platov, M. Yu. Kupriyanov, R. Semerad / *Supercond. Sci. Technol.* – 1999. – V.12. – No.12 – P.704-707.
- A30.** Weber C. R. Coplanar transmission lines with meandering center conductors in Y-Ba-Cu-O/Au bilayers / C. Weber, R. Ono, J. C. Booth, L. Vale, S. Benz, A. M. Klushin, H. Kohlstedt, Ch. Buchal, R. Semerad // *Supercond. Sci. Technol.* – 1999. – V.12 – No.12. – P.998-1000.
- A31.** Weber C. High-temperature Josephson bicrystal junctions and arrays for metrological applications / C. Weber, A. M. Klushin, S. Beuven, A. van der Hardt, H. Kohlstedt, R. Semerad, W. Prusseit // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 1999. – V.9. – No.2. – P.4158-4161.
- A32.** Klushin A. M. New Microwave Circuits for Programmable Voltage Standard on High-Temperature Josephson Junction Arrays / A. M. Klushin, C. Weber, S. I. Borovitskii, H. Kohlstedt, R. K. Starodubrovskii, A. Lauer, I. Wolff // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 1999. – V.9. – No.2. – P.4162-4165.
- A33.** Klushin A. M. Towards a Programmable HTS Josephson Voltage Standard: Recent Results / A. M. Klushin, C. Weber, R. K. Starodubrovskii, A. Lauer, I. Wolff, R. Semerad, H. Kohlstedt // *IEEE Trans. Meas.* – 1999. – V.48. – No.2. – P.274-278.
- A34.** Klushin A. M. Large Critical currents and current steps in shunted bicrystal Josephson junctions at liquid nitrogen temperatures / A. M. Klushin, C. Weber, M. Darula, S. Semerad, W. Prusseit, H. Kohlstedt, A. I. Braginski // *Supercond. Sci. Technol.* – 1998. – V.11. – P.609-613.

- A35. Weber C. Large Shapiro steps and wide junction behaviour in HTS Junctions at nitrogen temperature / C. Weber, A. M. Klushin, M. Darula, R. Semerad, W. Prusseit, H. Kohlstedt // *Appl. Supercond.* – 1998. – V.5. – No.7-12. – P.451-456.
- A36. Klushin A. M. Programmable voltage standards based on HTS Josephson junction arrays / A. M. Klushin, S. I. Borovitskii, C. Weber, E. Sodtke, R. Semerad, W. Prusseit, V. D. Gelikonova, H. Kohlstedt // 3d Europ. Conf. Appl. Supercond. (EUCAS'97), Ed. by H. Rogalla, Inst. Phys. Conf. Ser. No 158, Bristol & Philadelphia. – 1997. – V.1. – P.587-590.
- A37. Айнитдинов Х. А. Преимущество джозефсоновских мостиков при использовании в синхронизованных цепочках для стандарта напряжения / Айнитдинов Х. А., Ефанов Е. И. А. М. Клущин // *Письма в ЖТФ.* – 1997. – Т.23. – №18. – С.62–68.
- A38. Klushin A. M. Comparative Study of Shunted Bicrystal Josephson Junctions / A. M. Klushin, A. A. Golubov, W. Prusseit, H. Kohlstedt // *J. Low Temp. Phys.* – 1997. – V.106. – No 3/4. – P.265-269.
- A39. Klushin A. M. Shunted bicrystal Josephson junctions arrays for voltage standards / Klushin A. M., W. Prusseit, E. Sodtke, S. I. Borovitskii, L. Amatuni, H. Kohlstedt // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – V.69. – P.1634-1636.
- A40. Klushin A. M. External frequency locking in bicrystal Josephson junction arrays / A. M. Klushin, W. Prusseit, E. Sodtke, L. Amatuni, H. Kohlstedt // *Czech. J. Phys.* – 1996. – V.46 – P.1317-1318.
- A41. Amatuni L. Intrinsic emission and mixing processes in high- T_c Josephson junctions / L. Amatuni, V. N. Glyantsev, K. Hermann, A. M. Klushin, O. Harnack, S. Beuven, M. Darula // *Czech. J. Phys.* – 1996. – V.46 – P.1285-1286.
- A42. Kunkel G. Millimetre-wave radiation from arrays of high- T_c Josephson junctions / G. Kunkel, R. Ohno, A. M. Klushin // *Supercond. Sci. Techn.* – 1996. – V.9, P.A1–A4.
- A43. Copetti C. A., Graphoepitaxy of CeO_2 on MgO and its application to the fabrication of 45° grain boundary Josephson junctions of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ / C. A. Copetti, J. Schubert, A. M. Klushin, S. Bauer, W. Zander, Ch. Buchal // *J. Appl. Phys.* – 1995. – V.78. – P.5058-5061.
- A44. Vonderbeck L., Dynamic properties of YBCO Josephson junctions on YSZ bicrystal substrates / L. Vonderbeck, A. M. Klushin, E. Sodtke, M. Siegel, W. Prusseit // *Inst. Phys. Conf. Ser. No 148, Bristol & Philadelphia, 2d Europ. Conf. Appl. Supercond. (EUCAS'95), Ed. by D. Dew-Hughes.* – 1995. – V.2. – P.1271-1274.
- A45. Amatuni L. Josephson self-oscillator mixing experiments on step-edge junctions at millimeter wavelengths / L. Amatuni, L. Vonderbeck, A. M. Klushin, M. Siegel // *Inst. Phys. Conf. Ser. No 148, Bristol & Philadelphia, 2d Europ. Conf. Appl. Supercond. (EUCAS'95), Ed. by D. Dew-Hughes.* – 1995. – V.2. – P. 1685-1688.

- A46.** Vonderbeck L. Investigation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Josephson Junctions on MgO Bicrystal Substrates / L. Vonderbeck C. A. Copetti, A. M. Klushin, G. Kunkel, E. Sodtke, J. Schubert, W. Zander // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* – 1995. – V.5. – P.2176–2179.
- A47.** Ainitdinov Kh. A. Accurate measurements of Shapiro steps in YBCO Josephson junctions/ Kh. A. Ainitdinov, S. I. Borovitskii, V. D. Gelikonova, A. V. Komkov, C. A. Copetti, A. M. Klushin, E. Sodtke, L. Vonderbeck, M. Siegel // 5th Int. Superconductive Electronics Conference (ISEC'95), Extended Abstracts, Nagoya, Japan, September 18-21, 1995. – P.144-146.
- A48.** Akimov A. I. Observations of the Josephson effect in $\text{TlBaCaCuO-TlBaCaCuO}$ Junctions at Temperatures above 100 K / A. I. Akimov, S. I. Borovitskii, V. I. Gatalskaya, V. D. Gelikonova, E. S. Demyanov, A. M. Klushin, L. A. Kurochkin, E. K. Stribuk // *Phys. stat. sol. (a).* - 1989. – V.115. – P.205–207.
- A49.** Акимов А. И. Наблюдение эффекта Джозефсона на контактах $\text{TlBaCaCuO-TlBaCaCuO}$ / А. И. Акимов, Б. Б. Бойко, С. И. Боровицкий, В. И. Гатальская, В. Д. Геликонова, С. Е. Демьянов, А. М. Клушин, Л. А. Курочкин, Е. К. Стрибук // *ФНТ.* – 1989. – Т.15. – №5. – С.535-536.
- A50.** Боровицкий С. И. Исследование ступенек тока на ВАХ контактов Джозефсона YBaCuO-YBaCuO / С. И. Боровицкий, В. Д. Геликонова, Е. С. Демидов, А. М. Клушин, П. В. Павлов // *ЖТФ.* – 1989. – Т.34, №10. – С.191-193.

Цитированная литература

- [1] Josephson B.D. Possible new effects in superconductive tunneling // *Phys. Lett.* – 1962. – V.1. – P.251-253.
- [2] Kleiner R. Superconducting Quantum Interference Devices: State of the Art and Applications / R. Kleiner, D. Koelle, F. Kudwig, J. Clarke // *Proc. IEEE.* – 2004. – V.92. – P.1534–1548.
- [3] Likharev K. K. Ultimate performance of RSFQ logic circuits / K. K. Likharev, O. V. Mukhanov, V. K. Semenov // *IEEE Trans. on Magn.* – 1987. – V.23. – P.759–762.
- [4] D. Gupta, O.A. Mukhanov, “RSFQ circuit components for digital rf receivers”, Abstracts of Applied Supercond. Conf., Houston, USA, August 4-9, 2002, p. 42.
- [5] Gurvitch M., High quality refractory Josephson tunnel junctions utilizing thin aluminium layers / M. Gurvitch, M. A. Washington, H. A. Huggins // *Appl. Phys. Lett.* – 1983. – V.42, No.5. – P.472-474.
- [6] Niemeyer J. Microwave-induced constant-voltage steps at one volt from a series array of Josephson junctions / J. Niemeyer, J. H. Hinken, R. L. Kautz // *Appl. Phys. Lett.* – 1984. – V.45. – P.478–480.

- [7] Hamilton C. Josephson voltage standards /C. Hamilton // *Rev. Scient. Instrum.* – 2000. – V.71. – P.3611-3623
- [8] Bednorz J.-G. Possible high-Tc superconductivity in the Ba-La-Co-O system / J.-G. Bednorz, K.-A. Müller // *Z. Phys. B* – 1986. – V.64. – P.189-193.
- [9] Wu M.K. Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure/ M. K. Wu, J. R. Aschburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, C. Wu. Chu // *Phys. Rev.Lett.* - 1987. – V.58. – P.908–910.
- [10] Куприянов М.Ю. Эффект Джозефсона в высокотемпературных сверхпроводниках и структура на их основе / М.Ю. Куприянов, К.К. Лихарев // *УФН.* – 1990. – Т.160, №5. – С.49-87.
- [11] Chaudhari P. Direct measurements of superconducting properties of single grain boundaries in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ / P. Chaudhari, J. Mannhart, D. Dimos, C.C. Tsuei, C.C. Chi, M.M. Oprysko, M. Scheuermann / *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – V.60. – P.1653-1655.
- [12] Suzuki H. Artificial YBCO grain boundary junctions on SrTiO₃ and Si bicrystals / H. Suzuki, H. Kurosawa, J. Chen, Y. Hirotsu, K. Nakajima, T. Yamashita, H. Myorens, Y. Osaka // *Supercond. Sci. Technol.* – 1991. – V.4. – P.479-481.
- [13] Divin Yu. Ya. Josephson oscillations and noise temperatures in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ grain-boundary junctions / Yu.Ya. Divin, J. Mygind, N.F. Pedersen, P. Chaudhari // *Appl. Phys. Lett.* ... – 1992. – V.61. – P.3053-3055.
- [14] Катков А.С. Метрологические характеристики тонкоплёночных YBCO джозефсоновских контактов на бикристаллических подложках // А.С. Катков, С.В. Козырев, В.И. Крыжимовский, С.И. Красносвободцев, А.Г. Маресов, О.В.Снигирев / *Письма ЖТФ* – 1993. – Т.19. – №5. – С.70-73.
- [15] Andreev A. V. Josephson effects in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ grain-boundary junctions on (001) NdGaO₃ bicrystal substrates / A. V. Andreev, Yu. Ya. Divin, V. N. Gubankov, I. M. Kotelyanskii, V. B. Kravchenko, S. G. Zybtev, E. A. Stepantsov // *Physica C.* – 1994. – V.226. – P.17–22.
- [16] Лихарев К. К. Системы с джозефсоновскими контактами / К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих – М.: МГУ, 1978. – 446 с.
- [17] Simon R. W. Progress towards a YBCO circuits process / R. W. Simon, J. F. Burch, K. P. Daly, W. D. Dozier, R Hu, A. E. Lee, J. A. Luine, H. M. Manasevit, C. E. Platt, S. M. Schwarzbeck, D. St. John, M. S. Wire, M. J. Zani // *Science and Technology of Thin-Film Superconductors*, R. D. McConnell, R. Noufi (eds.), Plenum Press, N. Y. – 1990. – P.549-558.
- [18] Kunkel G. Mutual phase-locking of ten $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ step-edge Josephson junctions up to 45 K / G- Kunkel, R. Ono // *Appl. Phys. Lett.* – 1996. – V.69. – P.1960–1962.
- [19] Char K. Extension of the bi-epitaxial Josephson junctions process to various substrates / K. Char, M.S. Colclough, L.P. Lee, G. Zaharchuk // *Appl. Phys. Lett.* – 1991. – V.59. – P.2177–2179.

- [20] Moeckly B.H. Properties of interface-engineered high Tc Josephson junctions / B. H. Moeckly and K. Char // *Appl. Phys. Lett.* – 1997. – V.71. – P.2526–2528.
- [21] Berberich P. Homogeneous high quality YBa₂Cu₃O₇ films on 3" and 4" substrates / P. Berberich, B. Utz, W. Prusseit, H. Kinder // *Physica C.* – 1994. – V.219. – P.497–504.
- [22] Ekin J.W. In situ noble metal YBa₂Cu₃O₇ thin-film contacts / J.W. Ekin, S. E. Russek, C.C. Clickner, B. Jeanneret, // *Appl. Phys. Lett.* – 1993. – V.62. – P.369–371.
- [23] Hilgenkamp H. Grain boundaries in high-Tc superconductors / H. Hilgenkamp, J. Mannhart // *Rev. Mod. Phys.* – 2002. – V.74. – P.485–549.
- [24] Zhao R. Environmental degradation of YBa₂Cu₃O_{7-x}. A descriptive and predictive model / R. Zhao, S. Myhra // *Physica C.* 1994. – V.230 – С.75-81.
- [25] Айнитдинов Х. А. Нестационарный эффект Джозефсона на точечном контакте при высоких напряжениях / Х. А. Айнитдинов, С. И. Боровицкий, Л. Л. Малиновский // *ЖЭТФ.* – 1979. – Т.76 – №5. – С.1342-1350.
- [26] Боровицкий С. И. Увеличение рабочего напряжения на цепочках джозеф-соновских контактов / С. И. Боровицкий, А. М. Клушин, Т. Б. Коротина, А. Е. Парийский, С. К. Хорошев, П. А. Шишарин // *Письма в ЖТФ.* – 1985. – Т.11 – №11. – С.663-667.
- [27] Гудков А.Л. Гистерезис на вольтамперных характеристиках цепочек торцевых переходов Джозефсона под действием СВЧ-излучения / А.Л. Гудков, И.Я. Краснополин, В.Н. Лаптев, В.И. Махов // *Письма в ЖТФ.* – 1990. – Т.16 – №19. – С.1-6.
- [28] Hansma P. K. Externally shunted Josephson junctions: generalized weak links / P. K. Hansma, G. I. Rochlin, J. N. Sweet // *Phys. Rev.* – 1971. – V.4 – pp. 3003-3014.
- [29] Niemeyer J. Josephson arrays for dc and ac metrology // *Supercond. Sci. Techn.* – 2000. – V.13, P.546–550.
- [30] Melkov G.A. HTS surface wave resonators / G.A. Melkov, Y.V. Egorov, O.M. Ivanjuta, V.Y. Malishev, H.K. Zeng, K.H. Wu, J.Y. Juang // *J. Superconductivity* – 2000. – V.13. – N.1 – P.95-100.

Клушин Александр Моисеевич

**КОГЕРЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПОЧКАХ
ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ КОНТАКТОВ ИЗ ВЫСОКОТЕМПЕРА-
ТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

**Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук**

**Подписано к печати 21 мая 2009
Тираж 100 экз.**

**Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН,
603950, Нижний Новгород, ГСП-105**