

На правах рукописи



Кинев Николай Вадимович

**Генерация и прием ТГц излучения
с использованием сверхпроводниковых
интегральных устройств**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Кошелец Валерий Павлович

Официальные оппоненты: **Корнев Виктор Константинович**
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры атомной физики,
физики плазмы и микроэлектроники
физического факультета
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Смирнов Константин Владимирович
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей и
экспериментальной физики факультета
физики и информационных технологий
Московского педагогического
государственного университета

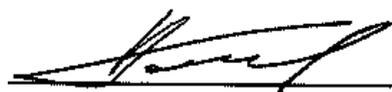
Ведущая организация: **Институт прикладной физики РАН,**
г. Нижний Новгород

Защита состоится 8 февраля 2013г. в 11:30 на заседании диссертационного совета Д.002.231.02 при ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

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

Автореферат разослан 26 декабря 2012 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д.002.231.02 при ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН
доктор физико-математических наук



Потапов Александр Алексеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время большой научный и практический интерес имеют генераторы и приёмники терагерцового излучения. Такие устройства особенно востребованы в радиоастрономии и астрофизике. Причина этого состоит в том, что подавляющая часть электромагнитного излучения в космическом пространстве лежит в области 300 ГГц – 30 ТГц (длина волны 0,01 – 1 мм). Межзвёздное вещество, космическая пыль, молекулярный газ в галактиках, включая наш Млечный Путь, а также реликтовое излучение - всё это имеет выраженный пик излучения в дальней ИК- и субмм области. Следует отметить, что для исследования космического излучения требуется высокая чувствительность приемных устройств. Так, например, межзвёздная пыль излучает как чёрное тело с температурой от 5 до 50 К, а облака из молекулярного газа имеют температуру от 10 до 200 К, их наиболее яркие линии излучения лежат в терагерцовом диапазоне.

Приемники ТГц диапазона находят применение также в миссиях по исследованию атмосферы Земли, поскольку в атмосфере содержится много веществ, в том числе ответственных за разрушение озонового слоя, молекулы которых имеют линии излучения (колебательно-вращательные переходы) в данной области. Так, в рамках международного проекта TELIS были совершены несколько научных запусков спектрометра для дистанционного исследования атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 450 - 650 ГГц в режиме наклонного сканирования. Кроме того, в качестве направлений использования таких приборов следует отметить следующие области:

- медицина - неинвазивная диагностика ряда болезней методом спектрального анализа состава выдыхаемого воздуха;
- безопасность – выявление и определение взрывчатых, отравляющих и других опасных веществ, а также обнаружение предметов даже сквозь оптически непрозрачные оболочки;
- охрана окружающей среды – мониторинг и определение состава загрязнения среды обитания человека продуктами его жизнедеятельности на уровне предельно допустимых концентраций;
- химия и биология – исследование состава и поведения сложных химических соединений, в том числе и белков;

- физика конденсированного состояния и электроника – исследование состава и характеристик новых объектов и структур, в том числе наноматериалов и наноструктур.

Время накопления для приема сверхслабых сигналов и обнаружения сверхмалых концентраций веществ пропорционально квадрату шумовой температуры используемого приемника. Детекторы и приемники ТГц излучения на основе туннельных джозефсоновских структур типа сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) являются наиболее чувствительными из всех существующих в области до 1 ТГц [1]. Это объясняется чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводников, а также криогенной рабочей температурой (4.2 К и ниже) и, следовательно, предельно низкими собственными шумами. Высокочувствительными сверхпроводниковыми устройствами в области выше ~700 ГГц являются также болометры на основе разогрева электронного газа (НЕВ), которые могут использоваться как в качестве прямых, так и в качестве гетеродинных детекторов в ТГц диапазоне. Сверхпроводниковые гетеродинные приемники терагерцового излучения активно используются во многих наземных и космических радиоастрономических миссиях (ALMA, Hershel, др.), а также в проектах по исследованию атмосферы (TELIS).

В терагерцовой области частот (выше 300 ГГц) наблюдается существенное поглощение сигнала парами воды в атмосфере. Поэтому все приемники и радиотелескопы располагаются на значительной высоте или устанавливаются на борту специальных аэростатов, самолетов и спутников. В полетных миссиях помимо чувствительности прибора огромное значение играют его габариты, вес и энергопотребление. Именно эти параметры обуславливают возможность и целесообразность использования того или иного прибора. Следует отметить, что для гетеродинного детектирования требуются малошумящие и легко перестраиваемые генераторы принимаемого диапазона. Большинство приемников ТГц диапазона имеют в качестве гетеродина внешний источник. В частности, генераторы на базе лампы обратной волны (ЛОВ), традиционно применявшиеся в качестве гетеродина в лабораториях и на радиотелескопах, обладают очень большой массой из-за необходимости использовать сильный постоянный магнит и высоковольтный источник питания. Часто в качестве гетеродина используют квантово-каскадный (полупроводниковый) или газовый лазер (особенно крупногабаритный и тяжелый), а также фотонные генераторы, работающие на разностной частоте двух лазеров. Такие устройства являются весьма сложными в производстве и, как правило, дорогостоящими, поэтому отсутствие компактных, легко

перестраиваемых и недорогих источников гетеродина в ТГц области является серьезной проблемой. За последние несколько лет существенно развиты также полупроводниковые ТГц умножители на основе квантовых полупроводниковых сверхрешеток и диодов Шоттки, обладающие рядом преимуществ по сравнению с перечисленными. Такие умножители работают совместно с источниками до 100 ГГц (серийно выпускаемые синтезаторы либо диоды Ганна), давая сигнал на выходе до 2,7 ТГц.

Одним из наиболее перспективных генераторов ТГц диапазона, интегрируемых вместе с детектором на одну микросхему, является генератор на основе распределённого джозефсоновского перехода (РДП). Такой генератор является очень широкополосным (от 300 до 700 ГГц), а его интеграция на одной микросхеме с детектирующим элементом позволяет избежать использования классических генераторов с большим размером, весом и стоимостью. Идея совмещения на одной микросхеме генератора и СИС-смесителя была реализована учёными ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в сверхпроводниковом интегральном приемнике (СИП) диапазона 450-700 ГГц. Успех полетных миссий СИП в 2009-2011 г. в рамках международного проекта TELIS показал высокую перспективность данного прибора в целом ряде других научных задач, где необходима работа приемника как на более низких, так и более высоких частотах.

Одной из сложностей использования генераторов на основе РДП является наличие резонансного режима работы (ступени Фиске), при котором не всегда удаётся реализовать достаточно узкую линию генерации во всей рабочей области. Такой режим работы реализуется на частотах до 450 ГГц для переходов на основе структур Nb/AlO_x/Nb, и частотах до 600 ГГц - для структур Nb/AlN/NbN, однако основные трудности в реализации непрерывной перестройки проявляются на частотах до 350 ГГц, где затухание в переходе мало и ступени Фиске практически вертикальны. Поэтому требуется разработка РДП-генераторов, оптимизированных для работы в резонансном режиме. Следует также отметить отсутствие в настоящий момент стройной теории, позволяющей численно рассчитать ширину линии излучения генератора. Существует классическое выражение для сосредоточенного перехода, которое не учитывает неоднородность распределения тока через переход, влияние флуктуаций в канале линии управления магнитным полем, а также внешние низкочастотные флуктуации тока, и потому плохо описывает реальную ширину линии генерации. Недавно была предложена эмпирическая модель для вычисления ширины линии излучения, которая учитывает обозначенные факторы и демонстрирует хорошее согласие с экспериментом, однако она не

описывает природы физических механизмов уширения линии по сравнению с классической моделью.

Для повышения рабочего частотного диапазона интегрального приемника перспективным является создание СИП с детектором на основе электронного разогрева (НЕВ). НЕВ-смеситель успешно работает до нескольких ТГц, в то время как рабочая полоса СИС-смесителя ограничена щелевым напряжением. Следует отметить, что предельная реализуемая частота такого приемника будет определяться свойствами РДП, и в настоящий момент ведутся работы по разработке РДП на основе электродов NbTiN, что позволит повысить частоту генерации до частот порядка 1 ТГц и выше.

Другим перспективным типом генераторов, предложенным сравнительно недавно, являются мезоструктуры из ВТСП, представляющие собой большой массив (порядка 1000) последовательно соединённых джозефсоновских переходов. Работы в этом направлении являются пионерскими, такие генераторы активно исследуются в настоящий момент, но ещё не успели найти практического применения. Это обусловлено, в частности, тем, что до сих пор не был экспериментально измерен спектр излучения такого генератора. Поэтому, наиболее важным, в первую очередь, является исследование линии генерации такой структуры, что послужит фундаментом для построения теории и создания практических устройств в дальнейшем.

Цели работы

Целями настоящей диссертационной работы являются разработка и исследование перспективных типов генераторов терагерцового диапазона, разработка лабораторных средств и методик исследования сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), а также исследование нового типа СИП со смесителем на эффекте разогрева электронного газа. Конкретные цели работы перечислены ниже:

- Разработка и апробация лабораторного терагерцового Фурье-спектрометра для исследования частотной зависимости чувствительности детектора в составе СИП в режиме прямого детектирования.
- Разработка ТГц генератора на основе РДП с возможностью непрерывной перестройки частоты в частотном диапазоне до 400 ГГц, в котором реализован резонансный режим работы (малое затухание). Комплексное исследование режимов работы генераторов на основе РДП, выполненных на основе туннельных структур Nb/AlO_x/Nb, Nb/AlN/NbN с различными электрофизическими параметрами (топология, размеры, плотность критического тока через переход).

- Исследование ширины линии генерации РДП в различных режимах работы, апробация моделей расчета ширины линии.
- Исследование процессов тепловыделения в криогенной системе СИП и их влияние на функционирование приемника. Разработка методов понижения теплового влияния на работу устройства.
- Разработка и исследование сверхпроводникового интегрального приемника с генератором гетеродина на основе РДП, где в качестве смесителя использован сверхпроводниковый болометр на основе электронного разогрева.
- Исследование свойств и спектральных характеристик ТГц генератора на основе слоистой ВТСП-мезоструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ при помощи СИП.

Научная новизна

1. Найден условия реализации генератора гетеродина на основе РДП с возможностью непрерывной перестройки в диапазоне 250-400 ГГц, где генератор работает в резонансном режиме.
2. Проведено исследование зависимости дифференциального сопротивления РДП по току линии управления магнитным полем в резонансном режиме, а также в режиме флэкс-флоу, в зависимости от напряжения (при постоянном токе) и от тока (при постоянно напряжении). Определены эмпирические параметры, характеризующие влияние дифференциального сопротивления по току линии управления магнитным полем на ширину линии излучения, для ее точного численного расчёта.
3. Показана принципиальная возможность интеграции генератора гетеродина на основе РДП на одной микросхеме со смесителем на основе болометра на электронном разогреве; мощность РДП может регулироваться в широких пределах, обеспечивая эффективную накачку смесителя.
4. Впервые измерен спектр излучения джозефсоновского генератора на основе ВТСП мезоструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, установлено принципиальное различие спектральных характеристик генератора в различных областях работы (при низких токах на участке с положительным дифференциальным сопротивлением и высоких токах на участке с отрицательным дифференциальным сопротивлением). Показано, что линия излучения в режиме образования «горячего пятна» с высокой степенью точности имеет лоренцеву форму. Выявлена необычная зависимость спектральных характеристик от положения рабочей точки на ВАХ, которая не описывается ни одной из существующих на данный момент моделей и теорий.

Практическая ценность работы

1. Созданный лабораторный Фурье-спектрометр позволяет проводить исследования частотной зависимости чувствительности любых ТГц детекторов в области частот от $\sim 0,1$ до 30 ТГц и частотным разрешением лучше $1,5$ ГГц.
2. Возможность непрерывной перестройки частоты генератора на основе РДП в резонансной области $250 - 400$ ГГц (ступени Фиске) расширяет реализуемый частотный диапазон сверхпроводникового интегрального приемника, который в настоящее время успешно функционирует в области $450 - 650$ ГГц. Это открывает возможность его использования в ряде новых проектов для радиоастрономии и систем безопасности.
3. Новая методика установления контактов между элементами СИП и платой смещения позволяет уменьшить в 3-4 раза контактное сопротивление и, таким образом, заметно понижает тепловыделение в системе, устраняя ряд сложностей, возникающих при перегреве системы.
4. Успешная демонстрация работы СИП на основе НЕВ-смесителя открывает возможности существенного повышения рабочей частоты интегрального приемника, поскольку чувствительность НЕВ практически не зависит от частоты вплоть до нескольких ТГц. Реализованный уровень накачки НЕВ-смесителя мощностью от РДП достаточен для работы устройства в качестве ТГц приемника. Частотное ограничение такого приемника накладывается возможностями гетеродина, рабочий диапазон которого в настоящий момент составляет до 730 ГГц.
5. Продемонстрирована возможность работы компактных широкополосных ТГц генераторов на основе ВТСП-мезоструктур с уровнем мощности более 1 мкВт, рабочим диапазоном $450-750$ ГГц и непрерывной перестройкой частоты во всей полосе. Показана принципиальная возможность фазовой синхронизации таких генераторов, что крайне важно для ряда практических задач.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Для реализации непрерывной перестройки частоты РДП с характерным значением $R_n S$ порядка $40-50$ Ом·мкм² в резонансном режиме для структур Nb/AlO_x/Nb требуется длина генератора более 600 мкм, а для структур Nb/AlN/NbN – более 400 мкм. Максимальная длина, при которой возможна реализация резонансного режима, составляет порядка 750 мкм для структур Nb/AlO_x/Nb и порядка 870 мкм для структур Nb-AlN-NbN.

2. Более 90% вклада в тепловыделение в системе сверхпроводящего интегрального приемника (а следовательно и ряде других подобных устройств) вносит контактное сопротивление между площадкой микросхемы и проволокой для обеспечения электрического контакта с системой управления. При применении модернизированной методики установления контактов вклад в тепловыделение контактного сопротивления уменьшается в 4 раза.
3. Болومتر на эффекте электронного разогрева (НЕВ) может быть интегрирован с гетеродином на основе РДП на одной микросхеме. При этом возможна эффективная накачка НЕВ-смесителя в частотном диапазоне $450 - 620 \text{ ГГц}$ мощностью от РДП, достаточной для работы устройства в качестве ТГц приемника. Чувствительность такого прибора в данном диапазоне (шумовая температура порядка 1000 К) соответствует характеристикам существующих ТГц приемников на основе НЕВ-смесителя с внешним гетеродином.
4. Ширина линии излучения генератора на основе ВТСП-мезоструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ составляет от 6 до более 500 МГц в различных режимах работы; диапазон генерации составляет $450-736 \text{ ГГц}$. Форма линии излучения с высокой степенью точности является лоренцевой. Линия излучения такого генератора может быть частотно стабилизирована и фазово синхронизирована. Генератор может быть применен для измерения линий поглощения газов.

Личный вклад автора

Работы были выполнены диссертантом в соавторстве с сотрудниками лаборатории сверхпроводящих устройств для приема и обработки информации ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и Московского государственного педагогического университета (МПГУ, г. Москва), а также Нанкинского университета (г. Нанкин, Китай). Для проведения работ частично были использованы устройства и материалы, любезно изготовленные и предоставленные коллегами из Нанкинского Университета (на технологической базе Национального института материаловедения, г. Цукуба, Япония), а также коллегами из МПГУ.

Автор принимал участие в разработке экспериментальных образцов генераторов на основе распределенных джозефсоновских структур, провел комплексное многостороннее экспериментальное исследование и дальнейший анализ таких генераторов различных модификаций (тип структуры, геометрия,

плотность критического тока), изготовленных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Разработка и настройка лабораторного Фурье-спектрометра была проведена автором совместно с М. Ю. Торгашиным (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН). При исследовании тепловыделения в системе сверхпроводникового интегрального приемника были использованы технологические навыки по осуществлению ультразвуковой сварки инженера Института космических исследований Нидерландов Leo de Jong, г. Гронинген. Цикл экспериментов по исследованию спектральных характеристик генератора на основе ВТСП-мезоструктуры проведен диссертантом совместно с научным руководителем В.П. Кошельцом и коллегой из Китая проф. Huabing Wang, г. Нанкин.

Комплексное исследование характеристик интегрального приемника на эффекте электронного разогрева проведены автором совместно с Р. В. Ожеговым (МПУ).

Апробация работы

Результаты исследований, проведенных соискателем, представлены в 23 докладах на научных международных и российских конференциях, в том числе:

- 11th International Superconductive Electronics Conference (ISEC-2007), Washington D.C., USA, June 2007;
- 17th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-2007), Pasadena, CA, USA, March 2007;
- 19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-2008), Groningen, the Netherlands, April 2008;
- Applied Superconductivity Conference (ASC-2008), Chicago, USA, August 2008;
- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2009;
- International Conference on Superconductive Electronics “EuroFlux-2009: from devices to circuits and systems”, Avignon, France, September 20-23, 2009;
- 10th Workshop on Submm-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Wu-Xi, China, November 15-18, 2009;
- 21st International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-2010), Oxford, Great Britain, 23-25 March 2010;
- 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome, 2010.
- Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010»

- 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), Houston, Texas, USA, October 2-7 2011;
- 2-ая Международная научная конференция «Прикладная сверхпроводимость - 2011», Москва, 4 марта 2011;
- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2011;
- 1st International Conference on Quantum Technologies (ICQT), Moscow, July 2011;
- Superconductivity Centennial Conference "EUCAS-ISEC-ICMC 2011", Den Haag, the Netherlands, September 2011;
- 1ая Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости (НКПС-1), 6-8 декабря 2011;
- XV международный симпозиум «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 2011
- 37th IRMMW-THz, Wollongong, Australia, September 23-28, 2012.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 26 работах, из них – 11 статей в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, а также в 15 докладах на научных международных и российских конференциях с публикацией расширенных тезисов. Общий объём опубликованных по теме диссертации работ составил 47 мп. страниц.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 139 страницах, содержит 50 рисунков, 6 таблиц и список цитируемой литературы из 76 источников.

Содержание работы

В **первой главе (введении)** обоснована актуальность темы диссертации и определены её цели. Сформулированы научная новизна и практическая ценность работы. Дан краткий обзор областей применения генераторов и чувствительных приемников терагерцового (ТГц) диапазона на основе сверхпроводниковых структур. К таким приемникам относятся, в частности, устройства на квазичастичной нелинейности джозефсоновских туннельных структур типа СИС (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник), устройства на

эффекте разогрева электронного газа в тонкой пленке из сверхпроводника (НЕВ), а также ряд сверхпроводниковых устройств на основе других эффектов.

Для успешного функционирования высокочувствительных когерентных приемников ТГц диапазона (в отличие от прямых детекторов) необходимым является наличие достаточно мощных и надежных ТГц генераторов с высокой стабильностью частоты и достаточно малой шириной линии излучения для возможности фазовой стабилизации сигнала. Дан обзор существующих в мире на данный момент генераторов ТГц диапазона, успешно применяющихся в тех или иных областях, описаны их преимущества и недостатки. Дано краткое описание одного из ключевых элементов исследования данной работы - генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода (РДП), интегрируемого вместе с приемным элементом на одну микросхему. Рассмотрен другой перспективный тип сверхпроводникового ТГц генератора на основе мезоструктуры из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), кристалл которого естественным образом представляет собой систему из множества последовательных джозефсоновских переходов.

Описана концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) диапазона 450-650 ГГц, объединяющего на одной микросхеме приемную антенну, СИС-смеситель, РДП и гармонический смеситель, используемый для фазовой синхронизации РДП. Кратко представлены успехи научной миссии TELIS (Terahertz Limb Sounder) по исследованию спектрального состава атмосферы при помощи СИП. Обоснована потребность расширения рабочего диапазона СИП как в область более низких (200-450 ГГц), так в область более высоких (>700 ГГц) частот. Для успешной работы СИП в области более низких частот необходима разработка гетеродина на основе РДП с возможностью непрерывной перестройки частоты в резонансном режиме работы. Для расширения рабочего диапазона в сторону высоких частот перспективно использование в качестве смесителя не СИС-перехода, частота которого ограничена щелевым напряжением, а НЕВ-смесителя, успешно работающего до нескольких ТГц. Обозначена возможность создания и апробации СИП на основе НЕВ-смесителя. Обсуждается возможность применения СИП для исследования спектральных характеристик внешних ТГц генераторов, таких как генератор на основе ВТСП-мезоструктур.

В конце главы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** описаны основные экспериментальные методики, использованные в рамках диссертационной работы. В частности, описан метод измерения ширины линии излучения генераторов на основе РДП, метод

измерения дифференциальных сопротивлений РДП по току смещения и току линии управления магнитным полем с использованием СВЧ-измерений спектральных характеристик генератора, метод измерения частотной зависимости прямого отклика ТГц детектора, метод измерения шумовой температуры сверхпроводникового интегрального приемника.

Для измерения ширины линии излучения генератора на основе РДП в заданном частотном диапазоне используется интегральная схема, включающая в себя исследуемый генератор, СИС-смеситель и согласующий СВЧ-тракт между генератором и смесителем, рассчитанный на заданный частотный диапазон. СИС-смеситель используется для понижения частоты РДП (совместно с опорным синтезатором) до диапазона промежуточной частоты (ПЧ) $0-800$ МГц, спектр которой анализируется при помощи комнатного спектроанализатора. Попутно с измерением спектра и ширины линии генерации производится измерение дифференциальных сопротивлений РДП.

Частотная зависимость прямого отклика ТГц детекторов исследуется при помощи специально разработанного и настроенного Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона. Описаны процессы разработки и настройки такого Фурье-спектрометра, а также его характеристики. Шумовая температура приемника исследуется при помощи стандартной лабораторной методики измерения величины Y -factor, которая определяется как отношение уровня мощности сигнала ПЧ на выходе детектора, измеренного в режиме переключения «теплой» ($T = 295$ К) и «холодной» ($T = 80$ К) нагрузок.

В **третьей главе** изложены результаты комплексного исследования работы генератора на основе РДП. Описаны физические принципы излучения такого генератора, его основные параметры и характеристики, изучены режимы работы.

Генератор ТГц излучения на основе РДП имеет два различных режима работы. При напряжениях, меньших «граничного» V_{JSC} , реализован резонансный режим работы генератора (ступени Фиске), в то время как при $V > V_{JSC}$ имеет место режим вязкого течения вихрей (флакс-флоу) из-за роста затухания в переходе благодаря эффекту самонакачки [2] (см. рис. 1). Граничное напряжение для большинства исследованных образцов генератора равнялось $V_g/3$, похожие особенности наблюдались и при $V_g/5$, где V_g – щелевое напряжение СИС-перехода. Резонансный режим в РДП на основе Nb/AlO_x/Nb реализуется на частотах ниже 450 ГГц, а для структур Nb/AlN/NbN – на частотах до 600 ГГц. Особое внимание в исследовании было уделено резонансному режиму работы, поскольку именно в нем возникают проблемы с реализацией непрерывной перестройки частоты.

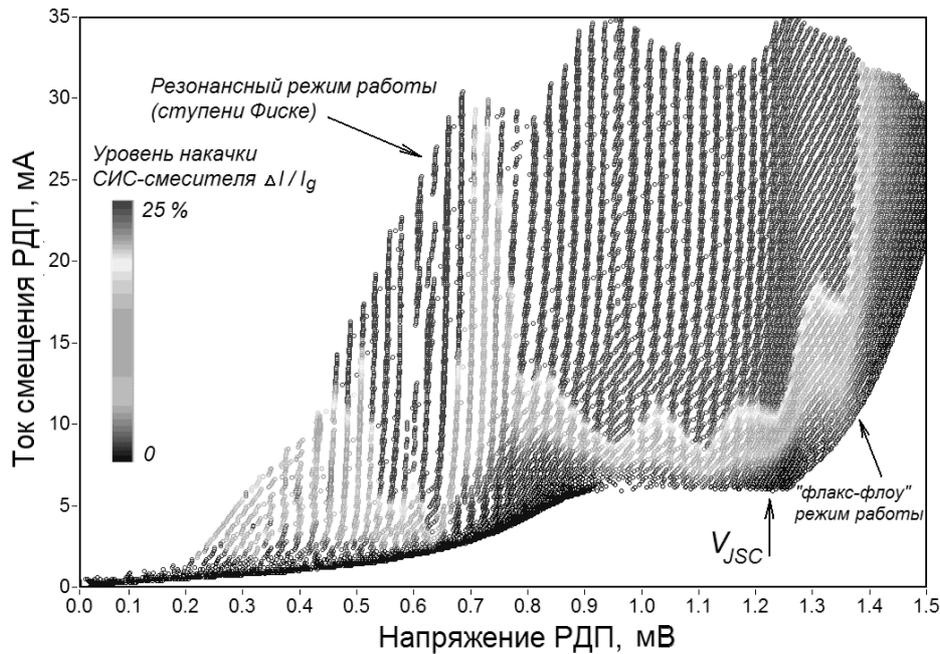


Рис. 1. Семейство ВАХ РДП, измеренное при разных значениях магнитного поля.

Расстояние между ступенями как собственными модами РДП в качестве резонатора определяется скоростью распространения волны $f_n = n \cdot c_{sw} / 2L$, а частота пересчитывается в напряжение при помощи соотношения Джозефсона. Расстояние между ступенями получается равным [3]

$$\Delta V_{Fiske} = \frac{h}{2e} \Delta f_{Fiske} = \frac{h}{2e} \frac{c_{sw}}{2L} \equiv \frac{\hbar}{2e} \frac{\pi c_{sw}}{L} \quad (1)$$

Было проведено исследование множества РДП различных модификаций с целью определения оптимальных параметров для работы в резонансном режиме, а также с целью выявления повторяемости характеристик для образцов, изготовленных в различных циклах при разных технологических условиях. Таким образом, были исследованы образцы различной геометрии (длина, ширина перехода, величина перекрытия верхнего и нижнего электродов), различной структуры (Nb/AlO_x/Nb, Nb/AlN/NbN), различной плотности критического тока через переход, а также экранированные переходы металлизированным слоем над верхним электродом. Длина исследованных образцов РДП менялась от 100 мкм до 1400 мкм, характерная плотность критического тока j_c составляла 4-10 кА/см², что соответствует джозефсоновской глубине $\lambda_J = 8-3$ мкм.

Были определены оптимальные параметры РДП для реализации непрерывной перестройки частоты в резонансном режиме. При данных характерных плотностях критического тока оптимальная длина для РДП на основе Nb/AlO_x/Nb составила 600-700 мкм, в то время как для структуры Nb/AlN/NbN – 400 мкм. Для анализа полученных результатов были проведены

теоретические оценки расстояния между ступенями Фиске (см. выражение (1)), а также некоторой «граничной» длины РДП, при котором резонансный режим исчезает при реализованных параметрах затухания электромагнитной волны в переходе α [4]:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\beta_c}}, \quad \beta_c = \frac{2\pi}{\Phi_0} I_c R_n^2 C, \quad (2)$$

здесь β_c – так называемый параметр Мак-Камбера. Для реализации резонансного режима должно выполняться условие $\alpha l = < 1$ [2], где l – длина РДП, нормированная на λ_J . Значение параметра α растет скачком при напряжении самонакачки V_{JSC} и рассчитывается из экспериментальной формы ВАХ. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов. На рис. 2 и 3 продемонстрирован результат сравнения экспериментальных и теоретических результатов, получено их хорошее согласие.

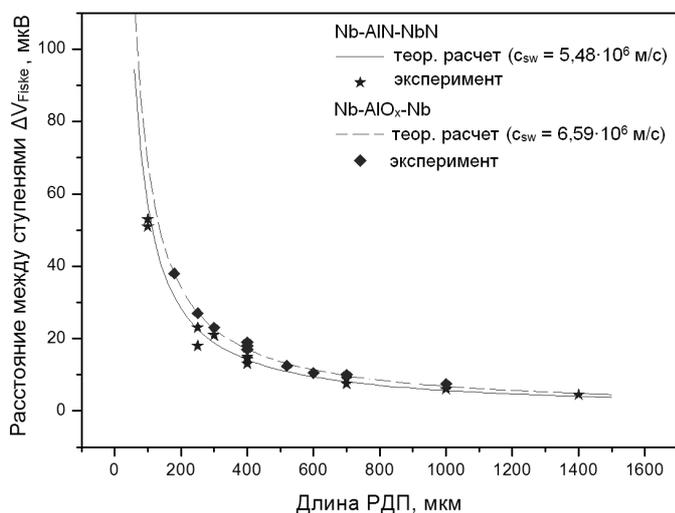


Рис. 2. Зависимость расстояния между ступенями Фиске от длины РДП.

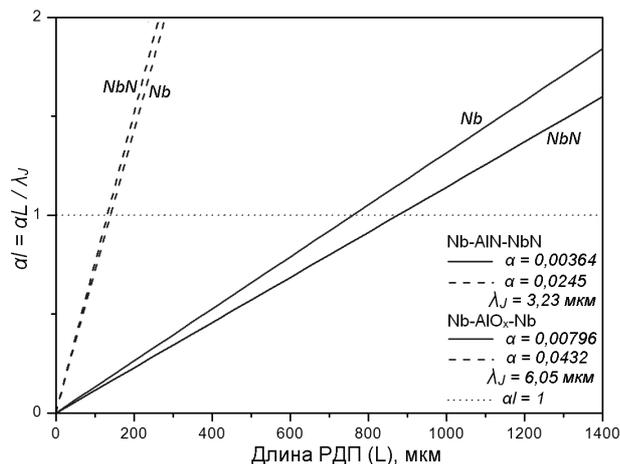


Рис. 3. Зависимость параметра αl от длины РДП при различных значениях α , реализуемых в различных режимах работы.

Ширина линии генерации РДП в классической модели зависит от дифференциального сопротивления (R_d) перехода в рабочей точке, а также от спектральной плотности высокочастотных флуктуаций тока через переход $S_i(0)$, которые преобразуются вниз по частоте в результате перемножения с сигналом джозефсоновской генерации [4]. Плотность таких флуктуаций является нелинейной суперпозицией теплового и дробового шумов и зависит от вольт-амперных параметров перехода (рабочей точки) и температуры. Однако, многочисленные исследования показали, что помимо дифференциального сопротивления R_d как такового (по току смещения) в ширину линии генерации дает также вклад дифференциальное сопротивление по току через линию

управления магнитным полем R_d^{CL} . Поэтому столь важно знать зависимости как первого, так и второго дифференциальных сопротивлений перехода от положения рабочей точки в различных рабочих областях. Проведены исследования дифференциальных сопротивлений R_d и R_d^{CL} от тока при постоянном напряжении (см. рис. 4), от напряжения при постоянном токе как в области ступеней Фиске, так и в области флак-флоу, а также в пределах одной ступени Фиске. Апробирована модель ширины линии излучения, учитывающая также низкочастотные внешние флуктуации тока, вызванные неидеальностью измерительной системы и неотъемлемо присутствующие в системе:

$$\delta f = \left(\frac{2\pi}{\Phi_0} \right)^2 \cdot S_i(0) \cdot [R_d + K \cdot R_d^{CL}]^2 + \frac{2}{\Phi_0} (R_d + R_d^{CL}) \cdot I_{low-freq} \quad (3)$$

Внешние флуктуации, в отличие от «классического» члена, квадратично зависящего от R_d , имеют линейную зависимость от R_d и потому дают значительный вклад в ширину линии при низких R_d . На рис. 5 приведен график со сравнением экспериментальных и расчетных результатов для трех различных образцов РДП, демонстрирующий хорошее согласие эксперимента с предложенной моделью. В конце главы приведены выводы серии проведенных исследований.

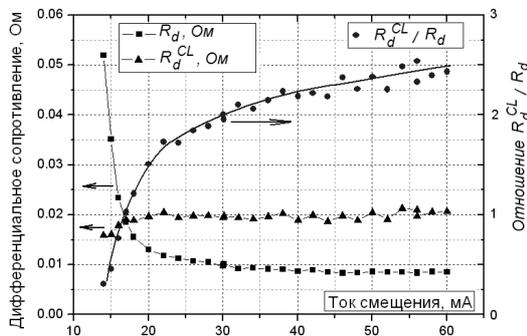


Рис. 4. Зависимость дифференциальных сопротивлений R_d и R_d^{CL} от тока смещения при постоянном напряжении в режиме работы РДП «флак-флоу».

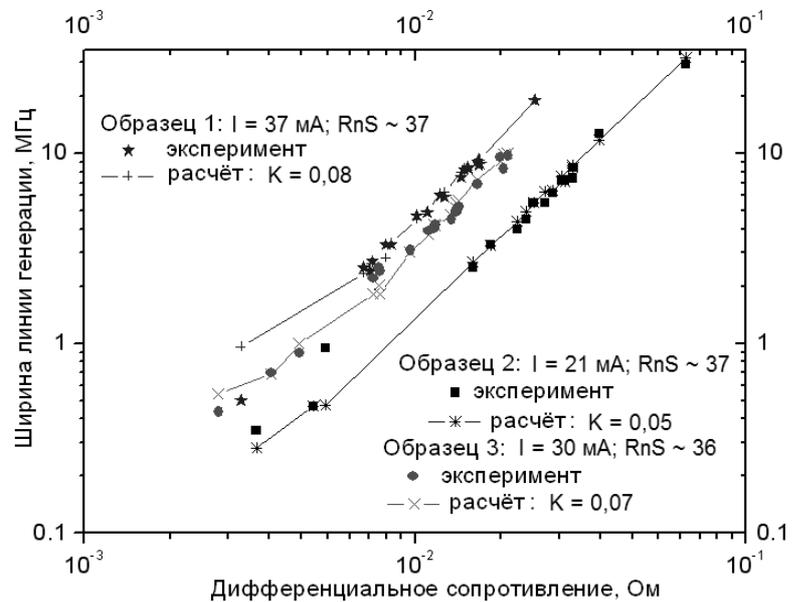


Рис. 5. Зависимость ширины линии от R_d : экспериментальная и расчетная, описываемая формулой (3).

Четвертая глава посвящена исследованию процессов тепловыделения в системе СИП, влияющих на функционирование как отдельных элементов микросхемы приемника, так и всего прибора в целом. СИП, как и любое сверхпроводниковое устройство, работающее при температурах жидкого гелия

и ниже ($T \leq 4,2 K$), крайне чувствителен к изменениям рабочей температуры в системе. В частности, при повышении температуры на десятые доли K происходит уменьшение щелевого напряжения СИС-перехода [1,4], а следовательно всей формы ВАХ, ухудшение чувствительности и спектральных характеристик генератора на основе РДП. Кроме того, требуется время порядка 2 минут для установления новых параметров рабочей точки базовых элементов СИП.

Помимо неизбежных источников тепла в системе (основных рабочих элементов СИП), тепловыделение вносится проволоками, осуществляющими электрический контакт между элементами микросхемы и печатной платой, через которую осуществляется питание всех функциональных элементов. Описана методика определения вклада в сопротивление задающей/измерительной цепи единичной проволоки для осуществления контакта. Единичная проволока вносит вклад, являющийся суммой сопротивлений самой проволоки и контактного сопротивления между проволокой и контактной площадкой микросхемы. В качестве объективного и наиболее чувствительного фактора тепловыделения в системе взято изменение щелевого напряжения СИС-смесителя ΔV_g . Наибольшие токи в системе приемника протекают в цепях управления током смещения (I_B) и током управления магнитным полем (I_{CL}), поэтому именно эти цепи были использованы для определения вклада в сопротивление единичной проволоки. При этом сама линия управления магнитным полем не вносит вклада в тепловыделение в системе, поскольку конструктивно представляет собой пленку из сверхпроводника и не имеет сопротивления. Рис. 6 демонстрирует зависимость ΔV_g от токов I_B и I_{CL} , на основании которой производится оценка вклада проволок в общее тепловыделение в системе.

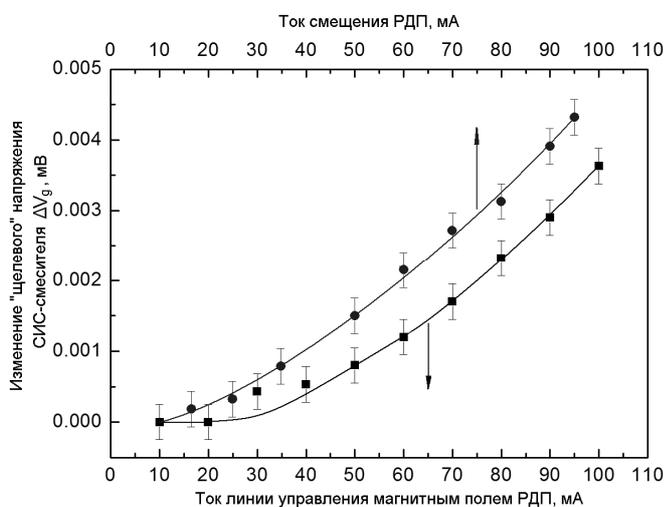


Рис. 6. Зависимость изменения щелевого напряжения СИС-смесителя от токов смещения и линии управления магнитным полем РДП.

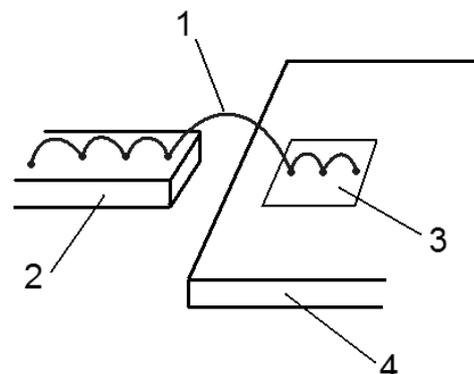


Рис. 7. Методика осуществления множества контактов с использованием одной проволоки. 1 - проволока, 2 - контактная площадка платы смещения, 3 - контактная площадка микросхемы СИП, 4 - микросхема СИП

Приведены результаты измерения вклада единичной проволоки в общее сопротивление канала, вклад оказался равным порядка $0,15-0,2 \Omega$. Установлено количественное соотношение между сопротивлением проволоки (которое составило не более $0,01 \Omega$) и контактным сопротивлением. Показано, что основной вклад (более 90%) в тепловыделение вносит контактное сопротивление между проволокой и площадкой микросхемы. Описана модернизированная методика установления контактов (рис. 7), предложенная с целью понижения контактного сопротивления как определяющего фактора тепловыделения в системе. Описаны положительные результаты с использованием новой методики, подана заявка на патент. Сформулированы выводы главы.

В пятой главе изложены результаты разработки и исследования сверхпроводящего интегрального приемника с гетеродином на основе РДП и смесителем на основе болометра на эффекте электронного разогрева (НЕВ) (рис. 8). НЕВ-смеситель был согласован со целевой антенной, рассчитанной на центральную частоту 600 ГГц . Было проведено измерение частотной зависимости прямого отклика детектора при помощи разработанного и описанного в главе 2 лабораторного Фурье-спектрометра. Данная характеристика фактически является характеристикой квазиоптической системы совместно с цепью подвода мощности РДП к НЕВ-смесителю и схемы ПЧ-тракта, поскольку чувствительность НЕВ-детектора практически не зависит от частоты в рабочей полосе антенны. Квазиоптическая система состоит из эллиптической кремниевой линзы, интегрированной с антенной.

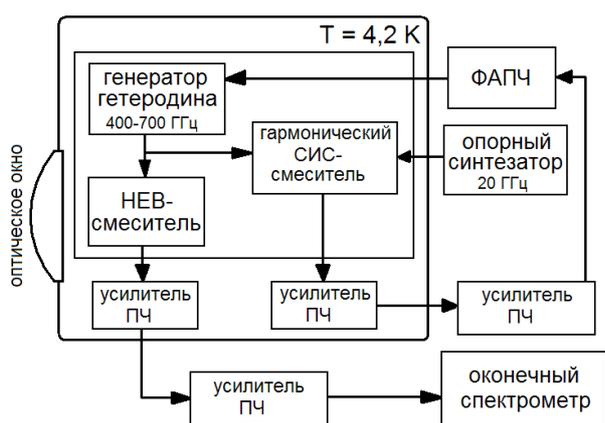


Рис. 8. Блок-схема сверхпроводящего интегрального приемника на основе НЕВ-смесителя

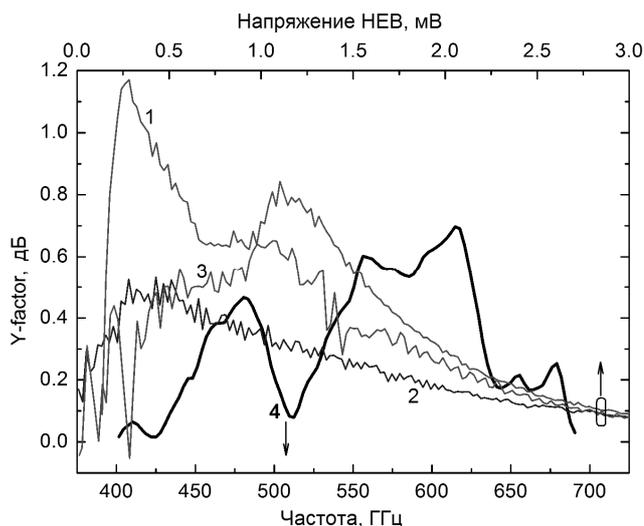


Рис. 9. Отношения уровней ПЧ в режиме «горячей» и «холодной» нагрузок: кривые 1-3 – в зависимости от напряжения НЕВ-смесителя (на частоте 600 ГГц) при различной мощности накачки; кривая 4 – в зависимости от частоты в рабочей точке 1 мВ .

Приведены вольт-амперные характеристики основных элементов СИП, расположенных на микросхеме: НЕВ-смесителя и генератора гетеродина на основе РДП. Обозначена оптимальная рабочая область НЕВ-смесителя. Показаны ПЧ-характеристики НЕВ, его шумовая температура, измеренная при помощи определения величины Y -factor (рис. 9). Проанализировано расположение оптимальной (для реализации максимальной чувствительности) рабочей точки НЕВ-смесителя, отмечено, что положение оптимальной рабочей точки зависит как от частоты, так и от уровня накачки мощностью РДП. В конце главы сформулированы выводы.

Шестая глава посвящена исследованию спектральных характеристик ТГц генератора на основе ВТСП-мезоструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, представляющей собой массив из N последовательных джозефсоновских переходов [5]. Описана концепция генератора и метод измерения его спектральных характеристик. Спектральные характеристики генератора измерялись при помощи спектрометра на основе СИП. При этом ВТСП-генератор на основе мезоструктуры размещался в отдельной криогенной установке с целью уменьшения влияния температурного режима генератора на режим интегрального приемника, работающего при температурах $T < 4,5 \text{ K}$. Представлены вольт-амперные характеристики генератора, обозначены режимы его работы: при высоких токах смещения (*high bias regime*) и при низких токах (*low bias regime*). Впервые в мире была проведена серия экспериментов по измерению спектральных характеристик таких генераторов с частотным разрешением лучше 1 МГц при помощи СИП. Зарегистрированы линии излучения генератора шириной от 6 до более 500 МГц в частотном диапазоне $450 - 750 \text{ ГГц}$ (рис. 10, 11), показано, что форма линии с высокой степенью точности является лоренцевой. Продемонстрирована высокая стабильность линии генерации. Максимальная мощность ТГц излучения, принимаемая СИП-смесителем в составе интегрального приемника, составила порядка $1,2 \text{ мкВт}$, что в несколько раз превосходит мощность «накачки», необходимую для оптимальной работы СИП. Показано, что из двух режимов работы лишь в одном (*high bias regime*) реализуются достаточно хорошие спектральные характеристики, пригодные для реальных практических применений таких генераторов.

Проведены эксперименты по стабилизации частоты генератора при помощи комнатной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Показано, что при некоторых условиях реализация режима ФАПЧ возможна в конструкции данного генератора. Посредством проведенных измерений линий поглощения газов (NH_3 и H_2O) в газовой ячейке при различном давлении

продемонстрирована принципиальная возможность применения данного типа генераторов для спектрального анализа газовой смеси (совместно с СИП).

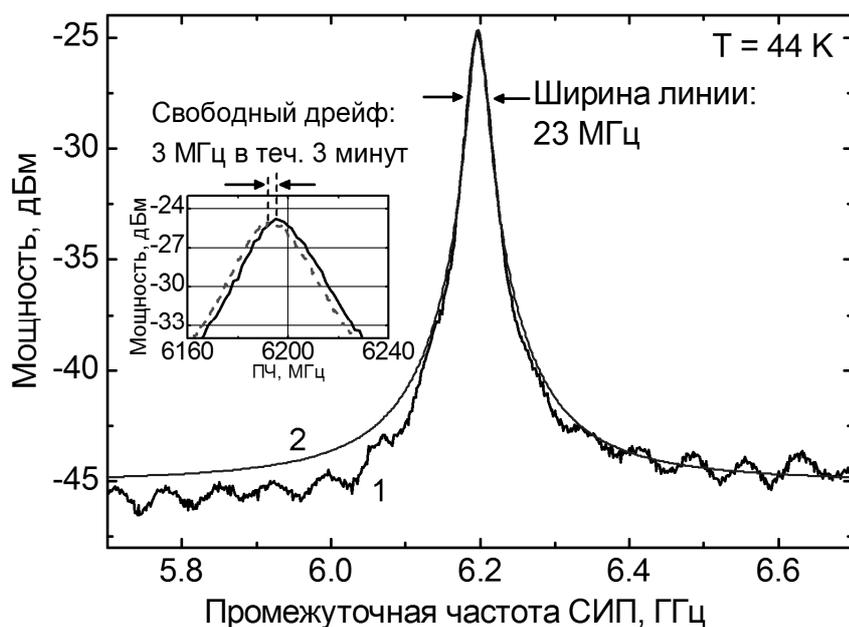


Рис. 10. Спектр излучения генератора, измеренный при помощи СИП с диапазоном промежуточных частот 4 - 8 ГГц (1) и кривая лоренцевой формы (2). Частота $f_0 = 611,95$ ГГц, рабочая температура 44 К, количество переходов $N \approx 570$. Измерения проводились в режиме «high-bias». Вставка слева демонстрирует смещение пика линии излучения вследствие свободного дрейфа системы.

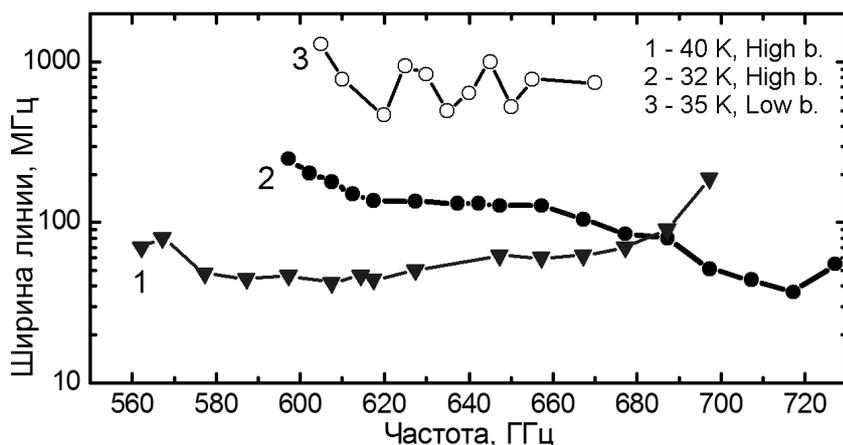


Рис. 11. Зависимость ширины линии излучения генератора от частоты при различных температурах и в различных режимах: 1 – 40 К, режим high-bias; 2 – 32 К, режим high-bias; 3 – 35 К, режим low-bias.

Основные результаты работы

1. Создана установка и проведена настройка лабораторного терагерцового Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона для исследования частотной зависимости чувствительности детектора в составе СИП в режиме прямого детектирования. Реализована полоса исследуемой области частот $\sim 0,1 - 30$ ТГц с предельным спектральным разрешением лучше $1,5$ ГГц. Успешно протестированы несколько образцов СИП с рабочим диапазоном принимаемых частот 450 - 700 ГГц.
2. Проведено исследование резонансного режим работы серии генераторов на основе РДП различной структуры, длин и различной плотности

критического тока через барьер на частотах генерации $250 - 400$ ГГц. Установлено, что для реализации непрерывной перестройки частоты в указанном диапазоне оптимальная длина перехода зависит от типа используемой трехслойной структуры и составляет $600 - 700$ мкм для Nb/AlO_x/Nb и 400 мкм для Nb/AlN/NbN при параметре $R_n \cdot S$ порядка $40 - 50$ Ом·мкм². Получено хорошее согласие экспериментальных результатов с теоретическими расчетами.

3. Проведено исследование зависимости дифференциальных сопротивлений РДП по току смещения, а также по току линии управления магнитным полем, дающих прямой вклад в ширину линии излучения, от вольт-амперных параметров перехода, а также от электрофизических параметров структуры. Апробирована эмпирическая модель, учитывающая внешние низкочастотные флуктуации тока в цепи управления и измерения РДП, а также флуктуации тока в линии управления магнитным полем. Определены параметры для точного расчёта ширины линии излучения в соответствии с предложенной моделью. Установлена зависимость этих параметров положения рабочей точки.
4. Исследованы процессы тепловыделения в криогенной системе в рабочем режиме СИП и изучено их влияние на функционирование прибора. Показано, что типичные рабочие вольт-амперные параметры рабочих элементов СИП оказывают взаимное влияние на форму ВАХ друг друга. Установлено, что основной вклад (более 90%) в тепловыделение, отрицательно влияющее на функционирование приемника, вносит контактное сопротивление между контактными площадками микросхемы и проволоками, обеспечивающими электрический контакт микросхемы с платой смещения. Предложена и апробирована альтернативная методика установления контактов, с использованием которой контактное сопротивление удалось понизить в 3-4 раза. Подана заявка на патент.
5. Впервые исследован интегральный приемник с генератором гетеродина на основе РДП и смесителем на основе сверхпроводникового болометра, работающего на эффекте электронного разогрева. Реализован уровень накачки НЕВ-смесителя мощностью от РДП, достаточный для работы устройства на основе такой интеграции в качестве ТГц приемника. При помощи Фурье-спектрометра исследована частотная характеристика антенны, интегрированной с кремниевой линзой. Реализован рабочий частотный диапазон $450-620$ ГГц, наилучшая шумовая температура приемника составила порядка 1000 К.

6. При помощи СИП впервые исследованы спектры излучения генератора на основе слоистой ВТСП-мезоструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ в диапазоне $450 - 736 \text{ ГГц}$ с разрешением лучше 1 МГц . Уровень мощности линии генератора составил порядка 30 дБ над уровнем шума ПЧ, ширина линии генерации менялась в широком диапазоне и составила от 6 до $> 500 \text{ МГц}$, показано, что форма линии с высокой степенью точности является лоренцевой. Установлено, что мощность и ширина спектра излучения значительно меняется с изменением рабочей точки на ВАХ генератора и рабочей температуры. Максимальная мощность излучения, поступающая на СИС-смеситель, составила более 1 мкВт . Продемонстрирована возможность измерения линии поглощения газов. Проведена успешная попытка фазовой синхронизации генератора.

Перечень публикаций по теме диссертации

- статьи в журналах из рекомендованного перечня ВАК:

- [A1]. **Н. В. Кинев**, В. П. Кошелец, «Сверхпроводниковый генератор гетеродина для интегрального приёмника субММ диапазона», Нелинейный мир, №6, т.7, стр. 475-477, 2009.
- [A2]. **Н. В. Кинев**, В. П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, «Разработка и исследование микросхемы интегрального приёмника миллиметровых волн на основе джозефсоновских туннельных структур», Нелинейный мир, №2, т.8, стр. 130-131, 2010.
- [A3]. Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey V. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Hans Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V. Khudchenko, **Nickolay V. Kinev**, Oleg S. Kiselev, Bart van Kuik, Arno de Lange, Joris van Rantwijk, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, Ed de Vries, Pavel A. Yagoubov, and Valery P. Koshelets, “Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder”, Supercond. Sci. Technol. vol. 23, No 4, 045016 (8pp), 2010.
- [A4]. Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., **Кинев Н.В.**, Киселев О.С., Кошелец В.П., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Филиппенко Л.В., Худченко А.В., Arno de Lange, Gert de Lange, Pavel A. Yagoubov, «Сверхпроводниковый интегральный приёмник субмиллиметрового диапазона», Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. №5, стр. 75-81, 2010.

- [A5]. R.V. Ozhegov, K.N. Gorshkov, G.N. Gol'tsman, **N.V. Kinev**, V.P. Koshelets, «The stability of a terahertz receiver based on a superconducting integrated receiver», Supercond. Sci. Technol. vol. 24, 035003 (4pp), 2011.
- [A6]. Valery P Koshelets, Manfred Birk, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey B Ermakov, Lyudmila V Filippenko, Hans Golstein, Ruud W M Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V Khudchenko, **Nickolay V Kinev**, Oleg S Kiselev, Pavel V Kudryashov, Bart van Kuik, Arno de Lange, Gert de Lange, Irina L Lapitsky, Sergey I Pripolzin, Joris van Rantwijk, Avri M Selig, Alexander S Sobolev, Mikhail Yu Torgashin, Vladimir L Vaks, Ed de Vries, Georg Wagner, Pavel A Yagoubov, «Integrated Submm Wave Receiver: Development and Applications», - Chapter in the book “Nanoscience Frontiers - Fundamentals of Superconducting Electronics”, Springer Serie: Nanoscience and Technology_35372, pp. 263-296, Editor: Anatolie Sidorenko, 2011.
- [A7]. **Н. В. Кинев**, В. П. Кошелец, «Режимы работы и ширина линии излучения сверхпроводникового генератора гетеродина», Нелинейный мир, №2, т.9, стр. 109-111, 2011.
- [A8]. O. Kiselev, M. Birk, A. Ermakov, L. Filippenko, H. Golstein, R. Hoogeveen, **N. Kinev**, B. van Kuik, A. de Lange, G. de Lange, P. Yagoubov, and V. Koshelets, «Balloon-Borne Superconducting Integrated Receiver for Atmospheric Research», IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 21, № 3, pp. 612-615, 2011.
- [A9]. Mengyue Li, Jie Yuan, **Nickolay Kinev**, Jun Li, Boris Gross, Stefan Guenon, Akira Ishii, Kazuto Hirata, Takeshi Hatano, Dieter Koelle, Reinhold Kleiner, Valery P. Koshelets, Huabing Wang, Peiheng Wu, «Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime», Phys. Rev. B 86, 060505(R), 2012.
- [A10]. **Кинев Н.В.**, Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Ожегов Р.В., Горшков К.Н., Гольцман Г.Н., Селезнев В.А., «Сверхпроводниковый интегральный приемник со смесителем на эффекте электронного разогрева», Радиотехника, том 1, 2013.
- [A11]. **Н.В. Кинев**, В.П. Кошелец, «Процессы тепловыделения в криогенной системе и их влияние на функционирование сверхпроводникового интегрального приемника», ЖТФ, том 83, вып. 3, стр. 123-131, 2013.
- доклады на конференциях с публикацией тезисов
- [A12]. Valery P. Koshelets, Andrey B. Ermakov, Pavel N. Dmitriev, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko, **Nickolay V. Kinev**, Oleg S. Kiselev, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, “Phase-locked Local Oscillator

for Superconducting Integrated Receiver”, presented at the 19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08), Groningen, the Netherlands, April 2008, report 7-5; published in the Proceedings of the ISSTT-08, pp. 211-220.

- [A13]. **Nickolay Kinev**, Valery Koshelets, “Development of integrated receiver for radio astronomy”, The 10-th Workshop on Submm-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Wu-Xi, China, November 15-18, 2009.
Адрес в сети Интернет:
<http://mwlab.pmo.ac.cn/easternasia2009/proceeding.html>
- [A14]. В.П. Кошелец, О.С. Киселев, **Н.В. Кинев**, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко, В.Л. Вакс, С.И. Приползин, «Сверхпроводниковый интегральный спектрометр для неинвазивной медицинской диагностики», Труды III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010», том 4, стр. 157-159, 2010.
- [A15]. Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko, **Nickolay V. Kinev**, Pavel Kudryashov, Oleg S. Kiselev, Mikhail Yu. Torgashin, Leo de Jong, Pavel A Yagoubov, Gert de Lange, «Superconducting Integrated THz Receiver». Conference Guide 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2010. Rome, 2010. C. 5612575.
- [A16]. Valery P. Koshelets Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, **Nickolay V. Kinev**, Oleg S. Kiselev, Mikhail Yu Torgashin, Arno de Lange, Gert de Lange, Sergey I Pripolzin, and Vladimir L Vaks, “Superconducting integrated THz receivers: development and applications”. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Infrared, Millimeter Wave, and Terahertz Technologies. Volume: 7854, Article number 78540J. Beijing, 2010.
- [A17]. **Н.В. Кинев**, В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, «Сверхпроводниковый генератор гетеродина субмм диапазона волн: режимы работы и ширина линии излучения», доклад на 2-ой Международной научной конференции «Прикладная сверхпроводимость - 2011», Москва, 4 марта 2011.
Адрес в сети Интернет:
<http://www.atomic-energy.ru/events/2011/03/04/17812>
- [A18]. В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, К.В. Калашников, О.С. Киселев, **Н.В. Кинев**, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, А.В. Худченко, В.Л. Вакс, С.И. Приползин, «Сверхпроводниковые интегральные приемники ТГц диапазона: разработка и применения», Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, стр. 11-14, 2011.
- [A19]. Н.В. Wang, М.У. Li, J.Yuan, **N. Kinev**, J.Li, В. Gross, S.Guenonz, A.Ishii, T.Hatano, D.Koelle, R.Kleiner, V.P. Koshelets, P.H. Wu, «A Tunable 350-780 GHz CW Solid State Oscillator of Intrinsic Josephson Junctions in a high-Tc Superconductor», Abstract for 37th IRMMW-THz, Wollongong, Australia. 23-28 Sept., 2012.

- [A20]. V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, **N.V. Kinev**, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, G. de Lange, W. Wild, R.W.M. Hoogeveen, "Development of the Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS", Joint International Workshop "A new generation of ultra-sensitive detectors for dark energy and cosmology experiments", Bjorkliden, Kiruna, Sweden, March 30 -April 6, 2008.
- [A21]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, **N.V. Kinev**, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Y. Torgashin, G. de Lange, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, W. Wild, «Development and Characterization of the Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS», Abstract for the Applied Superconductivity Conference ASC-2008. Chicago, USA, August 2008, invited report 3EPE03.
- [A22]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, **N.V. Kinev**, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, "Superconducting Integrated Submm Wave Receiver" submitted to the Frontiers of Josephson Physics and Nanoscience (FJPN07), 7th International AQDJJ conference, Italy, September 2007.
- [A23]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, **N.V. Kinev**, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, "On-board Integrated submm spectrometer for atmosphere monitoring and radio astronomy", ISTC Thematic Workshop "Perspective materials, devices and structures for space applications", May 26-28, 2009, Yerevan, Armenia.
- [A24]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, **N.V. Kinev**, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, "Superconducting Integrated Receiver", presented at the International Conference on Superconductive Electronics "EuroFlux-2009: from devices to circuits and systems", Avignon, France, September 20-23, 2009.
- [A25]. Vladimir L. Vaks, Vladimir Yu. Balakirev, Alexander N. Panin, Sergey I. Pripolzin, Valery P. Koshelets, Oleg S. Kiselev and **Nikolay V. Kinev**. «The 500-700 GHz Spectrometer with Superconductive Integrated Receiver». Proceedings of 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. IRMMW-THz 2011, October 2-7, 2011, Hyatt Regency Houston, Houston, Texas, USA, F2B.4.1.
- [A26]. В.П. Кошелец, А.Б. Ермаков, К.В. Калашников, О.С. Киселев, **Н.В. Кинев**, А.А. Мухортова, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, «Сверхпроводниковые интегральные приемника терагерцового диапазона», доклад на 1-ой Национальной конференции по прикладной сверхпроводимости (НКПС-1), 6-8 декабря 2011, Москва.

Список цитированной литературы

- [1] Tucker J.R., Feldman M.J. Quantum detection at millimeter wavelengths. // *Rev. Mod. Phys.*, vol. 4, pp. 1055-1113. 1985.
- [2] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, J. Mygind, A.V. Ustinov. Self-Pumping Effects and Radiation Linewidth of Josephson Flux Flow Oscillators // *Phys. Rev. B.*, vol. 56. pp. 5572–5577. 1997.
- [3] А. Бароне, Дж. Патерно. Эффект Джозефсона. Москва, "Мир". 1984.
- [4] Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука. 1985.
- [5] H.B. Wang, S.Guenon, B.Gross, J.Yuan, Z.G. Jiang, Y.Y. Zhong, M.Gruenzweig, A.Iishi, P.H. Wu, T.Hatano, D.Koelle, and R.Kleiner. Coherent Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junction Stacks in the Hot Spot Regime. // *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, p. 057002. 2010.