Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Российской академии наук

На правах рукописи

Торгашин Михаил Юрьевич

Разработка и исследование джозефсоновских генераторов терагерцового диапазона на основе распределенных туннельных переходов

(01.04.03 – Радиофизика)

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель проф., д.ф.-м.н. В.П. Кошелец

Москва 2013

Список использованных сокращений и аббревиатур 4
ВВЕДЕНИЕ6
Глава 1. Обзор литературы 13
1.1 Генераторы ТГц диапазона13
1.2 Сверхпроводниковые джозефсоновские генераторы
1.3 Генераторы на основе распределенных джозефсоновских переходов
1.3.1 Конструкция и принцип действия19
1.3.2 Технология изготовления22
1.3.3 Теоретические модели25
1.3.4 Практическое внедрение РДП33
Глава 2. Методы экспериментальных исследований 36
2.1 Методы подключения образцов
2.2 Измерение на постоянном токе. Фурье спектрометр44
2.3 Исследование входного диапазона СИП с помощью спектрометра Фурье51
2.4 Измерение диаграммы направленности линзовых антенн
2.5 Установка для измерения спектральных характеристик РДПРДП
Заключение раздела67
Глава 3. Экспериментальное исследование генераторов на основе Nb-AlOx-
Nb
3.1 Экспериментальные образцы70
3.2 Вольт-амперная характеристика РДП на основе Nb-AlOx-Nb
3.3 Процедура спектральных измерений79
3.4 Зависимости спектральных свойств от ширины распределенного перехода83
3.5 Влияние плотности критического тока87
3.6 Переходы с гребенчатым верхним электродом89
Заключение раздела91
Глава 4. Генераторы на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN
4.1. Электрофизические свойства РДП на основе Nb-AlN-NbN
4.2 Исследование спектральных характеристик105
Заключение раздела110

Глава 5. Криогенная система замкнутого цикла	111
5.1 Конструкция	111
5.2 Рабочая температура	114
5.3 Исследование РДП в системе замкнутого цикла	
Заключение раздела	126
Заключение	127
Публикации автора по теме диссертации	128
Литература	

Список использованных сокращений и аббревиатур

- АЦП аналого-цифровой преобразователь,
- АЧХ амплитудно-частотная характеристика,
- ВАХ вольт-амперная характеристика,
- ВЧ высокая частота, высокочастотный,
- НЧ низкая частота, низкочастотный,
- КЛ контрольная линия (для задания магнитного поля в РДП),
- КОП канал общего пользования, российский аналог стандарта GPIB,
- КПД коэффициент полезного действия,
- ЛОВ лампа обратной волны,
- ПК персональный компьютер,
- ПЧ промежуточная частота,
- РДП распределенный джозефсоновский переход,
- РТД резонансно-туннельный диод,
- СИС сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник,
- СИП сверхпроводниковый интегральный приемник,
- СВЧ сверхвысокая частота, сверхвысокочастотный,
- СК спектральное качество генератора,
- ФАПЧ система фазовой автоподстройки частоты,
- ФВЧ фильтр верхних частот,
- ФНЧ фильтр нижних частот,
- ЦАП цифро-аналоговый преобразователь,
- ЧС частотная стабилизация,

- ММІС монолитная микроволновая интегральная схема.
- SRON Институт космических исследований Нидерландов (официальное наименование SRON Netherlands Institute for Space Research).
- TELIS название международного проекта по созданию спектрометра лимбового зондирования терагерцового диапазона (от англ. Terahertz and Submillimeter Limb Sounder)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается непрерывный рост количества исследований и публикаций в области сверхвысокочастотных электронных устройств с рабочим диапазоном в полосе от сотен гигагерц примерно до 10 терагерц. В публикациях предыдущих лет этот диапазон обычно называют субмиллиметровым или дальним инфракрасным диапазоном, в зависимости от предпочтительного отношения автора к радиофизической или оптической терминологии. В современных публикациях понятие «терагерцовый генератор» «терагерцовый диапазон». является устоявшимся И самостоятельным. Одним из подтверждений растущей значимости исследований именно в терагерцовом диапазоне можно считать создание в 2011 году Институтом инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) специального журнала «Труды IEEE по терагерцовой науке и технике» (IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology) [1].

Среди факторов роста публикационной активности можно выделить следующие:

- успехи полупроводниковой электроники – повышение рабочей частоты транзисторов, появление новых устройств на основе гетероструктур с рабочими частотами в ТГц диапазоне (умножители на основе квантовых полупроводниковых сверхрешеток, резонансно-туннельные диоды с частотой до 1 ТГц, низкоразмерные устройства с магнитоплазменными возбуждениями), повышение рабочих частот монолитных микроволновых интегральных схем (MMIC);

- развитие и широкое распространение коммерческих систем трехмерного электромагнитного моделирования (AWR Microwave Office, CST Microwave Studio, Ansys HFSS, Sonnet, Agilent ADS, Agilent EM Pro и др.);

- появление компактных и доступных (волоконных) лазеров, в том числе со сверхкороткими импульсами, которые применяются в источниках широкополосного излучения, а также появление новых доступных источников ТГц излучения;

- повышенный интерес к новым астрономическим миссиям, вызванный рядом успешных космических проектов последних лет (в т.ч. радио-обсерватория «HERSHEL», запущенная в 2009 г., интерферометр со сверхдлинной базой «Радиоастрон» - 2011 г.), а также вводом в эксплуатацию новых наземных радиотелескопов (среди которых самым амбициозным проектом можно назвать систему радиотелескопов «ALMA» [2]);

- коммерческая востребованность технологии: устройства, позволяющие получать изображение объекта в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах оказались востребованными в системах обеспечения безопасности (в частности, в системах личного досмотра в аэропортах) и в медицинском оборудовании; также, для медицинских и

промышленных применений, а также для задач экологического мониторинга разрабатываются газоанализаторы, определяющие состав газовых смесей и наличие заданных примесей по спектрам пропускания в терагерцовом диапазоне. В англоязычной литературе для обозначения терагерцового излучения в таких системах употребляется обозначение T-rays («Т-лучи»), по аналогии с X-rays («Х-лучи») – рентгеновским излучением [3];

- постоянно растущие потребности в полосе и быстродействии беспроводных систем передачи данных все труднее удовлетворить в рамках традиционных технологий с несущими частотами в диапазоне 2 - 5 ГГц (Wi-Fi, Wi-Max, 3G, LTE), что подталкивает исследователей к разработке устройств беспроводной передачи данных в терагерцовом диапазоне [4].

Среди множества конкурирующих технологий наилучшей чувствительностью обладают приемники на основе сверхпроводящих материалов. Это связано как с предельно низкой рабочей температурой таких устройств, которая может достигать сотен милликельвин [5] и приводит к снижению собственных тепловых шумов устройства, так и крайне высокой нелинейностью, присущей всем сверхпроводниковым детекторам, что позволяет достичь высокой квантовой эффективности.

При разработке матричных систем получения изображения предпочтение отдается широкополосным детекторам болометрического типа из-за сравнительно простой реализации схем считывания. В то же время, для большинства задач из указанных областей применения требуется высокая частотная селективность, которую довольно трудно обеспечить с помощью болометров.

В качестве входного элемента частотно-селективного приемника на частотах ниже 1.2 ТГц наилучшими характеристиками обладают смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник, а на более высоких частотах – смесители на основе болометров с эффектом электронного разогрева [6] (см. рис. 1.1). В обоих случаях, чувствительность и спектральное разрешение прибора будут определяться не только характеристиками смесительного элемента и тракта промежуточной частоты, но и качеством сигнала используемого гетеродина. Немаловажным фактором при выборе в пользу сверхпроводниковых детекторов являются их низкие требования к мощности гетеродина.



Рисунок 1.1 – а) Данные по приемникам субмиллиметрового диапазона Калифорнийского технологического института по [6], б) Чувствительность приемников с СИС-смесителем для радиотелескопа Hershel (иллюстрация любезно предоставлена В.П. Кошельцом)

Данная диссертация посвящена исследованию сверхпроводниковых интегральных генераторов суб-ТГц диапазона на основе распределенных джозефсоновских переходов с целью оптимизации характеристик таких генераторов для использования в качестве гетеродина интегрального сверхпроводникового приемника для мониторинга атмосферы.

<u>Цель работы</u>

Целями настоящей диссертационной работы являются:

• Разработка и исследование интегральных генераторов на основе распределенных джозефсоновских туннельных переходов, характеристики которых удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к гетеродинам для атмосферной спектрометрии (и радиоастрономии) в диапазоне 450 – 650 ГГц.

• Исследование влияния электрофизических и топологических параметров туннельных переходов на спектральные характеристики генерации известных ранее переходов на основе структур Nb-AlOx-Nb. Исследование пределов возможной оптимизации генераторов на таких переходах.

• Исследование новых типов распределенных генераторов на основе материалов с щелевым напряжением, отличным от ниобия, для расширения области применения РДП в качестве интегрального генератора гетеродина. Определение электрофизических параметров переходов нового типа и их спектральных характеристик в субтерагерцовом частотном диапазоне.

Научная новизна

- Впервые проведены систематические экспериментальные исследования зависимости спектральных характеристик генераторов на основе РДП от топологии и размеров джозефсоновского перехода.
- 2. Впервые разработаны интегральные схемы с гетеродином и смесителем на основе туннельных переходов Nb-AlN-NbN. Исследованы электрофизические свойства таких переходов.
- Впервые продемонстрирована принципиальная возможность задания произвольной частоты генерации РДП в режиме ступеней Фиске.
- Впервые продемонстрирована работа приемника с гетеродином на основе РДП в криогенной системе замкнутого цикла.

Практическая ценность работы

- 1. Получены экспериментальные данные о зависимости ширины автономной линии генерации РДП от размеров контакта. Определены оптимальные параметры для практических применений.
- 2. Интегральные схемы на основе структуры Nb-AlN-NbN исследованы и в качестве основного приемного элемента канала 450-650 ГГц аэростатного инструмента TELIS.
- 3. Показано, что генератор на основе перехода Nb-AlN-NbN обладает более широким непрерывным диапазоном доступных частот, а также меньшей шириной автономной линии генерации по сравнению с генераторами на основе Nb-AlOx-Nb. При этом технология изготовления интегральных схем не требует существенных изменений.
- 4. Созданы три криогенных измерительных стенда на базе вакуумных криостатов, в том числе один на базе крио-установки замкнутого цикла, предназначенный для исследования квазиоптического сверхпроводникового интегрального приемника.

Апробация работы

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

- International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2005, 2007)
- European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2005)
- International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT 2005, 2006, 2008)
- Applied Superconductivity Conference (ASC 2004, 2006)
- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород (2005, 2007, 2009);
- International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010).
- Международная научная конференция «Прикладная сверхпроводимость» (2010, 2011)

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах

Основные результаты проведённых исследований опубликованы в 40 работах, в том числе в 11 статьях в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, в 27 докладах на международных и российских

конференциях; результаты работы вошли в главу монографии, а также по результатам работ получен патент РФ на изобретение.

Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Superconducting Science and Technology, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, «Известия вузов. Радиофизика», Успехи современной микроэлектроники. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание; они хорошо известны специалистам, на них имеются ссылки в научной периодике.

Общий объём опубликованных по теме диссертации работ составил 78 мп. страниц.

Вопросы авторства и публикация результатов

В работе [A1] автором проведены экспериментальные исследования характеристик генераторов на основе распределенного перехода по постоянному току. Обнаружена нисходящая зависимость дифференциальных сопротивлений переходов от напряжения.

В работе [A2, A4, A6, A9] автором проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик излучения генераторов на основе распределенных переходов различных типов, а также исследования распределенных джозефсоновских генераторов по постоянному току, проведено моделирование и подготовка фотолитографических шаблонов тестовых схем.

В работах [А3, А5, А7, А8, А10, А11] автор принимал участие в характеризации интегральных схем квазиоптического спектрометра диапазона 500 – 650 ГГц. Проведены исследования спектральных характеристик гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода и определена оптимальная конфигурация генератора. Проведены исследования согласующих структур гетеродина и смесительных элементов, спектральной чувствительности антенны, а также экспериментальные исследования диаграммы направленности интегральной линзовой антенны приемника и шумовой характеристики приемника в двухполосном режиме.

В публикациях, не входящих в перечень ВАК [A12-A40], автором внесен тот же вклад, что и в описанных выше журнальных публикациях.

Структура диссертации

В первой главе приводится обзор литературы. Рассматриваются современные типы генераторов субмиллиметрового диапазона, особенности их применения. Кратко рассмотрены типы джозефсоновских генераторов. Приводится описание конструкции и принципа действия генераторов на основе распределенных джозефсоновских переходов, описана технология изготовления таких генераторов, а также ряд теоретических моделей,

применяемых при моделировании поведения РДП. Представлены результаты практического внедрения таких генераторов.

Во второй главе описываются экспериментальные методики и конструкция ряда измерительных установок, использованных в работе, в частности, рассмотрены конструкция криогенных измерительных систем для тестирования образцов, исследования спектральной характеристики распределенных джозефсоновских генераторов, а также конструкция спектрометра Фурье и результаты измерений чувствительности входного тракта сверхпроводникового интегрального приемника для проекта TELIS с его помощью.

В третьей главе приводится описание результатов экспериментальных исследований распределенных джозефсоновских генераторов на основе туннельных структур Nb-AlOx-Nb, предназначенных для использования в качестве гетеродина сверхпроводникового интегрального приемника диапазона 500 - 650 ГГц для проекта TELIS. Описана методика и результаты исследования спектральных характеристик, получены данные о влиянии на ширину линии генерации плотности критического тока туннельных структур, топологии электродов, геометрических размеров распределенных джозефсоновских переходов. Показано, что в диапазоне 500-550 ГГц РДП спектральная характеристика генераторов на основе Nb-AlOx-Nb не может быть существенно улучшена из-за эффекта самонакачки.

В четвертой главе описаны результаты исследований распределенных переходов на основе туннельной структуры Nb-AlN-NbN, предложенных на замену Nb-AlOx-Nb с целью дальнейшей оптимизации спектральных характеристик гетеродина для проекта TELIS. Исследованы характеристики структур нового типа, проведено детальное исследование спектральных характеристик РДП генераторов Nb-AlN-NbN с подводящими структурами из ниобия.

В пятой главе приведены результаты разработки и внедрения измерительной системы на основе криосистемы замкнутого цикла Cryomech PT405. Рассматривается возможность использования такой криосистемы для исследования характеристик распределенных джозефсоновских переходов и интегральных приемников с РДП гетеродином.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Генераторы ТГц диапазона

До последнего времени наиболее распространенным типом источников излучения в диапазоне выше 100 ГГц являлись генераторы на основе ламп обратной волны (ЛОВ). Такие генераторы обеспечивают монохроматический режим работы с большим диапазоном перестройки частоты – на практике до +/- 30% от центральной частоты, высокие предельные рабочие частоты - до 1.5 ТГц, их выходная мощность может достигать сотен милливатт в миллиметровом диапазоне (100 - 300 ГГц) и десятков милливатт на более высоких частотах. Принцип действия ЛОВ [7] основан на передаче энергии от электронного пучка одной из пространственных гармоник электромагнитной волны, распространяющейся В специальной замедляющей системе навстречу электронному пучку. Энергия передается пространственной гармонике, фазовая скорость которой совпадает со скоростью движения электронов по модулю и направлению, т.е. направлена в противоположную сторону по отношению к направлению распространения СВЧ За волны (ee групповой скорости). счет образования положительной пространственной обратной связи (т.к. электроны и электромагнитная волна движутся навстречу друг другу), при превышении током пучка некоторой величины *I*_{CT} называемой стартовым током, автоколебания в ЛОВ возникают даже при отсутствии внешней э.-м. волны и идеальном согласовании входа и выхода замедляющей системы. Частота генерации определяется скоростью движения электронов через замедляющую систему, т.е. величиной ускоряющего напряжения. Основные ограничения на частотный диапазон накладывает амплитудно-частотная характеристика согласования замедляющей системы и выходного тракта ЛОВ. Недостатки ЛОВ вытекают из принципа действия – для обеспечения высоких рабочих частот требуется большое постоянное ускоряющее напряжение и довольно громоздкие высоковольтные источники питания. Также большинства генераторов на основе ЛОВ требуется большое постоянное магнитное поле, которое обычно обеспечивается массивными (более 10 кг) постоянными магнитами с напряженностью поля до единиц тесла. Юстировка и настройка ЛОВ генератора является технически сложной задачей.

Многокаскадные полупроводниковые умножители составляют еще одну большую группу устройств, используемых для получения излучения терагерцового диапазона. Например, успешно применяются умножители на основе квантовых полупроводниковых сверхрешеток (гетероструктур с тонкими периодически чередующимися

эпитаксиальными слоями полупроводников с различной величиной энергетической щели) [8], а также многокаскадные умножители на основе арсенид-галлиевых планарных диодов Шоттки [9, 10]. Обе технологии позволяют получать излучение на частотах до 2.7 ТГц (для многокаскадных умножителей выходная мощность в диапазоне 2.49-2.7 ТГц составляет 2-14 мкВт, в диапазоне от 500 до 900 ГГц более 1 мВт). Конструкция и принцип действия генераторов опорной гармоники для умножителей может быть различной: диоды Ганна, низкочастотный ЛОВ генератор [8], либо комбинация полупроводниковых генераторов с умножителями и мощными высокочастотными усилителями (выходная мощность 400-500 мВт на 100 ГГц) [9, 10]. Доступная выходная мощность излучения после умножителей на много порядков меньше, чем у ЛОВ генераторов того же диапазона, но они более компактны и технологичны, особенно если в качестве опорного источника используются твердотельные генераторы. Чем больше каскадов умножителей применяется в источнике, тем меньше диапазон перестройки частоты. Тем не менее, источники на твердотельных умножителях нашли свою нишу в том числе в космических летательных аппаратах - в составе инструмента HIFI орбитального радиотелескопа "Hershel" [11]. Следует отметить, что технологии изготовления мощных усилителей и умножителей миллиметрового и субмиллиметрового диапазона попадают под экспортные ограничения ряда стран как продукция двойного назначения, поэтому доступность источников, разработанных, скажем, в Jet Propulsion Laboratory (США), крайне ограничена.

Исторически одними из первых источников излучения терагерцового (или дальнего ИК) диапазона являлись газовые лазеры. Они позволяют развить высокую мощность в непрерывном режиме (до нескольких Вт), но имеют громоздкую конструкцию (например, один только лазер накачки на CO_2 может иметь длину резонатора более 1 м, без учета камеры с рабочим газом, например CH_2F_2 или CH_3OH), низкий КПД, и диапазон их непрерывной перестройки вблизи одной резонансной линии обычно не превышает десятка МГц. Выходная мощность газовых лазеров очень чувствительна к флуктуациям температуры и давления рабочего тела, что дополнительно осложняет стабилизацию таких источников. Тем не менее, газовые лазеры используются в лабораториях для исследования шумовых характеристик и стабильности разрабатываемых приемников ТГц диапазона, в частности на основе болометров [12, 13].

Конструкция и принцип действия резонансно-туннельного диода (РТД) впервые описана Тсу и Есаки в 1973 г. [14]. РТД представляет собой эпитаксиальную

гетероструктуру, в которой туннельно-тонкий слой полупроводника с меньшей шириной запрещенной зоны (GaAs) помещается между слоями полупроводника с большей шириной запрещенной зоны (AlGaAs). Энергетические уровни электронов в тонком промежуточном слое (потенциальной яме) квантуются, поэтому туннелирование через барьеры на границе раздела полупроводниковых областей эффективно только тогда, когда энергия носителей совпадает с энергией уровней в яме. Т.е. с ростом приложенного к РТД напряжения в некоторый момент ток через структуру в некоторый момент начинает расти (энергия электронов совпадает с энергией уровней в яме), а затем снова уменьшается, когда уровни энергии в яме и берегах расходятся. То есть на вольт-амперной характеристике образуется область с отрицательной дифференциальной проводимостью, которая может быть использована для создания высокочастотных генераторов. Быстродействие РТД определяется временем туннелирования электронов, которое составляет порядка 10⁻¹⁴ с. На основе РТД были продемонстрированы монохроматические источники, обеспечивающие при комнатной температуре выходную мощность до 7 мкВт на частоте 1.04 ТГц [15, 16], с возможностью перестройки частоты в пределах 4% с помощью напряжения. Крайне маленький диапазон регулировки частоты и малая мощность пока ограничивают применение таких генераторов в реальных устройствах.

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) – сравнительно новый тип генераторов субмиллиметрового диапазона. Первый квантово-каскадный лазер на 75 ТГц был разработан в Лаборатории Белла (Bell Labs) в 1994 г. С тех пор частотный диапазон ККЛ охватил весь средний ИК диапазон от 12 ТГц до 100 ТГц, а в настоящее время ведутся интенсивные исследования с целью понижения нижнего порога генерации в область частот до 1 ТГц. Для промышленного применения ККЛ генераторы терагерцового диапазона пока малопригодны. Технически, также как и резонансно-туннельный диод, ККЛ представляет собой слоистую полупроводниковую структуру из материалов с различной шириной запрещенной зоны (GaAs/AlGaAs), но в отличие от РТД имеет большое число эиптаксиальных слоев. Наилучшие результаты были получены для лазеров, помещенных в волновод «металл-металл», в которых терагерцовое излучение удерживается между металлическими контактами, размещенными непосредственно сверху и снизу на эпитаксиальной активной области толщиной около 10 мкм. Структура энергетических подзон, образованная сверхрешеткой, специально разрабатывается таким образом, чтобы переход электронов между различными энергетическими уровнями в подзоне сопровождался излучением на заданной частоте (рис. 1.2). Диапазон частотной перестройки ККЛ в пределах одной моды обычно составляет 10-20 ГГц, достигаемые за

счет изменения температуры и тока смещения. Современные квантово-каскадные лазеры обладают рядом недостатков: во-первых, им необходима криогенная система охлаждения для обеспечения непрерывного режима работы, во-вторых, существуют серьезные проблемы с частотной стабильностью, диапазоном перестройки частоты и сроком службы, но одной из самых главных проблем является невозможность эффективного согласования структуры ККЛ с линиями передачи или квазиоптическим трактом в ТГц частотном диапазоне. Несмотря на это, генераторы на ККЛ используются в лабораториях, например, в качестве гетеродина для накачки сверхпроводящих болометров [17,18].



а) Профиль зоны проводимости активной области ККЛ на основе GaAs/AlGaAs.
б) Изображение волновода «металл-металл» в сканирующем электронном микроскопе.
в) Расчет интенсивности э.-м. поля в двойном металлическом волноводе.

Рисунок 1.2 – Квантово-каскадный лазер [10].

Существует ряд «фотонных» источников излучения субмиллиметрового диапазона, принцип действия которых основан на использовании излучения одного или нескольких лазеров. Для получения импульсного широкополосного излучения ТГц диапазона используются фемтосекундные импульсные лазеры (в частности, волоконные) в комбинации с нелинейными кристаллами либо полупроводниковыми фотопроводящими антеннами [19]. Для генерации монохроматического непрерывного излучения используются быстрые полупроводниковые фотосмесители с накачкой от двухцветного лазера (двух лазеров). Сверхкороткие времена жизни электронов в материале фотосмесителя позволяют фототоку следовать за мгновенным значением огибающей оптической мощности интерферирующих лучей на поверхности смесителя, содержащей в том числе разностную гармонику исходных сигналов. Фотосмеситель может быть интегрирован, например, в дипольную антенну ТГц диапазона, и с ее помощью передавать ТГц излучение к потребителю через квазиоптический тракт [20].

Конструкция всех описанных генераторов не позволяет использовать их в интегральных устройствах. При использовании в качестве гетеродина задача по доставке мощности от этих генераторов к смесителю решается либо путем внесения изменений в квазиоптический тракт приемника, либо за счет отдельного волновода, согласованного со смесительной камерой.

1.2 Сверхпроводниковые джозефсоновские генераторы

В 1962 году Б. Джозефсон теоретически предсказал эффекты, возникающие при взаимодействии двух сверхпроводников со слабой связью, т.е. соединенных сверхпроводящей областью с малым критическим током (точечный контакт, тонкий мостик и т.п.), либо разделенных тонким диэлектрическим слоем. Нестационарный эффект Джозефсона заключается в том, что при приложении к переходу внешнего постоянного напряжения V_{dc} через переход протекает не только постоянный ток, но и быстро осциллирующий сверхток с частотой

$$f=2eV_{dc}/h,\tag{1.1}$$

где *е* – заряд электрона, *h* – постоянная Планка. Линейная зависимость частоты от напряжения (483,6 ГГц/мВ) позволяет создавать на основе джозефсоновских переходов генераторы, управляемые напряжением. Потенциальный диапазон перестройки частоты таких генераторов ограничен сверху лишь величиной сверхпроводниковой энергетической щели электродов джозефсоновского контакта (что составляет около 1,5 ТГц для Nb и около 3 ТГц для NbN).

Одиночный сосредоточенный джозефсоновский переход обладает в качестве генератора рядом недостатков. Во-первых, это очень маленькая предельная мощность. Поскольку рабочее напряжение (в силу соотношения Джозефсона (1.1)) составляет

порядка 1 мВ, то даже переход с рабочим током около 100 мкА (что является довольно высоким значением) при 100% КПД обеспечит не более 100 нВт СВЧ мощности. Вовторых, собственный выходной импеданс планарных переходов имеющих высокую плотность критического тока очень низкий, менее 1 Ом, что затрудняет согласование такого генератора с полезной нагрузкой (типичное значение R ~ 50 Ом). В-третьих, ширина линии излучения такого генератора определяется широкополосными шумами, имеет лоренцевскую форму спектра, и в зависимости от типа перехода и рабочей точки ВАХ может составлять сотни МГц. Основные преимущества генераторов на основе низкотемпературных сверхпроводников – широкий диапазон перестройки частоты, ограниченный только диапазоном частотного согласования генератора и нагрузки, низкое энергопотребление, возможность изготовления генератора в едином технологическом цикле на общей подложке с антенной и смесителем на основе перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник.

Для преодоления указанных выше трудностей был предложен ряд подходов. В частности, были разработаны источники на основе последовательно включенных цепочек джозефсоновских переходов, интегрированных в микрополосковую линию [21] или в антенную матрицу [22]. Если все переходы цепочки синхронизированы, выходная мощность растет пропорционально количеству переходов, а ширина линии излучения, соответственно, уменьшается. С ростом количества переходов в массиве возрастают и требования к технологической воспроизводимости образцов, разбросу параметров отдельных переходов в массиве. Из-за указанных сложностей генераторы на массивах переходов не получили широкого практического распространения.

Однако следует отметить, что совсем недавно были получены новые результаты по синхронному излучению из мез высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) [23, 24]. Кристалл ВТСП представляет собой слоистую структуру (500-2000 слоев в исследованных образцах), в которой из-за пространственных особенностей симметрии сверхпроводникового параметра порядка между сверхпроводящими слоями образуется слабая связь, и весь кристалл образует массив последовательно включенных джозефсоновских переходов. Была продемонстрирована когерентная генерация таких ВТСП структур при температурах выше 40 К на частоте до 750 ГГц. Тем не менее, как и в случае квантово-каскадных лазеров пока не решена проблема эффективного согласования таких структур с полезной нагрузкой. Кроме того, такой генератор не может быть интегрирован с высокочувствительными сверхпроводящими приемниками, как по

причинам технологической несовместимости, так и вследствие температурных ограничений: при низких температурах генерация не наблюдается.

1.3 Генераторы на основе распределенных джозефсоновских переходов

Предметом исследования данной диссертации являются генераторы на основе распределенных джозефсоновских переходов (РДП). РДП обеспечивает достаточную мощность для накачки смесительного элемента на основе перехода сверхпроводникизолятор-сверхпроводник (~ 0,5 – 1 мкВт), частота генерации линейно зависит от напряжения, он совместим с технологической процедурой изготовления интегральных сверхпроводниковых микросхем и может быть интегрирован на одной схеме с антенной и смесительным элементом, и, кроме того, такой генератор обладает низким энергопотреблением (~ 30 мкВт).

1.3.1 Конструкция и принцип действия

В литературе авторы по-разному ссылаются на джозефсоновские переходы с большой протяженностью по одному из геометрических размеров: их называют и просто «большими», и «широкими», и «длинными», но наименование «распределенные переходы» является наиболее универсальным для большинства авторов. При этом подразумевается, что джозефсоновский переход становится «распределенным», когда один из его размеров (значительно) превышает глубину проникновения магнитного поля в переход

$$\lambda_j = \left(\frac{c\Phi_0}{8\pi^2 j_c d}\right)^{1/2},\tag{1.2}$$

где c – скорость света, $\Phi_0 = (hc/2e)$ – квант магнитного потока, j_c – критическая плотность тока перехода, d – толщина перехода. В таком случае фаза сверхпроводящей функции (а, следовательно, и ток через переход) зависит от координаты. Кроме того, наиболее распространенная конструкция РДП с перекрывающимися электродами эквивалентна микрополосковому резонатору, т.е. является также высокочастотной линией передачи с распределенными параметрами.

Как известно [25-26], магнитное поле проникает в джозефсоновский переход в виде вихрей – через «сердцевину» которых проходит ровно один квант магнитного потока Φ_0 , экранированный замкнутыми кольцевыми незатухающими токами. Если в сверхпроводниках второго рода вихрь имеет правильную цилиндрическую структуру, размеры которой определяются параметрами ξ и λ теории Гинзбурга-Ландау, то в джозефсоновском переходе вихрь, или флаксон, сильно вытянут вдоль границы перехода вследствие того, что глубина проникновения магнитного поля в материал электродов λ_L на несколько порядков меньше глубины проникновения поля в область слабой связи λ_J . Поэтому, говоря о размере джозефсоновского вихря, обычно подразумевают только размер вдоль границы перехода, равный 2-4 λ_J . Как и в сверхпроводниках второго рода, под воздействием транспортного тока вихри в переходе приходят в движение, что приводит к появлению постоянного напряжения на переходе. Отражаясь или разрушаясь на краю джозефсоновского перехода, вихрь может генерировать импульс напряжения. Этот эффект лежит в основе генераторов на основе распределенных джозефсоновских переходов.

Резонансный флаксонный генератор [27] представляет собой распределенный джозефсоновский переход, помещенный в слабое или нулевое внешнее магнитное поле, в котором один флаксон под действием транспортного тока движется от одного края перехода к другому, где отражается как антифлаксон (вихрь, в котором вектор магнитного потока направлен в противоположную сторону) и движется под действием тока смещения в обратном направлении. Частота такого генератора определяется скоростью движения вихря в переходе и длиной перехода, f = u/2L, где u – средняя скорость вихря, L – длина перехода.

Наибольшее распространение получили генераторы на основе распределенных переходов, помещенных в постоянное магнитное поле, ориентированное в плоскости перехода. В таких генераторах реализуется однонаправленное движение цепочки джозефсоновских вихрей (англ. наименование "flux-flow oscillator") и возможно раздельное управление частотой и мощностью излучения (рис. 1.3 а). Первоначально были разработаны и исследовались одномерные теоретические модели распределенных переходов. При этом направление тока смещения выбиралось продольно, от одного узкого торца перехода к другому (рис. 1.3 б) – так называемая «линейная», или «in-line» модель перехода [28, 29]. Для обозначения переходов, у которых ток смещения задается перпендикулярно большему из размеров (поперечное задание тока), используется название «переход с перекрывающейся геометрией», или «overlap geometry» (рис. 1.3 в). В дальнейшем было показано [30], что качественно такие геометрии не различаются, хотя небольшие количественные отличия имеются. Тем не менее, очевидно, что в переходах с продольным заданием тока магнитное самовоздействие намного сильнее (изменение

магнитного поля в переходе при изменении тока смещения), поэтому теоретический и практический интерес к сравнительным исследованиям спектральных характеристик переходов с различной схемой задания питания сохраняется до настоящего времени [31-33].

Отметим, что распределенные джозефсоновские переходы могут быть изготовлены не только в виде туннельного барьера в области перекрытия сверхпроводящих электродов. Например, при использовании высокотемпературных сверхпроводников, стандартные технологические методики (бикристаллические переходы, переходы на ступеньке stepedge; сюда же можно отнести некоторые наклонные переходы, или "ramp junction") обеспечивают получение области слабой связи между торцами сверхпроводящих пленок, без образования микрополосковой линии [34]. Автор полагает, что именно таким переходам лучше бы подошло название «линейных», или «in-line», т.к. электроды лежат в одной плоскости, ток протекает последовательно через первый электрод перехода, затем через область слабой связи, и втекает во второй электрод, не меняя линий тока в области контакта из-за эффектов экранирования поля, в противовес туннельным переходам (в т.ч. межслойным джозефсоновским переходам в ВТСП), для которых название «overlap», «перекрывающийся» естественным образом описывает геометрическую конфигурацию. Тем не менее, данная терминология сформировалась задолго до открытия эффекта высокотемпературной сверхпроводимости в 1987 г.



a) Модель распределенного джозефсоновского перехода в разрезе, б) переход с продольной инжекцией тока (in-line), в) переход с поперечной инжекцией тока (overlap).



1.3.2 Технология изготовления

Предметом исследования данной работы являются распределенные джозефсоновские флаксонные генераторы, изготовленные на базе трехслойных структур низкотемпературный сверхпроводник-изолятор-низкотемпературный сверхпроводник. В работе исследованы переходы на базе трехслойных структур Nb-AlO_x-Nb и Nb-AlN-NbN. Применяемая методика изготовления – селективное травление и анодизация ниобия (англ. SNEAP – selective niobium etching and anodization process).

Важной особенностью технологической процедуры является двухступенчатая последовательность изготовления окон СИС переходов, используемых в качестве детекторных, так называемый метод изготовления «крестом», при котором область перехода формируется на пересечении двух полосок размерами 1 х 6 мкм. Применение данного метода необходимо для более точного и качественного изготовления детекторных

переходов, размер которых составляет около $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ и является предельным для используемого литографического оборудования. При использовании «традиционного» метода с одним квадратным окном $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ изготовленный переход имеет практически круглую форму. Напыление изоляции проводится также в два этапа – это обусловлено конструкцией СВЧ тракта между РДП и детектором с различной толщиной диэлектрика. Перечислим основные технологические этапы изготовления тестовых схем. Подробное описание можно найти в работах [35-37].

На кремниевой подложке толщиной 500 мкм формируется буферный стоп-слой Al₂O₃ толщиной 1000 Å, на котором контактной оптической литографией создается маска из фоторезиста, определяющая топологию будущего нижнего слоя металлизации. По маске формируется трехслойная структура сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (рис. 1.4 a). Типичная толщина слоев: 2000 Å (нижний слой сверхпроводника) – 70 Å (металл-оксидный или металл-нитридный барьерный слой) – 1000 Å (верхний слой сверхпроводника). После этого резист «взрывается» (удаляется в растворителе, в т.ч. в ультразвуковой ванне) вместе с «лишней» металлизацией; трехслойная структура остается только в пределах нижнего слоя топологии микросхемы (М1). Затем в фоторезисте определяется геометрия первого окна туннельных контактов малой площади, а также топология распределенных переходов (первый шаг метода изготовления «крестом»). На остальных участках, не закрытых маской, верхний сверхпроводниковый слой трехслойной структуры полностью удаляется плазмохимическим травлением. Для защиты торцов переходов проводится анодирование (толщина анодного окисла Nb₂O₅ составляет около 250 Å). После этого методом магнетронного распыления осаждается первый слой диэлектрика SiO₂ толщиной ~ 2000 Å (рис. 1.4 б). Резист взрывается в растворителе (ацетон, диметиформамид). После этого снова наносится фоторезист и формируется второе окно для уточнения геометрии переходов малой площади. Проводится ионное травление, при котором удаляются остатки верхнего слоя металлизации трехслойки вблизи областей переходов, а также происходит стравливание первого слоя изоляции до толщины ~ 1500 Å. Еще раз проводится анодизация торцов, наносится второй слой изоляции SiO₂, толщиной 2500 Å. Затем методом взрывной фотолитографии формируется верхний слой металлизации («замыкатель»), толщиной 4000 – 6000 Å (рис. 1.4 в). На последнем этапе осаждается золотое покрытие контактных площадок (для улучшения адгезии используется подслой алюминия).



Рисунок 1.4 – Схематическое изображение основных технологических этапов изготовления туннельных переходов

1.3.3 Теоретические модели

Уравнение синус-Гордона

Необычные свойства туннельных контактов сверхпроводник-изоляторсверхпроводник, предсказанные в 1962 г. Б. Джозефсоном [38] очень быстро получили экспериментальное подтверждение и привлекли широкий научный интерес. Вскоре основное уравнение джозефсоновского перехода без учета электромагнитных потерь было получено различными авторами на основе уравнений Максвелла в области перехода (в частности, самим Б. Джозефсоном опубликовано, например, в обзоре 1965 г. [39]):

$$\Delta \varphi - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{1}{\lambda_j^2} \sin \varphi, \qquad (1.3)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ двумерный оператор Лапласа по координатам *х*, *у* в плоскости туннельного барьера, φ – фаза сверхпроводящей функции, λ_j - глубина проникновения магнитного поля в джозефсоновский переход, выражение для которой приведено выше в φ . (1.2), c_o – скорость распространения электромагнитного возмущения в области туннельного контакта (будет обсуждаться подробнее в дальнейшем),

$$c_o = c/(4\pi lC)^{1/2}$$
(1.4)

где с – скорость света в вакууме, $l = d + \lambda_1 + \lambda_2 - эффективная магнитная толщина барьера, С – удельная емкость туннельной структуры на единицу площади.$

Уравнение (1.3) является нелинейным уравнением в частных производных, поэтому получить общее аналитическое решение не удается. Тем не менее, некоторые граничные случаи можно рассмотреть аналитически, а в остальных – использовать численные методы. Уравнение (1.3) называют уравнением синус-Гордона, по аналогии с уравнением Клейна-Гордона, которое не содержит в правой части нелинейного члена от неизвестной функции.

Традиционно уравнение (1.3) записывают в безразмерных переменных. Для этого сделаем следующую замену:

$$x' = x/\lambda_j, \qquad y' = y/\lambda_j, \qquad t' = \frac{c_0 t}{\lambda_j} = \omega_p t,$$
 (1.5)

здесь ω_p – плазменная частота. По аналогии вводятся также нормированные единицы для напряженности электрического поля, магнитного поля и энергии. Уравнение (1.3) принимает следующий вид:

$$\Delta \varphi - \varphi_{tt} = \sin \varphi. \tag{1.6}$$

В стационарном случае, когда решение не зависит от времени, уравнение (1.3) переходит в уравнение Феррела-Прейнджа [40]

$$\Delta \varphi = \frac{1}{\lambda_j^2} \sin \varphi. \tag{1.7}$$

Это уравнение имеет два важных решения: в приближении слабого внешнего поля изменение фазы в переходе мало и можно в (1.7) заменить sin $\varphi \sim \varphi$. При этом решение

$$\varphi(\mathbf{x}) = \varphi(0) \exp(-\mathbf{x}/\lambda_{j}) \tag{1.8}$$

дает экспоненциальное спадание поля в переходе.

При сильных внешних полях в переход проникают сверхпроводящие вихри, содержащие квант магнитного потока (джозефсоновские вихри), и одно из решений имеет вид

$$\varphi_0(\mathbf{x}) = 4 \arctan (\mathbf{x}/\lambda_i). \tag{1.9}$$

Вид функций $\varphi_0(x)$, $d\varphi_0/dx \sim H(x) u d^2 \varphi_0/dx^2 \sim j_S$ приведен на рис. 1.5 по [26]. Отметим, что $H_{max} = \frac{1}{2}\pi H_{c1} \sim 1.6$ H_{c1} , где $H_{c1} -$ поле, при котором начинается проникновение вихрей в переход.



Рисунок 1.5 – Распределение а) разности фаз, б) магнитного поля и в) сверхтока для джозефсоновского вихря (см. [26]).

Видно, что вихрь локализован в области порядка 2 λ_j, при этом в области вихря фаза сверхпроводящей функции меняется на 2π (так называемый «кинк»).

Если рассмотреть решения уравнения синус-Гордона (1.6), зависящие от разности *x*- $\beta t = \xi$, где $\beta = v/c_o$, v – скорость движения вихря, то после дополнительной замены переменных $\zeta = \xi/(1 - \beta^2)^{1/2}$ можно свести уравнение синус-Гордона к уравнению Феррела-Прейнджа [41]. Раскрывая переменные после замены и подставляя в решение (1.9) получим

$$\varphi_0(x,t) = 4 \operatorname{arctg} \exp \frac{x - \beta t}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$
(1.10)

Здесь $\phi_0 = 0$ для х $\to\infty$, $\phi_0 = 2\pi$ при х $\to -\infty$ и решение соответствует движению солитона в (бесконечном) переходе. Соответственно, выражение для напряженности электрического и магнитного полей:

$$H = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \operatorname{ch}^{-1} \frac{x-\beta t}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad E = -\frac{2\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \operatorname{ch}^{-1} \frac{x-\beta t}{\sqrt{1-\beta^2}}$$
(1.11)

Решения уравнения синус-Гордона для случая согласованного движения цепочки вихрей обычно получают численно. При численном решении можно учесть потери в диэлектрике барьерного слоя и в электродах джозефсоновского контакта, а также распределение тока смещения. Уравнение (1.6) с учетом потерь и протекающего через переход тока смещения называется возмущенным уравнением синус-Гордона. В одномерном случае с учетом граничных условий на краях длинного перехода его можно записать [42] в виде:

$$\begin{cases} \varphi_{xx} - \varphi_{tt} - \sin \varphi = \alpha \varphi_t - \beta \varphi_{xxt} - \gamma, \\ \varphi_x(0, t) + \beta \varphi_{xt}(0, t) = -\Gamma_e, \\ \varphi_x(L, t) + \beta \varphi_{xt}(L, t) = -\Gamma_e - \varphi_t(L, t) / R_{Load} \end{cases}$$
(1.12)

Здесь безразмерные параметры $\alpha = G/\omega_p C'$ и $\beta = \omega_p L'/R_s$ (L' и C' – удельные индуктивность и емкость перехода) отвечают соответственно за квазичастичные потери в диэлектрике и поверхностные потери в электродах перехода, а член $\gamma(x)$ представляет плотность тока смещения вдоль перехода, нормированную на плотность критического тока перехода. Γ_e – нормированная величина внешнего магнитного поля на краях перехода, R_{Load} – импеданс нагрузки, подключенной к выходному концу перехода, нормированный на характеристический импеданс перехода

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \frac{120\pi}{W\sqrt{\varepsilon_i}} \sqrt{d_i(d_i + \lambda_{L1} + \lambda_{L2})}$$
(1.13)

Уравнение синус-Гордона позволяет исследовать динамику распространения вихрей в переходе, а также, при усреднении по времени и координате, позволяет получить вольт-амперные характеристики переходов, близкие к наблюдаемым экспериментально [42-44].

Скорость распространения электромагнитных возмущений (скорость Свайхарта)

Остановимся немного подробнее на скорости распространения электромагнитных волн в распределенном джозефсоновском переходе, поскольку эта величина определяет характеристики геометрических резонансов в переходе.

Хотя уравнение синус-Гордона получено с учетом электродинамических свойств джозефсоновского перехода и является достаточно общим, в практических численных расчетах неизбежно пренебрегают топологией контакта, используя только удельные значения емкости и индуктивности туннельного контакта. При этом для скорости распространения электродинамического возмущения получается выражение вида (1.4).

В работе Дж. Свайхарта 1961 г. (еще до предсказания эффекта Джозефсона) [46] проведен характера распространения электромагнитного анализ излучения В сверхпроводниковой микрополосковой линии. Ha основе уравнения Лондона, двухжидкостной модели Казимира, в приближении относительно низких частот («локальный предел» - нормальный скин-эффект для несверхпроводящих электронов), а также пренебрегая потерями в сверхпроводнике было получено, в том числе, выражение для скорости распространения э.-м. волны в таком волноводе

$$c_0' = c \left(\frac{d_i}{\varepsilon l}\right)^{1/2},\tag{1.14}$$

где c – скорость света в вакууме, ε – диэлектрическая проницаемость изолятора, d_i – толщина слоя изолятора, l – толщина магнитного зазора, определяющаяся выражением:

$$l = d_i + \lambda_1 \operatorname{cth}\left(\frac{d_1}{\lambda_1}\right) + \lambda_2 \operatorname{cth}\left(\frac{d_2}{\lambda_2}\right), \qquad (1.15)$$

d_i – толщина изолятора, *d*_{1,2} – толщины верхней и нижней сверхпроводящих пленок, *λ*_{1,2} – глубина проникновения магнитного поля, соответственно в верхний и нижний сверхпроводник. Работа [46] получила широкую известность, из-за чего не только

величину (1.14), но и вообще скорость распространения электромагнитных волн в распределенных переходах часто называют скоростью Свайхарта.

Технологически сложно изготовить качественный распределенный джозефсоновский переход, у которого верхний и нижний электрод перекрывались бы только в области туннельного контакта. Из-за этого обычно РДП представляет собой три сверхпроводниковые микрополосковые линии, идущие параллельно (см. рис. 1.6). В центральной области толщина диэлектрика d_1 составляет 10-20 Å – это область туннельного барьера с диэлектрической проницаемостью ε_1 , а по краям толщина диэлектрика d_2 составляет тысячи ангстрем (~ 2000 Å в наших экспериментальных структурах) и диэл. проницаемость ε_2 . В работе Ли и Барфкнехта [47] для таких линий передачи показано, что скорость распространения колебаний на низких частотах определяется, в основном, отношением ширины областей с различной толщиной диэлектрика W_1 и W_2 :

$$c_0^{\prime\prime} = c \left(\frac{\frac{W_1 \epsilon_1}{d_1} + 2\frac{W_2 \epsilon_2}{d_2}}{\frac{W_1}{l_1} + \frac{2W_2}{l_2}} \right)^{-\frac{1}{2}},$$
(1.16)

где W₁, W₂ - ширина соответствующих областей, d₁, d₂ – толщина диэлектрика, $\varepsilon_{1,}$ ε_{2} – диэлектрическая проницаемость, l_{1} и l_{2} – эффективный магнитный зазор, вычисляемый по формуле, аналогичной (1.15), но с учетом частотной зависимости глубины проникновения $\lambda_{1,2}(\omega)$.

На высоких частотах зависимость волнового вектора от частоты для неоднородной структуры (рис. 1.6) определяется одновременным выполнением следующих уравнений:

$$k_x^2 = \frac{\omega^2}{c_1^2} - k_1^2 = \frac{\omega^2}{c_2^2} + k_2^2,$$

$$\frac{k_1}{l_1} tg\left(\frac{k_1 W_1}{2}\right) = \frac{k_2}{l_2} tgh(k_2 W_2),$$
(1.17)

где k_1 и k_2 – волновые векторы квази-поперечной моды в областях 1 и 2 соответственно. Данное выражение определяет закон дисперсии волн в распределенном джозефсоновском переходе. Резонансное условие для стоячих волн в резонаторе перехода (ступени Фиске), обычно записывается как

$$V_n = \frac{h}{2e} f_n = \frac{h}{2e} \left(\frac{c_0 n}{2L} \right), \tag{1.18}$$

где V_n – напряжение смещения соответствующее *n*-ой ступени, *n* – номер ступени (целое число), f_n – резонансная частота n-ой ступени, *L* – длина перехода. Наличие геометрической дисперсии приводит к тому, что выражение (1.18) становится частотно зависимым – с ростом напряжения расстояние между ступенями Фиске уменьшается.



Рисунок 1.6 – Схема джозефсоновской линии передачи из [47] (а - вид сверху, b - в разрезе).

В заключении раздела отметим, что на практике значения скорости, вычисленные по ф. (1.4), (1.14) и (1.16) довольно близки и примерно в 40 раз меньше скорости света в вакууме.

Ограничения модели синус-Гордона

Уравнение синус-Гордона в качестве неизвестной функции содержит только фазу сверхпроводящей функции, поэтому эффекты, приводящие к изменению концентрации сверхпроводящих носителей в явном виде не учитываются. Важнейшими из таких эффектов являются самонакачка (поглощение излученной СВЧ мощности в распределенном переходе), изменение температуры распределенного джозефсоновского перехода (даже вдали от критической температуры), а также взаимодействие с излучением, энергия кванта (частота) которого превышает энергию сверхпроводящей щели в электроде перехода. В практических расчетах вводят частотно-зависимые параметры затухания α и β в возмущенном уравнении синус-Гордона (1.12), которые отвечают за потери в переходе (ток утечки) и поверхностные потери в электродах РДП соответственно.

Кроме того, для полного описания параметров переходов необходимо учитывать электродинамическое окружение РДП (параметры сопряженной микрополосковой линии, наличие нагрузки и отраженной от нее волны), а для этого требуется одновременно решать трехмерную электродинамическую задачу и двумерное уравнение синус-Гордона, что сопряжено со значительными вычислительными сложностями. Такое моделирование проводилось, в частности, Хапаевым и Куприяновым – в работах [48-49] ими были исследованы профили растекания тока вблизи области распределенного джозефсоновского перехода.

Влияние флуктуаций на ширину линии излучения РДП

Одной из важнейших характеристик гетеродина является спектральная плотность мощности фазовых шумов. Теоретически и экспериментально показано, что спектральная форма линии генерации распределенных джозефсоновских переходов имеет лоренцевскую форму с полушириной от сотен килогерц до десятков мегагерц [58, 59]. Лоренцевский спектр и сравнительно большая ширина линии усложняют процесс внедрения РДП в приемниках высокого разрешения и интерферометрах со сверхдлинной базой, исследование возможностей уменьшения ширины линии генерации РДП являлось одной из основных задач данной работы.

Теоретический анализ, проведенный различными авторами и обобщенный в [50, 51] для сосредоточенного контакта позволяет получить, в частности, следующее выражение для ширины автономной линии излучения:

$$\delta f = R_d^2 S_I(0), \tag{1.19}$$

где δf – ширина линии генерации, $S_I(0)$ – низкочастотная плотность флуктуаций тока, $R_d = dV/dI$ – дифференциальное сопротивление перехода (V и I – средние по времени ток и напряжение на переходе). Для туннельных контактов выражение для $S_I(0)$ можно записать в следующем виде:

$$S_{I}(0) = \frac{1}{\pi \bar{\nu}} \Big[k_{B} T \bar{I_{N}} + \frac{h\nu}{2} cth \frac{e\bar{\nu}}{k_{B}T} \bar{I_{S}} \Big], \qquad (1.20)$$
$$\bar{I_{S}} + \bar{I_{N}} = \bar{I}$$

*I*_S и *I*_N - сверхпроводящая и нормальная компоненты тока.

В частном случае «чистых» контактов при больших напряжениях ф. (1.20) можно свести к выражению

$$S_I(0) = \frac{1}{2\pi} \left[e \overline{I_N} + 2e \overline{I_S} \right], \tag{1.21}$$

которое можно трактовать как дробовой шум потоков «нормальных» электронов с зарядом *e* и куперовских пар с зарядом 2*e*, хотя эта аналогия и не вполне корректна в общем случае.

Попытка применить выражение (1.19) непосредственно для распределенных переходов приводит к значительному отклонению от экспериментальных данных [64]. В работе А.Л. Панкратова [52] было показано теоретически, а в опубликованной практически одновременно статье В.П. Кошельца и др. [53] - экспериментально, что при рассмотрении дифференциального сопротивления распределенного джозефсоновского перехода в (1.19) нельзя пренебрегать зависимостью напряжения на переходе от внешнего магнитного поля, а, следовательно, от тока задающего это магнитное поле. Следующее выражение (1.22) с одним подгоночным коэффициентом *K*, величина которого зависит от конструкции конкретного перехода и определяется эмпирически, позволяет получить хорошее согласование с экспериментом [53]:

$$R_d = R_d^B + K R_d^{CL} = \frac{\partial V}{\partial I_B} + K \frac{\partial V}{\partial I_{CL}},$$
(1.22)

где R_d^B и R_d^{CL} – дифференциальное сопротивление РДП соответственно по току смещения и току контрольной линии, задающей магнитное поле.

В теоретической работе [54] предложен другой вариант модификации выражения (1.19) для описания ширины линии РДП с помощью дополнительного постоянного численного множителя р, зависящего от типа перехода.

$$\delta f = \rho R_d^2 S_I(0), \tag{1.23}$$

Как будет показано в дальнейшем, для исследованных переходов дифференциальные сопротивления $R_d^B u R_d^{CL}$ зачастую связаны линейным соотношением, и в таком случае множитель р в (1.23) полностью эквивалентен коэффициенту *K* в (1.22). Это также отражает тот факт, что эффект самовоздействия (ток смещения, растекаясь вдоль перехода, вносит вклад в магнитное поле) не позволяет корректно определить R_d по вольт-амперной характеристике.

1.3.4 Практическое внедрение РДП

С точки зрения внедрения РДП в качестве гетеродина, пригодного для использования в когерентных приемниках совместно с СИС смесителем, необходимо выделить следующий пионерский цикл работ Нагатсумы, Энпуку и др. [55-58]. В данном цикле была экспериментально продемонстрирована возможность согласования РДП с СИС смесителем посредством емкостной развязки, экспериментально показано, что мощности излучения РДП достаточно для накачки СИС смесителя в диапазоне 100 – 400 ГГц, проведено численное моделирование на базе уравнения синус-Гордона, экспериментально показано, что топология перехода влияет на крутизну вольт-амперных характеристик, а следовательно на ширину линии генерации; исследованы РДП генераторы с тонким верхним электродом (толщина порядка лондоновской глубины) – для них продемонстрирована возможность накачки СИС смесителей, изготовленных непосредственно на поверхности верхнего тонкопленочного электрода перехода за счет «просачивания» СВЧ излучения РДП сквозь верхний электрод.

Дальнейшее развитие концепция интеграции РДП с СИС смесителем получила в работах группы исследователей под рук. проф. В.П. Кошельца [59-66], Были изготовлены образцы приемников с рабочими частотами в диапазоне 400 - 650 ГГц как с волноводной компоновочной схемой [59], так и с квазиоптической [60]; разработан прототип матричного семиэлементного квазиоптического супергетеродинного приемника с РДП генераторами [61]. Исследованы диаграммы направленности линзовых антенн элементов матрицы, шумовая температура приемника в целом. Исследованы шумовые характеристики гетеродина на основе РДП [62], предложена схема стабилизации частоты распределенного джозефсоновского перехода с помощью внешней системы ФАПЧ [63-64]. Обнаружена сверхтонкая резонансная структура с периодом ~ 19 нВ на вольтамперной характеристике РДП [65], вызванная образованием акустической стоячей волны

в кремниевой подложке микросхемы (объяснение и экспериментальное исследование эффекта выполнено позднее).

В 2003 году началась работа над международным проектом TELIS (Terahertz and Submillimeter Limb Sounder) [A3]. В рамках данного проекта планировалась разработать трехдиапазонный спектрометр для исследования атмосферы в режиме лимбового зондирования с платформы высотного аэростата MIPAS-В (высота подъема до 35 км). Инструмент TELIS использует общее асферическое зеркало с управляемым наклоном, сигнал с которого разделяется с помощью диплексоров на три измерительных канала: 500 ГГц, 490-630 ГГц, 1.8 ТГц. За разработку каждого канала отвечали различные организации: 500 ГГц (СИС-смеситель) – Appleton Rutherford Laboratories (Англия), 490-630 ГГц (интегральный приемник с РДП) – SRON Netherlands Institute for Space Research (Нидерланды), 1.8 ТГц (болометр на эффекте разогрева электронного газа) – Deutsches Luft- und Raumfahrt (Германия). Коллектив сотрудников ИРЭ им. Zentrum fur В.А. Котельникова РАН принимал активное участие в разработке, испытаниях и эксплуатации второго частотного канала 490 - 630 ГГц, построенного на базе сверхпроводниковых интегральных микросхем, разработанных и изготовленных в ИРЭ РАН. Первоначально базовая частотная полоса второго канала была выше, в диапазоне 600-650 ГГц, с возможностью расширения диапазона до 500-650 ГГц в случае успешной реализации сверхпроводникового интегрального приемника, но из-за проблем и задержек при проектировании первого частотного канала на 500 ГГц в английской группе, было принято решение о смещении приоритетного диапазона второго канала в область 500 ГГц.

Данная диссертация посвящена исследованиям распределенных джозефсоновских генераторов, которые были выполнены в рамках работ над проектом TELIS. Основные задачи:

- Разработка и исследование интегральных генераторов на основе распределенных джозефсоновских туннельных переходов, характеристики которых удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к гетеродинам для атмосферной спектрометрии (и радиоастрономии) в диапазоне 450 – 650 ГГц.
- Исследование влияния электрофизических и топологических параметров туннельных переходов на спектральные характеристики генерации известных ранее переходов на основе структур Nb-AlOx-Nb. Исследование пределов возможной оптимизации генераторов на таких переходах.

 Исследование новых типов распределенных генераторов на основе материалов с щелевым напряжением, отличным от ниобия, для расширения области применения РДП в качестве интегрального генератора гетеродина. Определение электрофизических параметров переходов нового типа и их спектральных характеристик в субтерагерцовом частотном диапазоне.

Следует отметить, что основные результаты были получены в период с 2004 по 2010 годы, тем не менее, результаты исследований до сих пор остаются актуальными, поскольку новых теоретических и экспериментальных данных за последние годы опубликовано не было.

Глава 2. Методы экспериментальных исследований

Примечание: при изложении материала в данной главе автор старался сделать ее методически полезной для студентов, проходящих дипломную практику в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

2.1 Методы подключения образцов

Основным объектом экспериментальных исследований являлись тестовые интегральные микросхемы, изготовленные в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (Дмитриевым П.Н. и Филиппенко Л.В.) – см. рис. 2.1. Технология изготовления подробно описана в работах [35-37], а также была кратко изложена в главе 1. Образцы изготавливались на кремниевой подложке толщиной 0,5 мм, размер тестовых схем для исследования РДП – 4,2 х 3 мм, размер тестовых схем интегрального приемника – 4 х 4 мм.



(a)

0 5 - D21-C1 T4 J - IREE

(б)

Рисунок 2.1 – Фотографии экспериментальных образцов. а) Фотография тестовой микросхемы для исследования РДП (инвертированные цвета), размер 4,2 х 3 мм б) Образец тестовой схемы интегрального приемника с дипольной антенной,

размер 4 х 4 мм.

Первая проблема, с которой сталкивается любой экспериментатор – обеспечить электрическое подключение образцов к измерительной установке. Выбранный метод
должен позволять оперативно заменять образцы и обеспечивать надежное соединение при охлаждении до температур жидкого гелия. При выполнении данной работы применялось четыре метода: прижимной пружинный контакт, проволочный контакт с серебряной пастой, ультразвуковая сварка и крепление методом перевернутого кристалла (англ. flip chip).

Прижимной пружинный контакт

Самым традиционным методом подключения является проволочный контакт. Несмотря на то, что размер контактных площадок микросхемы не превышает 0,5 х 0,5 мм данный метод позволяет довольно быстро, используя только обычный лабораторный микроскоп, установить исследуемый образец в измерительную головку. В качестве материала для контактов обычно используется тонкая проволока из фосфорной бронзы (диаметром 0,1 – 0,2 мм), которая даже при охлаждении до 4 К сохраняет некоторую эластичность.

Фотография держателя образца для исследования вольт-амперных характеристик приведена на рисунке 2.2. Между верхней и нижней деталями головки может быть использована прокладка (из текстолита, пластика и т.п.) Это позволяет упростить процедуру изготовления контактов, а также, в случае необходимости, исследовать образцы, изготовленные на подложках разной толщины (в нашем случае несколько серий микросхем были изготовлены на подложках толщиной 300 мкм; стандартная толщина - 500 мкм). Исследуемый образец в такой головке может удерживаться за счет давления проволочных контактов, без дополнительного крепления.



Рисунок 2.2. – Фотография измерительной головки для исследования вольт-амперных характеристик РДП и СИС переходов.

Преимущества данного метода - быстрота установки и снятия образцов, многократное использование головки, процедура измерения практически безопасна для образца, не требует специальной подготовки

К недостаткам метода можно отнести недостаточную надежность подключения: механическая деформация игольчатых контактов при охлаждении до криогенных температур может привести к разрыву соединения. Также, в некоторых случаях иголки могут повредить покрытие контактных площадок (особенно при плохой адгезии покрытия). При плотном расположении контактных площадок возможны ошибочные подключения, если минимальный размер площадки составляет менее 0,25-0,3 мм.

Мягкий проволочный контакт

При исследовании спектральных характеристик распределенных джозефсоновских переходов использовалась специальная измерительная головка, рис. 2.2. Образец фиксировался на медной подложке с помощью расплавленного воска. Высокочастотный контакт, выполненный из медной фольги, припаянной к микрополосковой линии, выполнял также функцию дополнительного механического прижима образца, а все остальные электрические контакты (по постоянному току) были выполнены из мягкой медной проволоки диаметром 0.1 мм, которая фиксировалась к контактным площадкам микросхемы с помощью капель серебряной краски.

Указанный метод подключения обеспечивает надежное электрическое соединение, но является технически сложным. Если при нанесении серебряной краски капля растекается, необходимо отмывать образец с помощью ацетона и начинать процедуру установки заново.



Рисунок 2.3 – Эскиз держателя образца для измерения спектральных характеристик распределенного джозефсоновского перехода.

Крепление методом перевернутого кристалла

Крепление методом перевернутого кристалла (англ. «flip chip») применяется в промышленности при изготовлении (при корпусировании) интегральных схем и других полупроводниковых приборов. В лаборатории указанный метод был применен при исследовании микросхем интегрального приемника при температуре жидкого гелия (Т = 4,2 К). Измерительная головка, предложенная В.П. Кошельцом, показала высокую эффективность. Для подключения образца методом перевернутого кристалла (рис. 2.3 -2.4) изготавливается специальная печатная плата (1), рисунок дорожек которой соответствует расположению контактных площадок исследуемой микросхемы. На ней закрепляется оправка для позиционирования образца (2). Гнездо для установки образца выполнено с маленьким зазором (0.05 мм с каждой стороны), крепежные отверстия выполняются под плотную посадку. Образец (3) опускается в гнездо лицевой стороной вниз, прямо на контактные площадки. Сверху образец прижимается специальной пластиной с выступом (4). Аккуратным затягиванием крепежных винтов обеспечивается надежный прижим контактных площадок микросхемы к соответствующим площадкам печатной платы. В промышленности после позиционирования устройство обычно припаивается к плате. В нашем случае пайка не используется, т.к. микросхема устанавливается лишь временно.



1 – печатная плата, 2 – прокладка с гнездом под образец (текстолит),
 3 – исследуемая микросхема (4 х 4 мм), 4 – прижимная пластина (алюминий).
 Рисунок 2.3 – Эскиз конструкции измерительной головки для крепления образца методом перевернутого кристалла.



Рисунок 2.4 – Фотография измерительной головки для тестирования микросхем интегрального приемника.

Если в качестве заготовки под печатную плату выбран ламинат, фольгированный не медью, а, например, фосфорной бронзой, то кончики дорожек в области контактных площадок можно отслоить и «приподнять» над текстолитом, создав подпружиненный контакт. Это может улучшить надежность подключения. Проводящие дорожки печатной платы электролитически покрываются слоем золота, которое предотвращает появление пленок окислов на контактных площадках.

Недостатком данного метода (для серийного тестирования в лаборатории) можно считать высокие требования, предъявляемые к чистоте при монтаже, т.к. частицы пыли или грязи, попавшие в установочное гнездо, могут не только заблокировать электрический контакт, но привести к расколу подложки из-за неравномерной механической нагрузки при установке образца или охлаждении головки. При использовании других методов подключения механические повреждения образца случаются крайне редко. Рекомендуется внимательно осматривать и при необходимости чистить головку перед установкой следующего образца.

Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка (или бондинг) – метод, применяемый в полупроводниковой промышленности на этапе корпусирования микросхем, когда контактные площадки кристалла соединяются с ножками корпуса.

Авторами этот метод применялся только в тех случаях, когда отобранный образец планировалось использовать длительное время без замены. Соединение выполняется с помощью алюминиевой, золотой или медной проволоки на специальной установке. Игла бондинговой машины может разогреваться и одновременно вибрирует с ультразвуковой частотой, припаивая проволоку к контактным площадкам микросхемы, а затем к контактным площадкам платы смещения. Бондинг повреждает поверхность контактных площадок – на одном и том же месте дважды припаять проволоку обычно не удается. Поэтому микросхему с помощью бондинга можно переустановить ограниченное число раз (обычно не более двух-трех раз – это определяется площадью контактных площадок). Выполненное методом ультразвуковой сварки соединение обладает высокой надежностью и высоким качеством.

Перед бондированием исследуемый образец необходимо приклеить к подложке или линзе. Для этого могут применяться воск, цианакрилатный клей, бакелито-фенольный клей БФ-4 или БФ-2, либо специальные эпоксидные смолы.



Рисунок 2.5 – Фотография микросхемы интегрального приемника, подключенной к плате смещения методом ультразвуковой сварки.

Образец, установленный на воск легче всего демонтировать. Цианакрилатный клей обеспечивает надежное приклеивание образца к большинству материалов, устойчив к термоциклированию и довольно легко растворяется в ацетоне. Клей БФ хорошо растворяется в спирте, его можно применять в том случае, когда воздействие ацетона на образцы не желательно или недопустимо (например, для ВТСП). Специальные эпоксидные смолы (марки Stycast) используются для установки микросхем на линзе в критических приложениях, в частности, в инструментах, предназначенных для запуска на борту спутников и высотных аэростатов. Они могут использоваться и совместно с клеевым соединением для увеличения надежности. При правильном подборе состава эпоксидной смолы соединение является одноразовым и неразборным.

На одном из этапов проекта «ТЕЛИС», связанных с интенсивным тестированием интегральных схем, автором была разработана конструкция приспособления, которое позволяет безопасно снимать образец, закрепленный с помощью цианакрилатного клея на поверхности кремниевой линзы с просветляющим покрытием из парилена. Линзу с таким покрытием нельзя погружать в ацетон полностью, т.к. в этом случае покрытие отслаивается. Эскиз и фотография приспособления приведены на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Приспособление для демонтажа интегральной микросхемы установленной на кремниевой линзе с просветляющим покрытием.

Лицевая сторона линзы с покрытием защищена от попадания ацетона специальной прокладкой из устойчивого к ацетону этилен-пропиленового каучука (СКЭП, международное обозначение: EPDM), вулканизированного пероксидами. В ацетон погружается только сторона линзы с образцом, и через некоторое время (от 30 минут до 2 часов) образец отклеивается.

2.2 Измерение на постоянном токе. Фурье спектрометр

Вольт-амперные характеристики распределенных джозефсоновских переходов и СИС смесителей исследовались в транспортном сосуде Дьюара с жидким гелием с помощью криогенного зонда («макалки») (рис. 2.7). Поскольку РДП очень чувствителен к изменению магнитного поля, образец помещается в экран из криопермаллоя, и лишь затем погружается в жидкий гелий на штанге измерительного зонда. Штанга соединяется экранированным кабелем co специализированным (собранным В ИРЭ ИМ. В.А. Котельникова РАН) источником питания. Источник питания имеет аналоговые выходы с предусилителями по каналам тока и напряжения, и аналоговый вход управления разверткой. Для автоматизации процесса измерения используется персональный компьютер под управлением Microsoft Windows, оснащенный измерительной PCI-картой производства National Instruments, и программный пакет IRTECON ("Integrated Receiver Test and Control") разработанный с.н.с. Ермаковым А.Б. (несколько устаревшие сведения о системе опубликованы в [67]). Сигнал с выходных каналов источника подается по коаксиальному кабелю на коммутатор, а далее, по специальному шлейфу из комплекта измерительной платы, на вход 16-битных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) измерительной карты. Сигнал управления разверткой формируется с помощью 12-битного или 16-битного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Скорость измерения может достигать 1000 точек в секунду по одному каналу (при использовании внутреннего буфера карты), что позволяет не только быстро выполнять измерения, но и использовать дискретное преобразование Фурье для контроля спектра низкочастотных шумов и наводок по цепям питания (50 Гц и гармоники). В медленном режиме измерения используются низкочастотные фильтры каналов задания тока с верхней частотой 150 Гц.



Рисунок 2.7 – Общая схема установки для измерения вольт-амперных характеристик в транспортном сосуде Дьюара.

4-проводная схема подключения образца.

Источник тока находится на значительном удалении от образца, поэтому сопротивление соединительных проводов сравнимо или даже больше, чем сопротивление исследуемых устройств (сопротивление СИС перехода в нормальном состоянии составляет $Rn_{CUC} \sim 20$ Ом, $Rn_{PД\Pi} \sim 0,01$ Ом). Для того, чтобы корректно измерить падение напряжения на устройстве, используется четырехпроводная схема подключения тестовых образцов. Такая схема позволяет устранить вклад падения напряжения на измерительных проводах, вызванный протеканием тока смещения.

Схема подключения тестового образца, предназначенного для исследования спектральных характеристик РДП, приведена на рис. 2.8. Показано, что на интегральной микросхеме нижний электрод («минус») РДП и СИС смесителя – общие, а в верхнем используется разрыв по постоянному току, обеспечивающий емкостную связь только на высокой частоте. Линия, задающая магнитное поле РДП физически на микросхеме может быть выполнена как отдельная дорожка, проходящая рядом с переходом, но для задания поля может быть использован и нижний электрод распределенного перехода. При измерении вольт-амперной характеристики использовалась головка с проволочными контактами.

При проведении криогенных измерений приток тепла к образцу по внешним цепям (питания и СВЧ) может иметь большое значение (особенно при проведении исследований в вакуумных заливных криостатах) [68]. Использование четырехпроводной схемы подключения позволяет получить дополнительный выигрыш за счет использования

проводов с низкой теплопроводностью. Так, поскольку напряжение измеряется по отдельной паре проводов, ток через которые (практически) не течет, можно использовать высокоомный провод с низкой теплопроводностью, например манганин (теплопроводность на два порядка ниже, чем у меди). Для линии задания тока высокоомный провод использовать нельзя, выигрыш уменьшения т.к. ОТ теплопроводности нивелируется джоулевским разогревом. Хорошим компромиссом в данном случае является провод из фосфорной бронзы, теплопроводность которого ниже чем у меди на порядок.



Рисунок 2.8 – Электрическая схема подключения тестовой интегральной микросхемы для измерения вольт-амперной характеристики РДП и СИС смесителя.

Пятиточечная схема подключения.

Распределенные переходы силу большой площади устойчивы В к электростатическому пробою. СИС переходы малой площади, напротив, очень чувствительны к мощным импульсам, вызванным электростатическим разрядом или скачком напряжения питания. При исследовании входной характеристики приемной антенны интегрального приемника с помощью Фурье-спектрометра (в лаборатории Института космических исследований Нидерландов – SRON, г. Гронинген) вопрос о дополнительной защите образцов стал критичным, т.к. несмотря на заземление всех происходил пробой СИС смесителей. элементов установки, систематически Измерительная система была модернизирована автором для использования пятиточечной схемы подключения СИС переходов, что позволило защитить образцы интегральных схем.

Шестипроводная схема измерений сопротивления штатно поддерживается некоторыми лабораторными мультиметрами (в частности, Keithley) и используется для внутрисхемного измерения сопротивлений, когда исследуемое устройство зашунтировано другими цепями. В нашем случае необходимо было защитить устройство от внешних воздействий. Схема подключения приведена на рис. 2.9.



Рисунок 2.9 – 5-точечная схема подключения образца.

Источник питания подключается к средней точке делителя, образованного сопротивлением R1 (20 Ом) и суммарным сопротивлением R2 (20 Ом) и R_{CHC} . До перехода в сверхпроводящее состояние R_{CHC} составляет величину порядка 200 Ом, в сверхпроводящем состоянии сопротивление перехода зависит от рабочей точки, для оценки можно взять величину сопротивления на нормальном участке ВАХ, $Rn \sim 40 OM$. Напряжение на СИС переходе измеряется напрямую (выводы 5 и 6), а ток через переход вычисляется по падению напряжения *Vsense (вольтметр V1)* на сопротивлении R2, включенном в цепь питания последовательно с переходом (выходы 3, 4). Поскольку по проводам 4, 5 ток не течет и падение напряжения на них пренебрежимо мало, в реальной схеме для подключения образца к измерительной установке вместо пары (4, 5) используется только один провод. Этим и объясняется распространенное наименование такой измерительной схемы - пятиточечная схема подключения.

Для защиты перехода и уменьшения влияния внешних высокочастотных наводок была разработана и изготовлена плата низкочастотного двухкаскадного RC-фильтра (рис. 2.10, 2.11). Конструкция аналогичного фильтра была апробирована ранее В.П. Кошельцом для устранения внешних наводок по цепям питания сверхпроводящих образцов с распределенными джозефсоновскими переходами, установленных в вакуумном криостате. Каждая из сигнальных линий, кроме заземленной шины минуса питания образца и линии задания магнитного поля, защищена низкочастотным RC-фильтром с характерной частотой отсечки порядка $1/\text{RC} \sim 10^4$ Гц (на рисунке 2.12 красная и синяя кривые, соответственно для каналов тока и напряжения). Чтобы исключить нагрев резисторов в цепи задания магнитного поля (ток до 100 мА) использован LC фильтр. Параметры подобраны таким образом, чтобы обеспечить частоту отсечки, близкую к 10 кГц. Дальнейшее снижение частоты среза не желательно, так как, во-первых, это будет ограничивать максимальную частоту измерений в автоматическом режиме (~1 кГц), а во вторых увеличение номиналов сопротивлений приведет к росту температуры платы фильтров и общей тепловой нагрузки на криостат, а также к росту джонсоновского шума.



Рисунок 2.10 – Принципиальная электрическая схема подключения СИС перехода в вакуумном криостате.

Лицевая сторона

Обратная сторона



Puc. 2.11 – Топология трехканальной платы фильтров (для одновременного подключения трех образцов).



Рисунок 2.12 – АЧХ НЧ-фильтров.

Рассмотрим влияние фильтра при электростатическом разряде по каналу задания тока. Человек может не почувствовать статический разряд при напряжениях меньше 3 кВ – эта цифра и взята для расчета. Емкость тела человека составляет порядка 150 пФ. Эквивалентная схема модели для расчета приведена на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – Эквивалентная схема для расчета амплитуды напряжения на образце при статическом разряде по каналу задания тока.

В начальный момент времени конденсатор C1 (150 пФ) заряжен до напряжения 3 кВ. Двухпозиционный переключатель SW1 размыкает цепь заряда и подключает конденсатор C1 к цепи питания исследуемого образца. Конденсаторы C2-C4 и резисторы R1-R2 образуют двухкаскадный фильтр низких частот, резисторы R3 и R4 – шунтирующие резисторы пятиточечной схемы подключения, R5 – сопротивление измеряемого образца. Временная диаграмма напряжения на образце (R5) в момент разряда представлена на рис. 2.14 сплошной кривой. Как видно, пиковое напряжение не превышает 100 мВ, что вполне безопасно для СИС переходов площадью до 1 мкм². В то же время, если на схеме из рис. 2.13 убрать шунтирующий резистор R3 (таким образом, схема сводится к четырехточечной), то, при прочих равных, пиковое напряжение на образце составляет уже 730 мВ (см. рис. 2.14, пунктирная кривая).

Статический разряд по каналу задания тока, когда образец находится в нормальном (не сверхпроводящем) состоянии является наихудшим случаем, при котором напряжение на переходе максимально. Например, в случае пробоя по каналу измерения напряжения, сопротивление R2 в HЧ фильтре (рис. 2.13) составляет 1,2 кОм, и пиковое значение напряжения на переходе понижается почти в 3 раза, до 30 мВ. После охлаждения образца до рабочей температуры его сопротивление уменьшается, что также приводит к уменьшению пикового напряжения на переходе.



Рисунок 2.14 – Зависимость напряжения на переходе при статическом разряде через фильтр (расчет). Напряжение разряда 3 кВ, емкость конденсатора 150 пФ.

Описанная модернизация НЧ-фильтров Фурье-спектрометра позволила полностью решить проблему электростатического пробоя образцов, а также позволяет значительно уменьшить влияние электромагнитных наводок на образец в процессе эксперимента.

2.3 Исследование входного диапазона СИП с помощью спектрометра Фурье

Описанные в данном подразделе результаты связаны с исследованиями входной характеристики приемной системы сверхпроводникового интегрального приемника. Входная характеристика линзовой антенны СИП напрямую не связана с параметрами РДП-гетеродина (см. рис. 2.15). В то же время, рабочие полосы тракта гетеродина и антенны должны совпадать, т.к. в противном случае эффективность работы СИС-смесителя будет низкой (либо работа на этих частотах станет невозможной).



Рисунок 2.15 - Упрощенная блок-схема интегрального приемника. Структурные элементы микросхемы СИП обведены синей штриховой рамкой.

Для проверки характеристики входного тракта СИП микросхема приемника устанавливалась на поверхности кремниевой эллиптической линзы диаметром 14 мм с просветляющим покрытием из Stycast. Конструкция линзы и профиль просветляющего покрытия были разработаны в Институте космических исследований Нидерландов и оптимизированы для центральной частоты 600 ГГц. Юстировка микросхемы на линзе проводилась с помощью специального зажима для линзы с образцом и оптического микроскопа, оснащенного подвижным столиком с точностью установки 1 мкм по координатным осям (x,y). При юстировке необходимо было совместить центр двойной дипольной (или двойной щелевой) антенны на микросхеме с центром линзы с точностью не хуже 5 мкм по каждой координате. После чего образец приклеивался к линзе с помощью цианакрилата или воска. В случае образцов с дипольными антеннами для улучшения диаграммы направленности и эффективности антенны на поверхность линзы приклеивалась также четвертьволновая кремниевая пластинка, позолоченная с одной стороны (back reflector). При тестировании достаточно было установить пластинку отражателя с помощью ацетона, без добавления клеящих материалов. После высыхания ацетона такая конструкция спокойно выдерживала одно-два термоциклирования, необходимые для тестирования микросхемы. В полетных образцах пластинка отражателя приклеивается к микросхеме приемника с помощью цианакрилата.

Образцы, предназначенные для предполетной подготовки электроники и оптики проекта «TELIS» в дальнейшем устанавливались в специальные монтажные блоки и бондировались к плате питания (см. рис. 2.16, конструкция разработана Йоханнесом Дерксеном, SRON, Нидерланды). Указанный монтажный блок помещался внутри двухслойного магнитного экрана (внешний – криопермаллой, внутренний – медный экран покрытый пленкой свинца, переходящей в сверхпроводящее состояние при рабочих температурах).

Крепления для установки образцов и платы питания для тестовых измерений были разработаны автором (рис. 2.17). Поскольку при измерениях на спектрометре Фурье РДП гетеродин не задействован, магнитная экранировка образца не требуется, и держатель может быть достаточно компактным. Благодаря компактным держателям И использованию описанной в предыдущем разделе трехканальной платы фильтров питания, удалось модернизировать криостат Фурье спектрометра для измерения трех образцов в одном термоцикле. Для этого в стандартном криостате HDV-5 (размер холодной пластины – 5 дюймов, или 127 мм) производства Infrared Labs (США) была выполнена трехканальная электрическая разводка, а также изготовлено три оптических окна с инфракрасными фильтрами. Это позволило существенно сократить расход жидкого гелия при тестировании образцов, а также значительно уменьшить общее время тестирования.



Рисунок 2.16 - Фотография монтажного модуля для образца с линзой (вид сзади и спереди, внешний диаметр 36.5 мм). Проект «TELIS».



A)

Б)



B)

Рисунок 2.17 – А) Тестовая головка ФТС криостата, вид спереди (видна кремниевая линза), Б) вид сзади (с платой питания и образцом), В) Общий вид рабочего объема криостата Фурье спектрометра с тремя измерительными головками.

Поскольку охлаждение микросхемы осуществляется, в основном, через кремниевую линзу, для улучшения теплового контакта между линзой и головкой в обеих конструкциях держателей (тестовой и полетной) использовалась прокладка из индиевой фольги. В полетном держателе линза дополнительно поджималась к алюминиевой оправке с помощью подпружиненной шайбы.

Конструкция оптического тракта ТГц Фурье спектрометра

Принципиально установка спектрометра Фурье представляет собой интерферометр Майкельсона (рис. 2.18) – излучение от источника падает на полупрозрачный делитель, затем отражается от двух зеркал, снова проходит через полупрозрачный делитель и попадает на детектор (которым является, в данном случаем, сверхпроводниковый интегральный приемник). Одно из зеркал жестко закреплено, второе может перемещаться вдоль хода луча. В Фурье-спектрометре, в отличие от интерферометра Майкельсона, используется не монохроматический источник, а широкополосный источник со сплошным спектром. Разность хода лучей, вызванная перемещением подвижного зеркала, определяет интенсивность сигнала на детекторе. Максимальная амплитуда перемещения и минимальный размер шага подвижного зеркала определяют разрешение и полосу спектрометра. При перемещении подвижного зеркала снимается зависимость тока СИСсмесителя (детектора) в режиме прямого детектирования от координаты зеркала (задается относительно точки с нулевой разностью хода). Далее, вычисляя быстрое преобразование Фурье для полученной кривой и полагая спектральную плотность мощности источника постоянной, мы получаем уже спектральную характеристику исследуемого прибора в относительных единицах (зависимость интенсивности сигнала от частоты). Обычно в спектрометрах Фурье используются широкополосные детекторы, а в процессе измерения в оптический тракт спектрометра вносится исследуемый образец, для которого и требуется получить характеристику поглощения или пропускания в заданном диапазоне. В нашем же случае используется достаточно узкополосный детектор с двойной дипольной антенной и результатом измерения является аппаратная функция спектрометра.



Рисунок 2.18 – Схема интерферометра Майкельсона.

В качестве источника излучения для спектрометра Фурье в терагерцовом частотном диапазоне могут использоваться, например, ртутные лампы высокого давления или инфракрасные источники, нагреваемые электрическим током (глобары). При выборе ртутной лампы важное значение имеет материал колбы, т.к. не все стекла обладают хорошим пропусканием в ТГц диапазоне и при неправильном выборе интенсивность ТГц излучения будет определяться, в основном, температурой стенки лампы. При проектировании установки в ИРЭ мы использовали глобар производства Newport (Модель 6575), с заводским источником питания, системой установки и юстировки PhotoMax, а также металлизированным зеркалом и системой поворота луча.

В качестве полупрозрачного зеркала в терагерцовом диапазоне часто используются различные полимерные пленки, в частности, майлар (пленка на основе лавсана, показатель преломления n = 1,72). При выборе толщины пленки для делителя луча необходимо учитывать эффекты, связанные с интерференцией волн отраженных от передней и задней границ раздела воздух-пленка. Выполнен расчет относительной интенсивности луча, прошедшего через одно плечо интерферометра (луч один раз отразившийся от делителя луча, затем от зеркала, затем прошедший через полупрозрачный делитель), график зависимости интенсивности от частоты приведен на рис. 2.19 для трех значений толщины пленки: $t_1 = 120 \text{ мкм}, t_2 = 100 \text{ мкм}, t_3 = 80 \text{ мкм}.$ Для центральной частоты $f_0 = 600 \Gamma T u$ оптимальная толщина майларовой пленки составляет 80 мкм.



Рисунок 2.19 – Относительная интенсивность прошедшего излучения (расчет) для одного плеча интерферометра с делителем луча из майлара толщиной t₁ = 120 мкм, t₂ = 100 мкм, t₃ = 80 мкм. (Пунктирная линия – с учетом поглощения в пленке).

В спектрометре Фурье Института космических исследований Нидерландов, на котором выполнено большинство исследований по проекту TELIS, подвижное зеркало было соединено с шаговым двигателем, который обеспечивал перемещение с заданным постоянным шагом dx = 40 мкм. Полный ход зеркала составлял Lmax = 16 мм. Эти параметры позволяют обеспечить:

частотный диапазон примерно до 2 ТГц,

разрешение спектрометра около 10 ГГц.

Оценить предельные параметры Фурье спектрометра (верхнюю границу частотного диапазона и разрешение) можно по следующим формулам:

$$f_{max} = \frac{c}{4 \cdot dx'} \tag{2.1}$$

$$\delta f = \frac{c}{2 \cdot L_{max}},\tag{2.2}$$

где f_{max} – верхняя частота спектрометра, c – скорость света, dx – шаг подвижного зеркала, δf – спектральное разрешение, L_{max} – максимальный ход зеркала.



1 – Криостат, 2 – неподвижное зеркало, 3 – делитель луча, 4 – подвижное зеркало, 5источник излучения с системой поворота луча.

Рисунок 2.20 – Общий вид Фурье-спектрометра, собранного в ИРЭ РАН.

Предельные параметры установленного в ИРЭ линейного шагового двигателя Standa обеспечивают минимальный размер шага $dx = 2.5 \, MKM$, максимальный ход каретки: *Lmax* = 100 *мм*. Это позволяет получить Фурье-спектрограмму с разрешением 1.5 ГГц при полосе до 30 ТГц.

Для уменьшения влияния наводок и температурного дрейфа источников питания и детектора используется обтюратор, а сигнал с детектора подается на синхронный усилитель. При измерениях постоянная времени интегрирования синхронного детектора обычно выбиралась равной 1 с. При этом одна спектрограмма измеряется примерно за 400 секунд (400 точек). При необходимости разрешение можно увеличить за счет пропорционального увеличения времени одного измерения.

Экспериментальные результаты

С помощью спектрометра Фурье проведена обширная серия экспериментальных исследований образцов СИП в течение всего периода выполнения проекта TELIS. Проверен ряд новых концепций по проектированию СВЧ приемников с СИС смесителями. Отметим, что исследования на спектрометре Фурье выполнялись не только автором, на различных этапах проекта измерения проводились также С.В. Шитовым и О.В. Корюкиным, А.С. Соболевым а на завершающих этапах также Н.В. Киневым и Л. де Йонгом. Один измерительный цикл обычно проводится за два дня – в первый день выполняется подготовка и монтаж образцов, предварительная откачка и охлаждение криостата жидким азотом, на второй день – охлаждение жидким гелием и собственно измерения. С учетом проведенной автором модернизации криостата можно считать, что на тестирование одного образца в среднем требуется один день.

Разработка СИП для проекта TELIS с интегральным гармоническим смесителем для системы фазовой автоподстройки частоты потребовала проведения серии оптимизаций фотошаблонов для изготовления образцов. При этом изменялись многие элементы СВЧ линий передачи, конструкция смесителей, приемных антенн, конструкция гетеродина, была разработана и внедрена технология изготовления многослойных интегральных схем на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN, а также разработаны шаблоны, в которых предусматривалось изготовление СИС смесителей и РДП из туннельных структур с различной плотностью критического тока. Краткий обзор изменений приведен в Таблице 2.1.

Интенсивные исследования экспериментальных образцов требовались еще и в силу технологических ограничений – микросхемы СИП для TELIS изготавливались с использованием оптической литографии. Поскольку для расширения полосы детектора площадь СИС переходов пришлось уменьшить до 0,8 - 1 мкм², соблюдение необходимых размеров на микросхеме являлось сложной технологической задачей. Разброс геометрических размеров переходов по подложке (обнаруженный благодаря сравнению спектральных Фурье-характеристик) мог достигать 30% (0,3 мкм). Также между партиями варьировалась плотность критического тока джозефсоновских переходов (т.е. толщина туннельного барьера). Вместе эти эффекты приводили к существенному разбросу емкости детекторов и сильному уходу частотной характеристики детекторов по сравнению с расчетными значениями.

Таблица 2.1

NN	Тип джоз. структур	Основные изменения	Типы детекторов
T2m	Nb-AlOx-Nb	Внесены изменения в конструкцию СВЧ тракта между РДП и гармоническим смесителем.	 Сдвоенный СИС смеситель с двойной дипольной антенной Сдвоенный СИС смеситель с двойной щелевой антенной Смеситель на распределенном переходе с двойной щелевой антенной
Τ3	Nb-AlOx-Nb	Внедрен новый (оптимизированный) тип РДП гетеродина; оптимизирована конструкция согласующих структур между РДП и смесителями.	 Сдвоенный СИС смеситель с двойной дипольной антенной (как в T2m) Сдвоенный СИС смеситель с двойной щелевой антенной (как в T2m) Экспериментальный балансный смеситель с двойной щелевой антенной и интегральной структурой связи.
T4	Nb-AlOx-Nb, Nb-AlN-NbN	Шаблон для отработки новых топологий и типов джозефсоновских переходов, оптимизации технологических параметров. Предусмотрена возможность изготовления РДП и СИС смесителя из трехслоек с различной плотностью тока.	 Сдвоенный СИС смеситель с двойной дипольной антенной. Сдвоенный СИС смеситель с двойной щелевой антенной . На шаблоне предусмотрено несколько модификаций для отработки технологии изготовления.
Т4м	Nb-AlN-NbN	Изменен тракт промежуточной частоты для улучшения линейности АЧХ; внесены изменения в конструкцию антенн тестовых микросхем.	Аналогично Т4, два типа антенн со сдвоенными детекторами. Три топологических модификации каждого детектора для компенсации технологических изменений размеров.

При модернизации и отборе полетных образцов учитывалась не только их входная характеристика, но также параметры РДП, частотные диапазоны согласования РДП и СИС смесителей, равномерность АЧХ тракта промежуточной частоты, шумовая температура. Технологические требования, предъявляемые к элементам СИП, могут быть противоречивыми – например, плотность критического тока СИС смесителя нужно увеличивать для уменьшения емкости и расширения входной полосы, но при этом увеличиваются фазовые шумы РДП гетеродина, поэтому необходимо искать компромисс.

В качестве иллюстрации, на рис. 2.21 (верхний график) показаны спектральные характеристики трех образцов СИП из одной технологической партии T4m-062, имеющие полностью идентичную топологию двойной дипольной антенны и согласованного с ней двойного СИС смесителя ($S_{sis} \sim 1 \text{ мкm}^2$, RnS $\sim 30 \text{ Ом*мкm}^2$). Все различия в измеренных характеристиках обусловлены технологическими уходами линейных размеров в процессе изготовления микросхем и неоднородностью параметров трехслойной структуры Nb-AlN-NbN по подложке.

В данном случае наилучшим выбором является образец Т4m-061#01 – его частотная характеристика наилучшим образом соответствует целевым частотам проекта TELIS (см. рис. 2.21, нижний график [69]): во-первых, она охватывает частотный диапазон вблизи 500 ГГц, где содержится большое количество наблюдаемых линий атмосферных газовых примесей; во-вторых, частота кроссовера между диапазонами хорошей чувствительности попадает на 570 ГГц, что соответствует спектральной линии поглощения водяных паров (556 ГГц). Эта линия очень сильная, поэтому на соседних частотах наблюдение невозможно.

В публикациях автора в явном виде спектральная характеристика одного из образцов представлена в [A3], в последующих работах обычно приводился только график шумовой температуры приемника, т.к. последний учитывает как отклик по входу смесителя, так и эффективность преобразования, связанную с уровнем накачки смесителя. На основании проведенных исследований в качестве основных полетных образцов отобраны микросхемы с двойной дипольной антенной. Рекомендованная плотность критического тока туннельных структур составляет 6-7 кA/см², площадь СИС переходов – $S_{sis} = 1 \text{ мкм}^2$.



Рисунок 2.21 – **Вверху:** АЧХ входного тракта образцов СИП серии Т4т-062 с двойной дипольной антенной; **Внизу:** Относительный приоритет спектральных полос для проекта TELIS [69] (по количеству наблюдаемых линий газов).

2.4 Измерение диаграммы направленности линзовых антенн

Помимо измерения прямого отклика на спектрометре Фурье для отобранных образцов микросхем сверхпроводникового интегрального приемника проводились также измерения шумовой температуры методом У-фактор для всех частот гетеродина, а также исследовалась диаграмма направленности интегральной линзовой антенны. Для измерения амплитудной диаграммы направленности в дальней зоне применялась установка, схема которой показана на рис. 2.22. В качестве опорного источника для исследований применялся умножитель частоты на полупроводниковой сверхрешетке (2) с рупорной антенной, запитанный от лабораторного синтезатора (1) с рабочим диапазоном частот до 22 ГГц. Для модуляции сигнала умножителя применялся обтюратор (3). Криостат с измеряемым образцом (4) устанавливался на наклонно-поворотный стол с шаговыми приводами перемещения; использовалась автоматизированная система управления перемещениями стола, разработанная А. Барышевым. Линза с образцом помещалась в центре вращения, таким образом измеренная диаграмма направленности не должна зависеть от диаграммы направленности источника сигнала (2). Измерения проводились в гетеродинном режиме: с помощью автоматизированной системы управления (5) задавались рабочие точки СИС смесителей и распределенного джозефсоновского перехода, выбирался режим работы системы ФАПЧ РДП. Сигнал в полосе промежуточных частот с СИС смесителя подавался на линейный детектор (6), выходной сигнал которого подавался на синхронный усилитель (7), а затем считывался управляющей программой.



1 – СВЧ генератор, 2 – гармонический умножитель, 3 – обтюратор, 4 – криостат на наклонно-поворотном столике, 5- блок питания СИП с системой ФАПЧ, 6 – детектор, 7 – синхронный усилитель, 8 – ПК.

Рисунок 2.22 – Схема установки для измерения диаграммы направленности.

Расстояние между криостатом и источником излучения (2) составляло около 1 м, между ними не использовались никакие фокусирующие элементы. Начальное позиционирование источника сигнала по отношению к плоскости образца осуществлялось с помощью двух твердотельных лазеров с угловой точностью 0.2°.

Результаты измерения диаграммы направленности образца СИП с двойной дипольной антенной на частоте 625 ГГц приведены на рис. 2.23 [А7]. Под вертикальным сканированием понимается наклон криостата, горизонтальное сканирование соответствует вращению вокруг вертикальной оси. Диаграмма симметричная, уровень боковых лепестков не превышает -17 dB. Ширина главного максимума на половине высоты составляет 3°. На рисунке 2.25 приведена также теоретически расчитанная кривая, полученная с помощью вычислительного пакета PILRAP (расчет выполнен П.А. Ягубовым).



Рисунок 2.23 – Диаграмма направленности в дальней зоне (синяя кривая – вертикальный скан, красная – горизонтальный). Справа – трехмерный эскиз

2.5 Установка для измерения спектральных характеристик РДП

Для исследования спектральных характеристик РДП тестовые микросхемы устанавливались в гелиевый заливной криостат, оснащенный СВЧ вводами и выводами. Блок-схема измерительной установки представлена на рис. 2.24, фото одной из систем в сборе (всего в ИРЭ РАН (Москва) и SRON (Гронинген, Нидерланды) использовалось три криостата) - на рис. 2.25. Тестовая интегральная схема, содержащая РДП (1) и гармонический СИС-смеситель (2) размещалась на специальном креплении (эскиз был приведен на рис. 2.3) в экране из криопермаллоя, поскольку РДП очень чувствителен к внешнему магнитному полю, в заливном криостате с гелиевым уровнем температуры (T = 4.2K).Сигнал распределенного джозефсоновского перехода подается на гармонический СИС-смеситель, где смешивается с гармоникой высокого порядка (номер гармоники 20 - 40) опорного синтезатора (5), работающего на частоте около 20 ГГц.

Сигнал разностной частоты в полосе 100-1000 МГц подается с СИС-смесителя сначала на охлаждаемый малошумящий усилитель (6) с коэффициентом усиления 25 дБ, затем на «теплый» усилитель (7) с коэффициентом усиления 55 дБ, установленный снаружи криостата. С «теплого» усилителя сигнал промежуточный частоты подается на систему фазовой автоподстройки частоты РДП (8) и, через направленный ответвитель, на анализатор спектра Agilent (9) (откуда спектральная характеристика считывается на ПК).

Для частотной и фазовой стабилизации РДП при исследовании спектральных характеристик применялся специализированный модуль, разработанный для проекта TELIS в ИФМ РАН, г. Н. Новгород (отдел В.Л. Вакса). Данный модуль включал в себя систему частотной стабилизации (ЧС) и систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с регулируемым коэффициентом усиления и полосой 12 МГц. Модуль оснащен интерфейсом удаленного управления и позволяет исследовать как автономную ширину линии генерации РДП (при использовании ЧС), так и спектральное качество РДП при фазовой стабилизации по отношению к опорному генератору (после включения режима ФАПЧ).



1 — РДП, 2 — СИС-смеситель, 3 — источник задания тока РДП и СИС-смесителя, 4 - направленный ответвитель, 5 — опорный синтезатор 20 ГГц, 6 - охлаждаемый усилитель ПЧ, 7 — «теплый» усилитель ПЧ, 8 - система ФАПЧ, 9 - анализатор спектра.

Рисунок 2.24 - Блок-схема установки для исследования спектральной характеристики РДП.



1- Магнитный экран, сборка с микросхемой внутри, 2 – направленный ответвитель,
 3 - охлаждаемый усилитель.
 Рисунок 2.25 – Фотография открытого измерительного криостата.

Заключение раздела

Проведена модернизация и создан ряд новых измерительных установок.

Изменение схемы подключения питания экспериментальных образцов в криостате Фурье-спектрометра позволило полностью решить проблему электростатического пробоя СИС-смесителей во время измерений, а модернизация криостата для одновременной установки до трех образцов позволила существенно сократить расход жидкого гелия и время проведения измерений. Создана лабораторная установка спектрометра Фурье.

Проведенные исследования экспериментальных образцов интегрального спектрометра TELIS позволили провести целенаправленную для оптимизацию конструкции сверхпроводникового интегрального приемника. Были выявлены технологические сложности, влияющие на качество изготовленных микросхем, разработаны шаблоны для компенсации разброса технологических параметров.

Отобраны основные и запасные образцы для предполетной подготовки спектрометра проекта TELIS.

Глава 3. Экспериментальное исследование генераторов на основе Nb-AlOx-Nb

Основные результаты, описанные в данной главе, относятся к исследованию зависимости спектральных характеристик распределенных джозефсоновских переходов на основе трехслойных структур Nb-AlOx-Nb от топологии контакта для достижения оптимальных параметров гетеродина сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) для спектрометра TELIS.

Можно перечислить ряд параметров, важных для любого гетеродина, значения которых задаются на этапе проектирования приемной системы:

- частотный диапазон,
- шаг перестройки частоты гетеродина,
- мощность выходного сигнала,
- точность установки частоты,
- стабильность частоты,
- уровень гармоник,
- спектральная плотность мощности фазовых шумов.

Базовый частотный диапазон, в котором предполагалось использовать СИП с РДП гетеродином для проекта TELIS, составлял 600-650 ГГц, с возможностью расширения в дальнейшем до 500 – 650 ГГц [70]. В случае, когда возможна непрерывная перестройка частоты (на частотах выше 480 ГГц), шаг РДП по частоте ограничен только точностью источника задания смещения РДП, или, в случае стабилизации частоты с помощью системы ФАПЧ, шагом опорного генератора с учетом номера рабочей гармоники (Для TELIS, в зависимости от номера гармоники, шаг по частоте составляет примерно 10 МГц*30 = 300 МГц). В общем случае достаточно обеспечить перестройку гетеродина с таким шагом, чтобы обеспечить перекрытие полос промежуточной частоты (ширина полосы ПЧ в TELIS составляла 2 ГГц). Мощность на выходе гетеродина подбирается исходя из требуемой мощности для работы смесителя, и в случае РДП составляет порядка 0,5 мкВт. В рамках проведенных исследований частотный диапазон, в котором РДП обеспечивает достаточный уровень мощности для накачки СИС смесителя, контролировался для каждого экспериментального образца по высоте ступеней накачки СИС смесителя. Точность установки и стабильность частоты определялась точностью ФАПЧ, опорного синтезатора системы синхронизированного с внешним высокостабильным опорным генератором частоты 10 МГц. Автономный РДП не обладает необходимой долгосрочной и краткосрочной стабильностью. Как было указано в [70], на начальном этапе разработки у авторов проекта не было уверенности, какую концепцию системы ФАПЧ получится реализовать. Поэтому схема квазиоптического тракта разрабатывалась с учетом возможности использования охлаждаемого гармонического умножителя, излучение которого подавалось бы на приемный СИС-смеситель вместе с исследуемым сигналом, а небольшая часть диапазона ПЧ использовалась бы для стабилизации гетеродина. В итоге была реализована интегральная концепция с дополнительным гармоническим СИС-смесителем на микросхеме, без использования умножителя. Уровень гармоник РДП генератора внешнего отдельно не специфицировался: щелевая частота ниобия составляет около 700 ГГц, выше этой частоты скачкообразный рост потерь в микрополосковых линиях передачи между РДП и СИС смесителем приводит к эффективному подавлению всех гармоник, кроме основной, во всем целевом диапазоне проекта TELIS. Спектральная плотность мощности фазовых шумов – именно эта характеристика РДП подлежала интенсивному дополнительному исследованию, т.к. эта характеристика влияет на разрешение и динамический диапазон приемника.

В качестве оконечного ПЧ-спектрометра в инструменте TELIS использовался цифровой автокореллятор с разрешением около 2 МГц на канал. Спектр выходного сигнала смесителя представляет собой свертку спектральных характеристик исходного сигнала и гетеродина. Поэтому для спектроскопии высокого разрешения необходимо использовать гетеродин с минимальным уровнем фазовых шумов – в противном случае восстановление спектра исходного сигнала становится нетривиальной задачей. Как было указано в обзоре литературы, теоретические методы, которые позволяли бы предсказывать спектральные характеристики распределенных переходов и, тем более, проектировать переходы с заранее заданными спектральными параметрами, не созданы до сих пор. Отчасти это можно объяснить тем, что основные фундаментальные соотношения, описывающие связь флуктуаций тока и спектральных характеристик джозефсоновских переходов в общем случае, были получены рядом авторов и их уточнение на случай конкретных прикладных задач не представляет интереса для теоретиков. Именно поэтому в рамках данной работы основные результаты и зависимости были получены экспериментально.

3.1 Экспериментальные образцы

Для исследования спектральных характеристик распределенных джозефсоновских переходов использовались специально разработанные экспериментальные образцы. На микросхемах размерами 3 х 4,2 мм², изготовленных на кремниевой подложке толщиной 0,3 мм размещались распределенный джозефсоновский переход и гармонический СИС смеситель, который использовался для переноса спектра РДП вниз по частоте в диапазон 0 - 1 ГГц, а также для формирования сигнала системы фазовой автоподстройки частоты для стабилизации центральной частоты РДП. Конструкция указанных схем упрощена по сравнению с микросхемой интегрального приемника (СИП) за счет отсутствия приемной антенны, дополнительного смесителя и соответствующих элементов СВЧ согласования.

Принципиальная схема высокочастотного тракта экспериментальных микросхем разработана В.П. Кошельцом и С.В. Шитовым [71], упрощенная блок-схема показана на рис. 3.1. Одним из ключевых элементов схемы является развязка по постоянному току между РДП и СИС смесителем, которая позволяет независимо задавать напряжение и ток смещения на распределенном генераторном переходе и сосредоточенном детекторном. Поскольку распределенный джозефсоновский переход имеет очень низкий импеданс, порядка 1 Ом при плотности критического тока 4-9 кА/см², для повышения эффективности передачи излучения к смесителю используются многосекционные трансформаторы импеданса из отрезков микрополосковых линий различной ширины. В первоначальной конструкции между СИС смесителем и развязкой питания была предусмотрена дополнительная секция с фильтром верхних частот (ФВЧ) для предотвращения излучения опорного (~20 ГГц) просачивания синтезатора И комбинационных частот в РДП, но при выполнении данной работы было экспериментально показано, что дополнительный фильтр не требуется из-за частотной характеристики пропускания развязки по постоянному току и трансформаторов. В схемах излучение опорного синтезатора (20 ГГц) при уровне его мощности, без ФВЧ достаточной для оптимальной накачки гармонического смесителя, на РДП не детектировалось и не влияло на параметры генерации, что позволило упростить конструкцию и технологию изготовления образцов. В качестве настроечной структуры с индуктивным импедансом для расширения полосы согласования СИС-смесителя с линией передачи на частотах РДП используется радиальный замыкатель.

Тракт промежуточной частоты представляет собой 50-омную копланарную линию, соединенную с контактными площадками микросхемы, которая через копланарномикрополосковый переход связана с линией СИС-смесителя. По этой линии на смеситель подается излучение опорного синтезатора и снимается сигнал промежуточной частоты.



Рисунок 3.1 Блок-схема СВЧ-тракта тестовой микросхемы.



Рисунок 3.2 - Фотография тестовой микросхемы. Размеры – 4,2 х 3 мм



Рисунок 3.3 - Фотография центральной части тестовой микросхемы, содержащей гетеродин на основе распределенного джозефсоновского перехода (1), трансформатор импеданса (2) и развязку питания между РДП и СИС (3).

На рис. 3.2 приведена фотография экспериментального образца для исследования РДП, а на рис. 3.3. – увеличенный фрагмент центральной части, содержащий собственно РДП, несколько секций согласующих структур и развязку по постоянному току СИС смесителя. Отметим, что развязка (DC-Break) выполнена только в верхнем электроде, нижний же электрод не разрывается и образует общую шину, к которой подключаются отрицательные выводы источников питания СИС-смесителя и РДП (общая точка заземления), и через которую проходит ток для задания магнитного поля в распределенном переходе.

Область туннельного контакта распределенного джозефсоновского перехода на концах перехода имеет сужение. Таким образом создается область с переменным импедансом, которая, с одной стороны, упрощает согласование РДП с внешним микрополосковым трактом, а с другой – позволяет бороться с паразитными резонансами в РДП. Такая конструкция была предложена после обнаружения сверхтонкой резонансной структуры на вольт-амперной характеристике РДП в виде ступеней с шагом 19 нВ [65] и используется во всех исследованных образцах. Позднее было показано, что появление указанных ступеней на ВАХ объясняется электро-акустическим взаимодействием РДП с фононами и образованием стоячей акустической волны в двусторонне полированной кремниевой подложке [АЗ1, 72]. При использовании подложек, полированных только с одной стороны, указанные резонансы не наблюдаются.

Экспериментальные микросхемы были изготовлены в ИРЭ РАН Дмитриевым П.Н. и Филиппенко Л.В., краткое описание технологии изготовления было приведено в Разделе 1.3.2 Главы 1. На данном этапе работ все электроды туннельных переходов, линии питания по постоянному току и линии передачи СВЧ были изготовлены из ниобия (Nb), контактные площадки были покрыты сверху слоем золота. Использование ниобиевых СВЧ линий ограничивает верхний рабочий диапазон экспериментальных схем значениями, соответствующими щелевой частоте ниобиевых пленок ~ 700 ГГц. Выше этой частоты потери в линиях передачи между РДП и СИС-смесителем быстро растут изза роста поверхностного сопротивления пленок Nb, что приводит к невозможности детектирования сигнала с помощью СИС-смесителя, хотя, потенциально, его рабочий диапазон значительно шире.
3.2 Вольт-амперная характеристика РДП на основе Nb-AlOx-Nb

Рассмотрим общие свойства вольт-амперных характеристик распределенных джозефсоновских переходов Nb-AlOx-Nb. На рис. 3.4 представлена вольт-амперная характеристика РДП при отсутствии магнитного поля. Это типичный вид туннельной вольт-амперной характеристики джозефсоновского перехода с ярко выраженным гистерезисом. Критический ток перехода $Ic = 23 \ MA$. Величина щелевого напряжения составляет $Vg = 2,76 \ MB$. Это значение немного ниже, чем щелевое напряжение СИС-смесителя, изготовленного в том же технологическом процессе, $Vg_{SIS} = 2,78 \ MB$ из-за частичного подавления сверхпроводимости (в том числе за счет эффектов перегрева) относительно большими токами в РДП. Нормальное сопротивление перехода $Rn = 0,02 \ Ommode Ommode$

Магнитное поле в области перехода задавалось при пропускании тока через так называемую «контрольную» линию – токопроводящую дорожку на микросхеме. Физически такая линия может быть выполнена либо в виде отдельной дорожки из ниобия, проходящей параллельно распределенному джозефсоновскому переходу, либо ток может пропускаться прямо по нижнему электроду РДП вдоль области туннельного контакта. Экспериментальные образцы с отдельной контрольной линией требуют задания значительно (в несколько раз) больших токов для обеспечения тех же значений поля в переходе из-за уменьшения связи с переходом по магнитному потоку (за счет экранирования сверхпроводящими электродами). Поэтому в настоящее время во всех схемах с РДП используют второй способ – для задания магнитного поля ток контрольной линии пропускается по нижнему электроду вдоль перехода.

На практике главный интерес представляет вид вольт-амперных характеристик РДП при задании магнитного поля. Как было описано в обзоре литературы, при этом магнитное поле проникает в область туннельного барьера в виде магнитных вихрей – флаксонов, а их движение под действием тока смещения приводит к генерации электромагнитного излучения. На рис. 3.5 представлен типичный вид семейства вольтамперных характеристик РДП. Все кривые на графике пронумерованы, каждая кривая снята при постоянном токе контрольной линии (КЛ), т.е. фиксированном магнитном поле. Первой кривой соответствует ток $Icl = 9 \ MA$, шаг по току между кривыми: $\Delta Icl = 2 \ MA$ (т.е. последняя, 32-я кривая, записана при токе КЛ $I_{cl 32} = 71 \ MA$).



Рисунок 3.4 - ВАХ РДП при отсутствии магнитного поля. На прямой ветви (1) виден критический ток Ic = 23 мА. Напряжение щели Vg = 2.76 мВ. Rn=0.02 Ом. Rj/Rn = 19.6.



Рисунок 3.5 - Семейство вольт-амперных характеристик РДП при различных значениях приложенного магнитного поля. Указан порядковый номер кривых. Шаг по току контрольной линии между кривыми ΔIcl = 2 мА.

При заданном магнитном поле ток смещения РДП увеличивался от 0 мА до тех пор, пока не происходил скачкообразный срыв рабочей точки РДП на щелевое напряжение перехода Vg = 2,76 мВ, по аналогии с прямой ветвью на рис. 3.4. Значение тока, при котором происходил перескок на щель, записывалось на график, и, поскольку после скачка ход кривых одинаковый и не представляет интереса (аналогичен рис. 3.4), измерительная система сразу переходила к следующей кривой.

На вольт-амперной характеристике РДП на основе туннельных структур Nb-AlOx-Nb визуально можно выделить две области – слева и справа от отмеченной на графике 3.5 особенности при напряжении V_{JSC} ≈ 0,94 мВ (что соответствует трети от щелевого напряжения переходов Nb-AlOx-Nb). При напряжениях выше V_{JSC} энергия фотонов, излучаемых переходом, достаточно велика, чтобы эффективно поглощаться квазичастицами в самом переходе, что приводит к росту туннельного тока - происходит так называемая джозефсоновская самонакачка. Легко получить общее выражение для V_{JSC}: это граничное напряжение, при котором напряжение джозефсоновской генерации РДП Vn = hf/2e совпадает с напряжением квазичастичной ступени $Vn = Vg \pm n*hf/e$. Оставляя только знак «минус», т.к. нас интересует область ниже Vg и, решая относительно Vn, получим:

$$Vn_{JSC} = Vg/(2n+1) \tag{3.1}$$

У ниобиевых распределенных переходов ярко выражена только первая квазичастичная ступенька при n=1, хотя в общем случае этот эффект может наблюдаться (с меньшей интенсивностью из-за уменьшения вероятности многофотонных процессов) и при больших n, как это будет показано в Главе 4 для переходов Nb-AlN-NbN.

При напряжениях ниже V_{JSC} переход работает в резонансном режиме: из-за достаточно низких потерь в распределенном переходе (который, фактически, представляет собой микрополосковый резонатор) возникают стоячие электромагнитные волны, происходит «затягивание» частоты РДП к резонансным частотам, что соответствует появлению на ВАХ ступеней напряжения (см. раздел 1.3.3), так называемых ступеней Фиске.

$$V_n = \frac{h}{2e} f_n = \frac{h}{2e} \left(\frac{c_0 n}{2L} \right) \tag{3.2}$$

Каждая ступень на вольт-амперной характеристике соответствует образованию следующей моды стоячей электромагнитной волны в распределенном переходе и перестройка частоты РДП в таком режиме затруднена (невозможна непрерывная перестройка частоты).

При напряжениях выше V_{JSC} потери в переходе возрастают настолько, что при длине перехода L = 400 *мкм*, как на рис. 3.5, стоячие волны уже не образуются (для переходов короче 200 мкм затухание может быть недостаточным и влияние стоячих волн сохранится). Эта область, соответствующая режиму бегущей волны, в литературе иногда называется областью вязкого течения вихрей (англ. flux-flow).

Целевые частоты проекта TELIS лежали выше напряжения самонакачки (соответствующая частота f_{JSC} ~ 460 ГГц), поэтому основное внимание было сосредоточено именно на этой области напряжений.

СВЧ согласование РДП и СИС-смесителя.

Под воздействием СВЧ излучения от РДП на вольт-амперной характеристике СИС смесителя появляются квазичастичные стимулированные ступени (рис. 3.6). Высота первой квазичастичной ступени тока позволяет качественно судить о поглощенной СИСсмесителем мощности, которая, в свою очередь, зависит от мощности на выходе РДП и АЧХ СВЧ тракта между РДП и детектором. Согласно [73], оптимальный уровень мощности гетеродина для СИС-смесителя соответствует появлению на ВАХ смесителя ступени тока, высотой $\Delta I = \frac{1}{4}Ig$ (*где Ig – скачок тока при щелевом напряжении*). Таким образом можно определить частотные диапазоны оптимальной накачки СИС-смесителя и соответствующие рабочие точки РДП, а также оценить рабочую полосу СВЧ тракта между РДП и СИС смесителем. Данный процесс был автоматизирован: до начала измерения вольт-амперной характеристики распределенного перехода СИС смеситель устанавливался в рабочую точку *Vsis = 2.5 mV*. В процессе измерения ВАХ РДП для каждой рабочей точки измерялось также приращение тока смесителя, нормированное на величину *Ig*:

$$I_{Pump} = \Delta I_{SIS} / Ig \tag{3.3}$$

При окончательном построении графика ВАХ РДП использовалась линейная цветовая шкала для маркировки рабочих точек РДП: синий цвет соответствует $I_{Pump} = 0\%$, зеленый - $I_{Pump} = 10\%$, оранжевый - $I_{Pump} = 20\%$, красный - $I_{Pump} > 25\%$. Для иллюстрации (рис. 3.6-3.7) выбран образец HD16-01#16, РДП длиной L = 400 мкм, шириной W = 32 мкм.



Рисунок 3.6 – Вольт-амперная характеристика СИС-смесителя с накачкой от РДП на частоте 400 ГГц, 500 ГГц, 600 ГГц и 700 ГГц.



Рисунок 3.7 – Семейство вольт-амперных характеристик РДП (L = 400 мкм, W = 32мкм).

Таким образом, по графику вольт-амперной характеристики РДП легко визуально получить информацию о рабочем диапазоне СВЧ тракта между РДП и СИС смесителем. В частности, на рис. 3.7 видно, что область напряжений 0,75 – 1,5 мВ окрашена красным, т.е. соответствующий частотный диапазон 360 – 720 ГГц является оптимизированным и полностью включает целевой диапазон частот TELIS. Также, вычисляя дифференциальное сопротивление вдоль кривых для переходов одного типа (имеющих незначительные отличия в топологии), можно заранее предсказать характер изменения спектральных характеристик сравниваемых образцов, пользуясь выражениями (1.19), (1.22) (приведем их здесь еще раз для удобства).

$$\delta f = R_d^2 S_I(0), \tag{3.4}$$

$$R_d = R_d^B + K R_d^{CL} = \frac{\partial V}{\partial I_B} + K \frac{\partial V}{\partial I_{CL}},$$
(3.5)

Как было указано в начале данного раздела, для получения максимальной эффективности преобразования сигнала на СИС смесителе необходимо правильно подобрать мощность гетеродина. Было показано, что во всех рабочих частотных диапазонах мощностью РДП можно управлять за счет регулировки токов контрольной линии I_{CL}и тока смещения I_B распределенного перехода. Данный результат важен, поскольку гарантирует возможность подстройки эффективности накачки СИС-смесителя от РДП, что было важно для TELIS. Пример регулировки мощности при поддержании постоянной частоты генерации РДП 600 ГГц показан на рис. 3.8; на рисунке указаны соответствующие значения тока смещения РДП. График построен для того же образца, что и рис. 3.6 – 3.7. По высоте квазичастичных ступеней видно, что разработанная конструкция РДП позволяет регулировать его мощность в очень широких пределах; сравнение с расчетом показывает, что диапазон регулировки превышает 20 дБ, что более чем достаточно для выбора оптимальной мощности накачки для СИС-смесителя.



Рисунок 3.8 – Демонстрация возможности управления мощностью РДП (f_{РДП} = 600 ГГц).

3.3 Процедура спектральных измерений

Описание экспериментальной установки было приведено в разделе 2.4. В данном разделе приводится детальное описание методики проведения измерений.

По виду вольт-амперной характеристики (аналогично рис. 3.7) на усмотрение исследователя выбиралось несколько значений тока смещения, при которых уровень индуцированного РДП на СИС смесителе тока был достаточно большим. Далее, для каждого из выбранных значений проводилась серия измерений при постоянном токе смещения.

При выбранном токе смещения РДП $I_B = const$ подбиралось максимальное значение тока контрольной линии, соответствующее максимальному напряжению на РДП, при котором еще можно было наблюдать генерацию РДП. Контроль осуществлялся визуально по дисплею анализатора спектра (полоса 0 – 1 ГГц): на СИС-смеситель подавалось излучение от опорного синтезатора (частота 18 – 20 ГГц), а на анализаторе

спектра наблюдалась преобразованная вниз по частоте спектральная линия РДП (при приближении частоты РДП к соответствующей гармонике опорного синтезатора). «Визуальный» поиск облегчается широкой рабочей полосой тракта ПЧ (100 - 1000 МГц). При узкополосном тракте ПЧ удобнее было бы заранее рассчитывать необходимое рабочее напряжение РДП исходя из номера гармоники и частоты опорного синтезатора, например:

частота опорного синтезатора: f_{ref} = 20 ГГц, номер гармоники: n = 35, итоговая частота n•f_{ref} = 700 ГГц центральная частота ПЧ: f_{PLL} = 0,4 ГГц,

прямой канал:
$$V_{USB} = (n \cdot f_{ref} + f_{PLL}) \cdot \frac{h}{2e} \approx 1,4483 \,\text{мB}$$
, (3.6)

зеркальный канал:
$$V_{LSB} = (n \cdot f_{ref} - f_{PLL}) \cdot \frac{h}{2e} \approx 1,44665 \, \text{мB}$$
. (3.7)

После подстройки рабочей частоты (напряжения) РДП при необходимости варьировались рабочая точка (напряжение) гармонического СИС-смесителя и мощность опорного синтезатора (в дипазоне от -10 дБм до + 15 дБм) для получения максимальной эффективности преобразования (максимальной амплитуды сигнала ПЧ). Затем для уменьшения низкочастотных наводок по цепям питания включалась система стабилизации частоты, а режим спектроанализатора переключался для анализа в полосе 350 - 450 МГц. Проводилось усреднение спектральной кривой (100 измерений), после чего график кривой считывался на компьютер (рис. 3.9-А, по [А1]) и измерялась полуширина спектрального пика (ширина на половине высоты). Затем система ФАПЧ переключалась в режим фазовой стабилизации (с широкой полосой регулирования), проводилась регулировка коэффициента усиления системы ФАПЧ, спектральная характеристика усреднялась (100 раз) и считывалась на компьютер (рис. 3.9-В). Отметим, что для наглядности на рис. 3.9 частотная ось пересчитана и соответствует частоте генерации РДП, а не промежуточной частоте на анализаторе спектра.

После этого частотная полоса анализатора спектра увеличивалась до 500 МГц (частотный диапазон от 150 до 650 МГц, центральная частота 400 МГц) и проводилось измерение дифференциальных сопротивлений по току смещения и току контрольной линии, Rd_b и Rd_{CL} . Особенностью данного метода является возможность более точного измерения дифференциальных сопротивлений РДП за счет измерения приращения частоты РДП с помощью спектроанализатора, с последующим пересчетом полученного значения в напряжение через соотношение Джозефсона, $\Delta f = 2e\Delta V/h$, где Δf – приращение

частоты РДП, ΔV – соответствующее приращение напряжения на переходе, е – заряд электрона и h – постоянная Планка. При этом точность измерения напряжения составляет 10-20 нВ, что превышает точность стандартных нановольтметров. Величина токов измерялись автоматизированной системой с точностью лучше 0,1 мкА. Таким образом, суммарная погрешность данного метода, с учетом погрешностей усреднения, как правило, не превышает 2 % и только в области высоких значений дифференциальных сопротивлений достигает 5 %. Измеренные таким образом значения дифференциальных сопротивлений заносились в таблицу и использовались для уточнения численного коэффициента К в выражении (3.5). После этого рабочая точка РДП перестраивалась напряжение на переходе уменьшалось путем уменьшения контрольного тока I_{CL} и вся процедура измерения повторялась для новой рабочей точки, соответствующей *n-1* гармонике опорного генератора.

спектральной характеристики РДП, записанной в режиме Для фазовой синхронизации по отношению к опорному вычислялся параметр спектрального качества. Спектральное качество (СК) определяется как процент мощности в центральном пике («полезной» мощности излучения) к общей мощности генератора. Для унификации экспериментальных данных по СК, независимо от типа перехода и рабочих параметров измерение спектрального качества проводилось в полосе 100 МГц. Поскольку РДП имеет лоренцевскую форму спектральной линии, зная полосу регулирования системы ФАПЧ легко оценить величину спектрального качества в зависимости от полуширины автономной линии генерации распределенного перехода согласно данному определению (рис. 3.10). Уменьшение спектрального качества увеличивает ошибки калибровки при использовании генератора в составе спектрометра, требует сложной математической обработки выходных данных для компенсации влияния фазовых шумов гетеродина. Поэтому под руководством В.П. Кошельца проводились не только исследования с целью уменьшения ширины спектральной линии генерации распределенных переходов, но и оптимизация конструкции системы ФАПЧ с целью расширения ее рабочей полосы. Эти исследования привели к разработке и успешному экспериментальному исследованию нового элемента сверхпроводниковой электроники – криогенного фазового детектора на основе СИС перехода и созданию прототипа криогенной системы $\Phi A \Pi \Psi$ с полосой BW= 70 МГи [74]. Также было показано, что в полетной версии системы ФАПЧ для TELIS сигнал детектора PLL Out пропорционален спектральному качеству гетеродина. Проведена соответствующая калибровка для оценки СК РДП в полете (удаленно) [А3].



Рисунок 3.9 – Спектр излучения РДП в режиме частотной и фазовой стабилизации (кривые A и B, соответственно) на частоте 707,45 ГГц.



Рисунок 3.10 – Спектральное качество РДП в зависимости от полуширины автономной линии генерации (расчет для трех значений полосы системы ФАПЧ BW = 5 МГц, 10 МГц и 50 МГц).

3.4 Зависимости спектральных свойств от ширины распределенного перехода

Обработка имевшихся экспериментальных данных, а также взаимодействие с теоретическими группами МГУ (М.Ю. Хапаев, М.М. Куприянов) и ИПФ РАН (А.Л. Панкратов) позволили сделать предварительные выводы о том, как топология электродов, размеры областей перекрытия электродов вблизи переходов и плотность критического тока туннельных структур могут влиять на спектральные свойства распределенных джозефсоновских переходов, но теоретических методов оптимизации не было предложено.

После проведения предварительных исследований распределенных переходов длиной 220 мкм [A1] (серия HD8), за основу для дальнейших исследований были отобраны переходы длиной 400 мкм с широкими электродами питания, конструкция которых показана на рис. 3.3 в начале главы.

Ожидалось, что увеличение геометрической ширины перехода приведет к снижению дифференциального сопротивления по току смещения, что в свою очередь (согласно ф. 3.4) должно было привести к уменьшению ширины линии генерации распределенных переходов. Для исследования такой зависимости была реализована серия интегральных микросхем HD11 с одинаковой конструкцией электродов и согласующих структур, длиной перехода L = 400 мкм, отличавшихся только шириной туннельного перехода (W = 5, 8, 12 и 16 мкм) [A4].

Результаты измерения ширины линии излучения РДП представлены на рисунке 3.11. Показанный вид зависимости ширины линии от частоты типичен для всех исследованных распределенных переходов: ниже области Vjsc (соответствующие частоты <490 ГГц) дифференциальное сопротивление на резонансных ступенях Фиске очень низкое и РДП имеет узкую спектральную линию. Перестройка частоты при этом затруднена, поэтому точки на графике ниже 450 ГГц отсутствуют. При напряжениях вблизи Vjsc из-за самонакачки дифференциальное сопротивление РДП быстро растет – это проявляется в виде пологих участков на ВАХ при напряжениях 0.9-1.1 мВ – что приводит к резкому росту ширины линии генерации РДП, которая затем постепенно снижается по мере асимптотического выхода вольт-амперной характеристики на ступень равных скоростей (англ. velocity matching step, когда скорость движения вихрей в переходе достигает скорости Свайхарта).



Рисунок 3.11 - Зависимость полуширины линии РДП с различной шириной перехода от частоты. Все микросхемы взяты из одной технологической серии. RnS = 30 Ом*мкм².

Можно видеть, что на всех целевых частотах проекта TELIS (500-650 ГГц) ширина линии излучения РДП существенно уменьшается с увеличением ширины перехода (а следовательно, спектральное качество фазово-синхронизированного РДП значительно улучшается). При увеличении ширины РДП до максимального предусмотренного в шаблоне HD11 значения W = 16 мкм спектральное качество продолжало улучшаться. Тем не менее, пиковая величина полуширины линии генерации РДП на частотах 500-550 ГГц все равно достигала десятков МГц, что было неприемлемо для интегрального гетеродина проекта TELIS.

Для продолжения исследований в фотошаблоне с кодовым номером HD13, были включены образцы, ширина переходов в которых составляла W = 20 и 28 мкм. Обобщенные экспериментальные данные для двух шаблонов представлены на рис. 3.12. Для наглядности приведены кривые зависимостей ширины линии генерации РДП от ширины перехода для трех частот – вблизи пика спектральной ширины $f_1 = 526 \Gamma \Gamma \mu$, на частоте $f_2 = 616 \Gamma \Gamma \mu$ и конце рабочего диапазона РДП $f_3 = 706 \Gamma \Gamma \mu$. При ширине больше чем W = 20 мкм спектральная линия изменяется слабо, однако нельзя сказать, что предел улучшения достинут. Однако, несмотря на то, что во всем исследованном диапазоне ширины переходов (от 5 до 28 мкм), минимум не был пройден, рекомендованная ширина переходов для практических приложений составляет 14-16 мкм. Это связано с тем, что с ростом ширины пропорционально растут и токи питания, необходимые для задания рабочей точки РДП, что может приводить к перегреву образцов за счет выделения тепла в контактах (бондах) микросхемы. Для TELIS температурный режим микросхемы был особенно важен, поскольку теплоотвод через кремниевую линзу был не очень хороший.



Рисунок 3.12 - Зависимость полуширины спектральной линии (левая ось) и спектрального качества (правая ось) РДП с различной шириной перехода, измеренные для трех частот (526 ГГц, 616 ГГц, 706 ГГц).

В обзоре литературы, в разделе 1.3.3 описано влияние областей перекрытия электродов (idle region, Wi) вблизи собственно области туннельного контакта на скорость распространения электромагнитных волн. Помимо этого, в области перекрытия электродов сильно меняется профиль растекания токов питания РДП в подводящих электродах (из-за протекания над сверхпроводящим экраном распределение тока вдоль перехода становится более равномерным). Изменение плотности тока вдоль перехода может влиять на параметры РДП, поэтому оптимальному профилю тока в РДП посвящены как теоретические, так и экспериментальные работы. В частности, на шаблоне HD11 проведено сравнение характеристик переходов с различным размером области перекрытия сверхпроводящих электродов вблизи области туннельного контакта [A4].

В целом, увеличение области перекрытия положительно влияет на спектральное качество РДП. Однако, большее перекрытие электродов означает также, что центр РДП оказывается сдвинут от края электрода, служащего контрольной линий, что значительно уменьшает величину R_d^{CL} (в данном случае за счет уменьшения магнитного потока). При этом значительно увеличивается ток контрольной линии, необходимый для задания высоких частот РДП в районе 700 ГГц. Показано, что оптимальная величина перекрытия электродов составляет порядка Wi = 10 мкм.

3.5 Влияние плотности критического тока

Исследовано влияние прозрачности (толщины) туннельного барьера на спектральные характеристики РДП. Для этого было изготовлено несколько партий тестовых образцов с различной плотностью критического тока.

Экспериментально обнаружена существенная зависимость ширины линии излучения ФФО от плотности критического тока туннельного перехода (см. рис. 3.13 - 3.15.) [A2]. Показано, что при сходных рабочих токах для переходов одинаковой топологии с ростом плотности критического тока ширина линии увеличивается, причем в диапазоне плотностей тока от 5,5 до 9 кА/см² зависимость прямо пропорциональная (см. рис. 3.15.). В частности, при повышении плотности тока до значений порядка 9 кА/см², которая является оптимальной для СИС смесителей субмм волн, ширина линии РДП составляет 10 - 30 МГц, что затрудняет реализацию режима фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и приводит к низкому спектральному качеству РДП.



Рисунок 3.13 - Зависимость автономной ширины линии излучения РДП одинакового дизайна от частоты для трех значений плотности тока.



Рисунок 3.14 - Семейство зависимостей ширины автономной линии генерации РДП от плотности критического тока.



Рисунок 3.15 – Семейство зависимостей с рис. 3.14, нормированных на плотность критического тока. Видно, что ширина линии пропорциональна плотности тока.

На основании полученных данных была предложена модификация технологии изготовления микросхемы интегрального приемника с целью обеспечить возможность изготавливать на одной подложке переходы СИС смесителей и распределенные туннельные переходы с различной плотностью критического тока (шаблон Т4).

Для случаев, когда усложнение технологического процесса нежелательно экспериментально показано, что оптимальное значение плотности критического тока для микросхемы СИП составляет около 6 кА/см², и позволяет выполнять всю схему на одной трехслойной структуре. Именно такие значения плотности тока были предложены в качестве базовых при изготовлении микросхем для проекта TELIS.

3.6 Переходы с гребенчатым верхним электродом

Как описывалось выше, увеличение области перекрытия сверхпроводящих электродов предположительно приводило к выравниванию профиля тока смещения вдоль распределенного перехода, и за счет этого к снижению ширины спектральной линии распределенного перехода. На основании этого С.В. Шитовым и В.П. Кошельцом был разработан ряд экспериментальных образцов (условное наименование шаблона - HD9) с полностью «самоэкранированным» РДП и РДП с гребенчатым электродом питания. Автором проведен ряд экспериментальных исследований таких переходов [А2].

Предполагалось, что переходы с гребенчатым электродом позволят экспериментально исследовать влияние профиля тока питания на спектральные характеристики РДП. Была изготовлена серия схем с различным числом «зубцов» в цепи смещения (10, 12, 13, 17, 19 и 20). Геометрия РДП была аналогичной предыдущим экспериментам, но длина отличалась:

L = 400 мкм, для 13, 17, 19 и 20 зубцов,

L = 260 мкм для 10, 12, 13 зубцов.

Ширина каждого зубца составляла 4 мкм, расстояние между зубцами – 16 мкм. Для равномерного задания тока в каждый зубец включен небольшой последовательный резистор. Схематично конструкция исследованных образцов показана справа на рис. 3.17. Сравнение на графике приведено для стандартного перехода, перехода с 20 зубцами в верхнем электроде (L = 400 мкм) и переходом с 13 зубцами (L = 400 мкм), причем зубцы отсутствовали на одном из краев перехода.



Рисунок 3.16 – Фотография центральной части микросхемы с гребенчатым электродом.

Измерения показали, что образцы с гребенчатым электродом питания дают высокую выходную мощность в широком диапазоне рабочих токов и напряжений на РДП (область хорошей накачки СИС-смесителя больше, чем для образцов референсного дизайна при одинаковой плотности критического тока), но при этом обладают значительно более широкой линией излучения (см. рис. 3.17 - ромбы). Для РДП с не запитанным хвостом (несколько штырей со стороны входа РДП удалены) спектральная линия становится уже, приближаясь по ширине к стандартному образцу референсного дизайна. Возможной причиной существенного увеличения ширины линии РДП для схемы с гребенчатым электродом питания может быть взаимодействие движущихся магнитных вихрей В переходе с пространственно-модулированным током смещения И геометрическими неоднородностями в линии передачи в местах подсоединения электродов питания. В случае, когда часть зубцов у входного края перехода отсутствует (сторона, где магнитные вихри входят в переход), такая модуляция проявляется далеко от входного конца, и уже не оказывает существенного влияния на движение флаксонов. Была предпринята попытка сгладить влияние зубцов за счет небольших расширений у их оснований, но как видно по графику рис. 3.17 (черные точки) это не принесло существенных улучшений.



Рисунок 3.17 - Ширина линии РДП различных дизайнов. Схемы тестовых дизайнов

показаны на вставке.

Полученные данные не позволили исследовать влияние профиля тока на ширину спектральной линии РДП, но, по-видимому, можно сделать вывод о том, что распределение тока возле входного края перехода влияет на спектральную характеристику в большей степени.

Заключение раздела

Экспериментально исследована зависимость электрофизических и спектральных характеристик РДП от топологии туннельного контакта. Выявлена зависимость ширины линии излучения РДП от геометрической ширины перехода и размера области перекрытия электродов; определены оптимальные значения параметров, приводящие к существенному уменьшению ширины линии генерации РДП.

Показано, что с ростом ширины перехода дифференциальное сопротивление и, соответственно, ширина линии излучения уменьшаются. При этом, несмотря на то, что во всем исследованном диапазоне ширины переходов (от 5 до 28 мкм) минимум не был пройден, рекомендованная ширина переходов составляет 14-16 мкм. Это связано с тем,

что с ростом ширины растут и токи питания, необходимые для задания рабочей точки РДП, что может приводить к перегреву образцов за счет выделения тепла в контактах (бондах) микросхемы. Наличие зоны перекрытия существенно изменяет характеристики РДП. Оптимальная величина перекрытия электродов составляет порядка 10 мкм. При этом при протекании над экраном выравнивается распределение тока смещения в подводящем электроде.

Показано, что для переходов одинаковой топологии с ростом плотности критического тока ширина линии увеличивается, причем в диапазоне плотностей тока от 4 до 9 к A/cm^2 зависимость прямо пропорциональная. Предложена модификация технологии изготовления микросхемы интегрального приемника, что позволило изготавливать в одной схеме СИС-смеситель и РДП на основе переходов с различной плотностью критического тока. Найдено оптимальное значение плотности тока (6-7 к A/cm^2), что позволяет выполнять всю схему на одной трехслойной структуре; эти значения плотности тока использовались при изготовлении микросхем для проекта TELIS.

Показано, что для распределенных переходов на основе туннельной структуры Nb-AlOx-Nb из-за эффекта самонакачки невозможно обеспечить требуемые для проекта TELIS спектральные параметры гетеродина в частотном диапазоне 500 - 550 ГГц, необходимо использовать другие сверхпроводящие материалы в качестве электродов.

Глава 4. Генераторы на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN

С точки зрения сверхпроводниковой СВЧ-электроники ниобий является одним из приоритетных технологических материалов – он имеет довольно высокую критическую температуру Tc = 9.2 K, обладает высокой механической прочностью, химической стабильностью, устойчивостью структуры к термоциклированиям и хорошей адгезией. Методы изготовления джозефсоновских переходов на основе пленок ниобия надежны и обладают хорошей воспроизводимостью.

При разработке устройств, работающих на частотах выше щелевой частоты ниобия (~ 700 ГГц), из-за резкого роста поверхностных потерь в ниобиевых пленках используют сверхпроводящие материалы с большей величиной энергетической щели, такие как, нитрид ниобия (NbN) и его сплав с титаном (NbTiN), имеющие критическую температуру Тс ~ 16 К. По механическим и химическим параметрам они близки к пленкам ниобия, но предельная рабочая частота устройств на их основе может быть значительно выше.

При проведении исследований в рамках проекта TELIS поиск новых материалов распределенных джозефсоновских переходов был мотивирован не только для необходимостью увеличения рабочей частоты генератора выше 700 ГГц. Даже наоборот, в первую очередь необходимо было обеспечить оптимальную работу сверхпроводникового интегрального приемника на частоте 500 ГГц. Изначально в концепции спектрометра TELIS было заложено три спектральных канала, причем на частоте 500 ГГц предусматривался отдельный СИС-приемник. Но возникшие при его разработке трудности заставили пересмотреть приоритетные частоты для канала СИП. Как было показано в Главе 3, даже с оптимизированной топологией распределенный переход Nb-AlOx-Nb на частотах 500-550 ГГц обладает наихудшими спектральными параметрами. фундаментальная проблема, связанная с Это возникновением самонакачки В распределенном переходе, граничная частота которой лежит вблизи 500 ГГц. Использование сверхпроводящих материалов с большей энергетической щелью помочь решить эту проблему.

Поликристаллические пленки нитрида ниобия по своим сверхпроводящим свойствам довольно сильно уступают ниобиевым пленкам: они имеют в несколько раз большую глубину проникновения магнитного поля $\lambda_{\text{NbN}} > 250$ нм и маленькую длину когерентности $\xi < 5$ нм [76], а также обладают большими поверхностными потерями на

высоких частотах. Такие пленки не пригодны для изготовления туннельных переходов, у которых верхний и нижний электроды были бы изготовлены из NbN.

В ИРЭ РАН необходимо было бы практически с нуля отрабатывать технологию изготовления новых структур, требовалась модернизация технологического оборудования для нагрева подложки (до 500-700 °C) при напылении пленки NbN. Поэтому, несмотря на то, что в литературе уже были данные об успешном испытании распределенных джозефсоновских генераторов на основе структур NbN-AlN-NbN [77], а один из соавторов был участником проекта, была предложен компромиссный вариант.

Технологическая часть работы была выполнена П.Н. Дмитриевым и Л.В. Филиппенко и подробно описана в работах [35-37]. Образцы изготавливались на подложках из высокоомного кремния толщиной 0,3 и 0,525 мм. Использовалась модифицированная технология селективного травления и анодирования, аналогичная технологии изготовления образцов на основе пленок ниобия. Для изготовления туннельного барьера из нитрида алюминия AlN была разработана процедура нитридизации алюминия в плазменном разряде. Начальная толщина пленки барьерного алюминия составляет порядка 70 Å. Толщина туннельного барьера AlN - около 10 Å (критическая плотность тока джозефсоновского перехода 5 - 10 кA/см²).

Первые интегральные схемы с верхним электродом из нитрида ниобия, изготовленные по разработанным для ниобия фотошаблонам успешно прошли испытания - щелевое напряжение СИС перехода составляло Vg = 3.63 мB, напряжение самонакачки соответственно увеличилось до ~ 1.2 мВ. Однако, сильный сдвиг частотной полосы согласования между РДП и СИС смесителем в область низких частот (выше 530 ГГц мощность РДП на СИС смесителе не детектировалась) не позволял проводить дальнейшие исследования. Для быстрого решения этой проблемы были предложены и успешно испытаны комбинированные схемы, в которых джозефсоновские переходы были изготовлены на основе трехслойной структуры Nb-AlN-NbN, а верхний слой металлизации, в котором выполнены подводящие электроды и линии передачи СВЧ, был изготовлен из ниобия. Схематический разрез такой структуры показан на рисунке 4.1. Очевидно, что при такой структуре слоев верхняя частотная граница по прежнему ниобиевыми настроечными структурами, определяется которые не позволяют продвинуться выше 700 ГГц, но для TELIS это и не требовалось.

В дальнейшем микросхемы сверхпроводникового интегрального приемника с конструкцией слоев как на рис. 4.1 были успешно внедрены в спектрометре TELIS [А7-А9].



Рисунок 4.1 – Схематическое изображение туннельного перехода на основе трехслойной структуры Nb-AlN-NbN с разводкой из Nb.

4.1. Электрофизические свойства РДП на основе Nb-AIN-NbN

На рис. 4.2 приведено семейство вольт-амперных характеристик распределенного джозефсоновского перехода (аналогично описанным в гл. 3) на основе структуры Nb-AlN-NbN длиной L = 400 мкм, шириной W = 14 мкм, плотность критического тока $Jc \sim 7 \text{ кA/cm}^2$. Каждая кривая на графике соответствует определенной величине тока контрольной линии, *Icl*, задающего магнитное поле в переходе. Приращение тока *Icl* между соседними кривыми составляет 1 мА. Красным цветом выделены области рабочих точек, при которых мощность сигнала, приходящего от РДП на СИС смеситель, стимулирует рост тока СИС смесителя больше одной четвертой от скачка тока на щелевом напряжении ($\Delta Ig/4 = 34,3 \text{ мкA}$). Такой рост тока смесителя соответствует оптимальной мощности накачки [73]. На рис. 4.3 представлена вольт-амперная характеристика СИС смесителя на Nb-AlN-NbN под воздействием излучения РДП на нескольких частотах, а на рис. 4.4 – огибающая максимальных токов, стимулированных РДП на СИС смесителе на различных частотах.



Рисунок 4.2 – Семейство вольт-амперных характеристик распределенного джозефсоновского перехода на основе структуры Nb-AlN-NbN/Nb.



Рисунок 4.3 - СИС смеситель Nb-AlN-NbN под воздействием излучения от РДП на различных частотах. Площадь перехода S ~ 1 мкм2, энергетическая щель перехода Vg ~ 3,7 мВ.



Рисунок 4.4 - Уровень максимального наведенного тока на гармоническом смесителе при Vsis = 2,5 мВ, в зависимости от частоты генерации РДП. Штриховой линией показана для сравнения аналогичная кривая для схемы на основе Nb-AlOx-Nb.

По форме кривой на рис. 4.4 можно косвенно судить об амплитудно-частотной характеристике согласующего тракта между СИС смесителем и РДП [А7], т.к. рост тока смесителя пропорционален мощности прошедшего от РДП сигнала. На рисунке видно, что благодаря настроечным структурам и разводке из ниобия, частотная характеристика согласования РДП и смесителя на основе Nb-AlN-NbN в целом образцам на основе Nb-AlOx-Nb. Тем не менее, равномерность накачки СИС смесителя немного улучшилась благодаря изменению вольт-амперной характеристики РДП (есть прирост мощности).

Вследствие увеличения энергетической щели верхнего электрода перехода (NbN) щелевое напряжение распределенного джозефсоновского перехода также выросло до $Vg = (\Delta_{Nb} + \Delta_{NbN})/e = 3,7 \ MB$. Зная щелевое напряжение полностью ниобиевых переходов $(Vg_{Nb} = 2\Delta_{Nb}/e = 2,8 \ MB)$ можем оценить величину энергетической щели в получившихся пленках нитрида ниобия

$$\Delta_{NbN}/e = 2,3 \ \text{MB}.$$

На вольт-амперных характеристиках как СИС смесителя, так и РДП на основе структур Nb-AlN-NbN проявляется также логарифмическая особенность, соответствующая разности щелевых напряжений электродов

$V_{diff} = (\Delta_{NbN} - \Delta_{Nb})/e \sim 0.9 \text{ }\text{\tiny MB},$

как и предсказывает теория. Как видно на рис. 4.2, наличие логарифмической особенности на разностной щели приводит к заметному росту квазичастичного тока, но в целом не меняет структуру вольт-амперной характеристики. Тем не менее, в области логарифмической особенности дифференциальное сопротивление РДП возрастает и, как будет видно позднее, это влияет на спектральные свойства РДП. Особенно сильно этот эффект проявляется при напряжениях порядка 1,05 мВ (соответствующая частота генерации ~ 508 ГГц). Увеличение щелевого напряжения перехода приводит также к увеличению граничного напряжения самонакачки V_b до 1.23 мВ (~580 ГГц).

Изменение вольт-амперной характеристики вызвано не только увеличенным значением энергетической щели верхнего электрода из нитрида ниобия, но и увеличением поверхностных потерь в электродах распределенного джозефсоновского перехода, связанных с использованием нитрида ниобия. Удельное сопротивление пленки нитрида ниобия, полученной при типичных режимах изготовления исследованных образцов составляет $\rho_{yo}^{NbN} = 180 - 200 \ mkOm^{\bullet}cm$, что на порядок превышает удельное сопротивление пленки нитридаение пленки ниобия резонатора в области туннельного контакта РДП понижается, что приводит к изменению вольт-амперной характеристики в области резонансных ступеней Фиске (вызванных стоячими волнами в полости перехода) – крутизна и длина ступеней уменьшается.

На рисунке 4.5 представлен фрагмент семейства вольт-амперных характеристик РДП, измеренный с меньшим шагом по току линии управления (ток, определяющий магнитное поле в переходе изменялся между соседними кривыми на 0.25 мА). При уменьшении шага по магнитному полю видно, что резонансные (близкие к вертикальным) участки соседних кривых соединяются. Отметим, что на горизонтальных участках ВАХ рабочих точек нет, они соответствуют перескоку с одной ступени на другую.

Частотное перекрытие резонансных ступеней соседних кривых – важная особенность РДП на основе Nb-AlN-NbN. Она позволяет задать любую частоту генерации даже в режиме ступеней Фиске, необходимо только правильно выбрать диапазон токов. Соответствующие алгоритмы для поиска оптимальных рабочих точек были успешно разработаны и внедрены в измерительную систему IRTECON и полетную электронику TELIS.



Рисунок 4.5- Увеличенный фрагмент семейства ВАХ РДП. Приращение тока контрольной линии между соседними кривыми составляет 25мА.



Рисунок 4.6 – Увеличенный фрагмент ВАХ РДП с выделенными ступенями Фиске.

На языке Python автором был разработан алгоритм для обработки вольт-амперных характеристик, который позволяет упростить визуальную идентификацию ступеней. Данный алгоритм выделяет близкие к вертикальным фрагменты вольт-амперных кривых (сравнивая наклон фрагмента со средним наклоном кривой). Затем через центры найденных фрагментов проводятся ломаные линии, соответствующие отдельным резонансным ступеням. На рисунке 4.6 представлен результат обработки вольт-амперной характеристики с рис. 4.5. Красным цветом показаны исходные кривые, синим – результат первого прохода алгоритма, выделяющего резонансные участки (кривые содержат только узловые точки, соответствующие краям ступенек), зеленые линии – результат работы программы.

На рис. 4.6 хорошо видно как проявляется особенность вольт-амперной характеристики, соответствующая разности энергетических щелей электродов РДП. В области напряжений около 1.05 мВ дифференциальное сопротивление на ступеньках возрастает настолько, что автоматический поиск и объединение соседних ступеней затрудняются.

Мы исследовали расстояние между соседними ступенями на вольт-амперной характеристике (рисунок 4.7). В случае переходов с низким коэффициентом затухания или переходов небольшой длины ступени Фиске проявляются очень отчетливо, и вольтамперная кривая РДП снятая при постоянном магнитном поле (одна из кривых семейства на рис. 4.2, 4.5) содержит одну [47] или несколько ступеней Фиске, как в случае наших образцов на основе переходов Nb-AlOx-Nb. Поскольку появление резонансных ступеней вызвано геометрическим резонансом (возникновением стоячей волны из-за отражения от выходного конца перехода), расстояние между ступенями определяется дисперсией в полости перехода. В случае переходов на основе ниобия проявляется, в основном, геометрическая дисперсия, связанная с сопряжением полости перехода с микрополосковыми линиями, образованными краями подводящих электродов. В переходах на основе Nb-AlN-NbN/Nb каждая вольт-амперная кривая пересекает много ступеней Фиске наклон которых зависит от частоты (рабочего напряжения РДП). Кроме того, расстояние между ступенями не постоянно, а сильно зависит от частоты (рис. 4.7). Ступени сгущаются вблизи напряжений, соответствующих ступеням самонакачки (напряжения, кратные Vg/(2n+1)). В частности, на графике хорошо заметно сгущение ступеней (уменьшение шага) при приближении к Vg/3 = 1.23 мВ и при Vg/5 = 0.74 мВ. В этом еще одно отличие от переходов на основе Nb-AlOx-Nb - как указывалось в Гл. 3, для них вторая ступень самонакачки на практике не видна.



Рисунок 4.7 – Зависимость расстояния между резонансными ступенями РДП от частоты при четырех значениях тока смещения для вольт-амперной характеристики с рис. 4.6.

Увеличенный наклон ступеней Фиске приводит к увеличению дифференциальных сопротивлений распределенного джозефсоновского перехода, что в свою очередь, вызывает ухудшение спектрального качества РДП с нитридом ниобия по сравнению с переходом на основе Nb-AlOx-Nb. Но при этом открывается качественно новая возможность: если раньше на низких частотах (ниже Vg/3) между ступенями Фиске существовали «запрещенные диапазоны», т.е. области напряжений, в которых не было рабочих точек РДП, и таким образом рабочая частота РДП могла принимать лишь ограниченный спектр дискретных значений, то теперь для любого напряжения в области ступеней Фиске можно найти рабочую точку, или даже несколько рабочих точек, соответствующих различным ступеням. Таким образом, переход на основе Nb-AlN-NbN позволяет избавиться от «запрещенных диапазонов» по напряжению, обеспечивая полный спектр перестройки частоты. Перестройка не является непрерывной, т.к. каждой

выбранной частоте соответствуют свои допустимые рабочие области по току. Но это всего лишь небольшое неудобство, по сравнению с возможностью выбора произвольной частоты генерации.

Обнаружение данного эффекта позволило расширить области применения РДП. Если раньше использование РДП в качестве гетеродина с непрерывной перестройкой частоты было возможно только в рабочей области с большим затуханием (на частоте выше ~520 ГГц в случае переходов из ниобия), а в области ступеней Фиске была возможна генерация лишь на ряде дискретных частот, то в случае распределенных переходов на основе Nb-AlN-NbN/Nb можно легко обеспечить генерацию на любой частоте, начиная примерно с 250 ГГц. Для иллюстрации приведем еще один фрагмент вольт-амперной характеристики, снятой с малым шагом (рис. 4.8). Точки не соединены линиями, что упрощает визуальное восприятие: работа РДП возможна только в областях, где есть рабочие точки. При любом напряжении можно найти несколько диапазонов рабочих токов (пересечение прямой V = const с наборами точек).



Рисунок 4.8 - Фрагмент вольт-амперных характеристик РДП Nb-AlN-NbN/Nb. Рабочие точки не соединены кривыми. Каждый «илейф» точек соответствует ступени Фиске.

Н.В. Киневым и О.С. Киселевым были проведены отдельные исследования дифференциальных сопротивлений (и ширины линии генерации РДП) внутри одной ступени Фиске. В центре ступени (на ее «средней» линии) ширина линии наименьшая. Были разработаны автоматические алгоритмы для поиска оптимальной рабочей точки.

Необходимо отметить, что сильный наклон ступеней Фиске позволяет не только реализовать любую нужную частоту, но и управлять мощностью РДП на заданной частоте в широком пределе. В качестве иллюстрации этого факта, приведем график вольтамперных кривых СИС-смесителя, накачанного РДП на частоте 500 ГГц (рис. 4.9) (лежащей в проблемном для Nb-AlOx-Nb РДП диапазоне 500-550 ГГц).



Рисунок 4.9 - СИС смеситель Nb-AlN-NbN под воздействием излучения от РДП на частоте 500 ГГц при различных значениях тока I_B.



Рисунок 4.10 – Гистерезис на вольт-амперной характеристике: А) без нагрева, Б) при нагревании образца, изменение δVg = 0.02 мB.

Вольт-амперная характеристика РДП имеет гистерезисный характер в области ступеней Фиске, как и в случае полностью ниобиевого перехода. Как видно на рис. 4.10, гистерезис может быть легко подавлен при небольшом подогреве образца (рис. 4.10Б), при этом щелевое напряжение перехода остается практически без изменений ($\delta Vg = 0.02$ мВ), но возрастает ток утечки РДП, из-за чего на рис. 4.10Б при низких токах смещения отсутствует накачка СИС смесителя и кривые окрашены в синий и зеленый цвет.

Гистерезис усложняет процедуру автоматического поиска рабочих точек, но подогрев образца существенно ухудшает его спектральные характеристики, несмотря на значительно большую величину энергетической щели в нитриде ниобия. Поэтому для новых образцов был рекомендован тот же температурный режим, что и для Nb-AlOx-Nb.

4.2 Исследование спектральных характеристик

Для внедрения в качестве гетеродина для TELIS помимо возможности непрерывной перестройки частоты и управления мощностью необходимо было показать, что РДП на основе структуры Nb-AlN-NbN обладает лучшими спектральными характеристиками, по сравнению с образцами из ниобия.

Исследование спектральных характеристик генераторов на основе распределенных переходов Nb-AlN-NbN/Nb проводилось по той же методике, что и для образцов на основе Nb-AlOx-Nb, описанной в Гл. 3. Использовались микросхемы двух типов: тестовые микросхемы типа «HD», содержащие только РДП и СИС смеситель, и микросхемы интегрального приемника, код «T4», содержащие РДП, СВЧ-развязку с делителем мощности для двух СИС смесителей, один из которых интегрирован с планарной антенной, а второй используется для фазовой стабилизации РДП, как в микросхемах «HD».

В ходе работы были проведены комплексные исследования спектральных характеристики РДП на основе Nb-AlN-NbN. Особенное внимание уделялось характеристикам гетеродина на частотах, выбранных для исследования атмосферы Земли с борта высотных аэростатов в рамках проекта TELIS (см. Таблицу 4.1, где указаны частоты РДП и наиболее важные газовые составляющие, которые могут быть измерены при этих частотах гетеродина).

Для «полетных» образцов в процессе процедуры предполетной характеризации спектральные характеристики РДП на всех частотах из табл. 4.1 сохранялись в специальной базе данных. Эти спектры в дальнейшем могли использоваться для коррекции ошибок выходных данных спектрометра.

На рисунках 4.11 – 4.13 показаны спектры РДП на трех частотах, выбранных для выполнения проекта TELIS (ширина линии и спектральное качество указано на каждом графике). Исследование спектральных характеристик РДП на основе структур Nb-AlN-NbN показало, что форма автономной линии генерации является лоренцевской, как и в случае переходов на основе Nb-AlOx-Nb, что свидетельствует о преобладающем влиянии широкополосных флуктуаций на итоговый спектр генератора [A7]. Основными факторами, определяющими ширину линии являются дифференциальные сопротивления по току питания и контрольной линии (Rd^B и Rd^{CL}, соответственно), которые преобразуют токовые флуктуации во флуктуации напряжения, а, следовательно, и частоты.

Таблица 4.1.

Xa	рактерные	спектральные	линии, 1	выбранные	для проекта	TELIS.
----	-----------	--------------	----------	-----------	-------------	--------

N⁰N⁰	Частота РДП, ГГц	Измеряемые вещества	
1	495.04	$H_2^{18}O$	
2	496.88	HDO	
3	505.60	BrO	
4	507.27	ClO	
5	515.25	О ₂ , указание направления, измерение температуры	
6	519.25	25 BrO и NO ₂	
7	607.70	O ₃	
8	619.10	HCl, ClO и HOCl	



Рисунок 4.11 – Спектральная характеристика излучения РДП Nb-AlN-NbN на частоте 515,2 ГГц, выбранной для исследований атмосферы в рамках проекта TELIS.



Рисунок 4.13 – Спектральная характеристика излучения РДП Nb-AlN-NbN на частоте 607.7 ГГц, выбранной для исследований атмосферы в рамках проекта TELIS.



Рисунок 4.13 – Спектральная характеристика излучения РДП Nb-AlN-NbN на частоте 619.1 ГГц, выбранной для исследований атмосферы в рамках проекта TELIS.

Обобщением серии измерений спектральных характеристик РДП является график зависимости полуширины автономной линии генерации РДП от частоты, представленный на рис. 4.14 (красная кривая со звездочками). Для сравнения представлена одна из лучших частотных зависимостей полуширины линии для полностью ниобиевых образцов (синяя кривая с ромбами).

Обе кривые получены для образцов одного типа – ширина перехода W = 16 мкм, длина L = 400 мкм, ширина области перекрытия электродов Wi = 10 мкм. [A7]. Как видно на графике, РДП на основе Nb-AlN-NbN имеет преимущество на всех частотах ниже границы самонакачки 620 ГГц, причем полуширина линии генерации РДП на этих частотах не превышает 4 МГц. А с учетом того, что отобранные в качестве полетных образцы микросхем интегрального приемника имеют хорошую чувствительность (шумовую температуру) только до 630 ГГц [A10], можно считать, что РДП на основе Nb-AlN-NbN является оптимальным гетеродином для проекта TELIS.



Рисунок 4.14 - Зависимость полуширины спектральной линии РДП от частоты для переходов на основе Nb-AlN-NbN/Nb и Nb-AlO_x-Nb.
На рис. 4.15 представлены графики зависимостей, аналогичные рис. 4.14, но измереные для экспериментального образца с РДП шириной W=30 мкм. На графике видно, что для РДП на основе Nb-AlOx-Nb ширина линии генерации во всем диапазоне не превышает 6 МГц, а для образцов с переходами Nb-AlN-NbN/Nb даже на пике, вызванном джозефсоновской самонакачкой ширина линии не превышает 4 МГц. Спектральное качество РДП с нитридом ниобия во всем диапазоне не опускается ниже 70%.



Рисунок 4.15 - Зависимость полуширины спектральной линии РДП от частоты (2 нижние кривые) и спектрального качества РДП (верхние кривые) в режиме ФАПЧ для переходов на основе Nb-AlN-NbN/Nb (HD14#23) и Nb-AlO_x-Nb.

В результате выполненной в рамках данной работы оптимизации топологии и параметров РДП (см. результаты главы 3) удалось заметным образом снизить ширину автономной линии генерации во всем частотном диапазоне для обоих типов переходов (см. рис. 4.15). Это позволило существенно увеличить спектральное качество сверхпроводникового генератора гетеродина, которое для оптимизированных РДП на

основе Nb-AlN-NbN во всем частотном диапазоне от 250 до 750 ГГц не опускается ниже 70 % (см. рис. 4.15). Результаты этих исследований и разработок были успешно использованы при выполнении международного проекта TELIS по исследованию атмосферы Земли с борта высотного аэростата.

Заключение раздела

Исследован генератор на основе распределенного джозефсоновского перехода Nb-AlN-NbN с согласующими структурами из Nb, который позволяет расширить область применения генераторов на основе РДП в диапазоне 250-700 ГГц. Показано, что благодаря росту поверхностных потерь в электроде из нитрида ниобия, при длине перехода около 400 мкм (и более) ступени Фиске имеют достаточный наклон для задания произвольной частоты.

Экспериментально исследованы спектральные характеристики образцов РДП на основе туннельных структур Nb-AlN-NbN (щелевое напряжение Vg = 3,7 MB) в диапазоне частот 250 – 750 ГГц. Ширина автономной линии генерации в рабочем диапазоне не превышает 7 МГц, излучаемая мощность - около 1 мкВт. Форма спектральной линии определяется, как и в случае переходов Nb-AlOx-Nb, широкополосными токовыми флуктуациями, которые преобразуются во флуктуации частоты с учетом и R_d^{CL}, дифференциальных сопротивлений по току питания и управления (R_d^B соответственно). Продемонстрирована возможность фазовой автоподстройки частоты во все частотном диапазоне от 250 до 750 ГГц со спектральным качеством выше 70 %.

По результатам исследований получен Патент РФ на конструкцию генератора на основе распределенных джозефсоновских переходов Nb-AlN-NbN (в соавторстве с В.П. Кошельцом и П.Н. Дмитриевым) [A13]

Показано, что разработанный и исследованый в работе РДП на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN, может быть использован в качестве гетеродина в частотном диапазоне 490-650 ГГц для спектрометра «TELIS». Продемонстрирована возможность сплошного покрытия заданного частотного диапазона в режиме резонансных ступеней Фиске, реализован режим ФАПЧ. Спектрометр прошел успешные полетные испытания.

Глава 5. Криогенная система замкнутого цикла

5.1 Конструкция

Системы охлаждения замкнутого цикла, предназначенные для обеспечения температур ниже 10 К, пользуются все большей популярностью благодаря развитию коммерческой криогеники и постоянному росту цен на жидкий гелий. Многие компании сейчас предлагают серийные криосистемы замкнутого цикла различной мощности и компоновки, причем, благодаря конкуренции между производителями, конечная стоимость оборудования для потребителя уменьшается. Применение систем замкнутого цикла позволяет отказаться (либо сильно сократить расход, в случае реконденсирующих систем) от использования сжиженных газов в качестве хладагентов, что во многих случаях упрощает обслуживание оборудования, снижает требования к классу подготовки помещения и квалификации обслуживающего персонала.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН традиционно используются криогенные системы на основе вакуумного криостата с жидкими хладагентами (жидкий азот, T = 77 К, жидкий гелий T = 4,2 К). Тем не менее, для развития прикладных направлений проведены работы по созданию измерительного комплекса на основе криосистемы замкнутого цикла. В качестве рефрижератора использовалась серийная криогенная система замкнутого цикла на импульсных трубках РТ-405 производства Сгуотесh Inc. (USA). Охлаждающая головка двухступенчатая, производительность второй ступени 0.5 Вт при 4,2 К, первой ступени - 25 Вт при 65 К. Компрессорный модуль системы оснащен водяным охлаждением, подключается к трехфазной электросети и в штатном режиме потребляет около 7 кВт.

Для указанного криокулера в ИПФ РАН (Нижний Новгород) был изготовлен криостат с оптическим окном и увеличенным рабочим объемом - диаметр холодной пластины на ступени 4,2 К составляет 200 мм, высота экрана – около 100 мм. Автор непосредственно принимал участие в процессе разработки технического проекта и согласования конструкторской документации на криостат. Необходимость разработки специализированной модели криостата была обусловлена рядом причин:

- во-первых, разработанный ранее для данного кулера криостат нельзя было адаптировать для планировавшихся в ИРЭ РАН измерений,

- во-вторых, представленные на тот момент серийные криостаты для систем замкнутого цикла (Janis, Oxford Instruments), имели слишком маленький рабочий объем, недостаточный для установки имевшихся охлаждаемых усилителей ПЧ и экспериментального образца в магнитном экране,

- в-третьих, стоимость зарубежных моделей в России была слишком высока, а сервисные возможности – крайне ограничены.

Выбранная вертикальная компоновка системы определяется паспортными ограничениями, согласно которым головка рефрижератора должна устанавливаться строго вертикально. К нижнему фланцу охлаждающей головки РТ-405 крепится медная пластина диаметром 206 мм с сеткой монтажных резьбовых отверстий МЗ с шагом 10 х 10 мм. Такая же сетка используется в заливных криостатах нашей лаборатории, что позволяет переносить оборудование из криостата в криостат без доработки креплений. Внешний корпус криостата имеет расширение в нижней части, чтобы увеличить полезный объем (см. рис. 5.1).

Для уменьшения внешней тепловой нагрузки используется стандартная система из двух тепловых экранов, выполненных из алюминия (с суперизоляцией). Первый тепловой экран крепится к фланцу первой ступени головки (паспортная температура составляет $T_1 = 65 \text{ K}$), второй экран устанавливается прямо на холодной рабочей пластине (см. сечение на рис. 5.1).

Кабельная оснастка криостата частично выполнена в ИПФ РАН по подготовленной автором спецификации, а частично самим автором в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Для уменьшения тепловой нагрузки, приходящейся на вторую ступень головки рефрижератора, все линии для измерения напряжения были изготовлены из манганина диаметром 0.2 мм (удельное сопротивление 44,5*10⁻⁶ Ом*см, удельная теплопроводность 43,8 Вт/см); линии задания тока, в зависимости от назначения, изготавливались из одной или двух жил провода из фосфорной бронзы (удельное сопротивление 7*10⁻⁶ Ом*см, удельная теплопроводность 461 Вт/см). Для ввода-вывода высокочастотных сигналов (каналы 50 Мгц, 1 ГГц, 4 ГГц, и 20 ГГц) предусмотрены четыре 50-омных коаксиальных кабеля диаметром 2.2 мм, внешняя оболочка которых изготовлена из нержавеющей стали, а центральная жила из посеребренной бериллиевой бронзы. Такая комбинация кабелей позволяет на несколько порядков уменьшить тепловую нагрузку, обусловленную

теплопроводностью, по сравнению с медными или алюминиевыми коаксиальными кабелями.



Рисунок 5.1 - Трехмерная модель криостата с охлаждающей головкой РТ-405 (слева) и трехмерное сечение рабочего объема криостата с оптическим окном и тепловыми экранами (справа). Модель выполнена В.Н. Густяковым (ИФМ РАН).

5.2 Рабочая температура

На холодной пластине криостата были смонтированы фильтры постоянного тока для уменьшения наводок по цепям питания, аналогичные описанным в Главе 2, а также охлаждаемые усилители и направленный ответвитель цепей промежуточной частоты приемника (выход СИС-смесителя) и системы ФАПЧ (аналогично схеме установки в главе 2). Полностью оснащенная система выходит на рабочий режим (температура холодной пластины второй ступени T ~ 4 K) менее чем за три часа.



Рисунок 5.2 - Зависимость температуры рабочей поверхности от мощности на нагревателе. Скачок температуры при P = 200 мВт вызван переключением диапазонов термодатчика.

Были проведены исследования температуры на рабочей поверхности в зависимости от мощности тепловой нагрузки (см. рис. 5.2). Для измерения температуры использовался калиброванный датчик (термосопротивление на основе мостика из германиевой, Ge, пленки), установленный на холодной пластине вблизи фильтров питания. Как показали тестовые измерения с дополнительным резистором-нагревателем, система в сборе, с

учетом тепловой нагрузки от экранов, оптического окна и кабельной оснастки, имеет резерв по тепловой мощности не менее 70 мВт на тепловыделение усилителей при температуре 4,2 К.

В дальнейшем, были проведены исследования с экспериментальными образцами микросхем сверхпроводникового интегрального приемника на основе Nb-AlN-NbN.

Для сосредоточенного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник изменение вольт-амперных характеристик при тех же значениях мощности нагрева (от 0 до 500 мВт) показано на рис. 5.3 и 5.4.



Рисунок 5.3 - ВАХ СИС перехода Nb-AlN-NbN при увеличении тепловой нагрузкеи на второй ступени криокулера от 0 мВт до 500 мВт.



Рисунок 5.4 - Увеличенный фрагмент ВАХ СИС-смесителя в области скачка тока на щели при различных значениях мощности тепловой нагрузки.

Изменение щелевого напряжения СИС перехода относительно невелико и составляет 0.03 мВ – от 3.7 мВ при 0 мВт до 3.67 мВ при 500 мВт. Тем не менее, поскольку тепловая нагрузка от охлаждаемых усилителей составляет около 20 мВт, в момент включения усилителей температура образца изменяется. Перед началом измерений необходимо дождаться стабилизации температурного режима.

Работа компрессора высокого давления и клапанов системы охлаждения на импульсных трубках приводит к возникновению механических вибраций на холодной пластине с образцом. Амплитуда колебаний может достигать десятков микрон [78], а спектральный состав имеет сложный характер, поэтому для критических приложений производители рекомендуют использовать либо дорогостоящие специализированные демпфирующие устройства, позволяющие снизить амплитуду до менее 0.5 мкм, либо

использовать вибро-развязывающие крепления и гибкие теплопроводы при монтаже холодной пластины с образцом, либо производить измерения при отключенном компрессоре. В данной работе характеристика и возможное влияние механических вибраций специально не исследовалось, однако показано, что вибрации не мешают проводить полную характеризацию СИП, включая измерение шумовой температуры приемника.

Помимо механических колебаний при работе компрессора системы замкнутого цикла возникают температурные осцилляции. Это происходит вследствие низкой теплоемкости обычных металлов при температурах в несколько градусов Кельвина. Как было указано выше, для измерения температуры использовалось тонкопленочное германиевое термо-сопротивление. Датчик подключался к мультиметру Agilent по 4-х проводной схеме, значения измеренного сопротивления передавались по шине КОП один раз в секунду и сохранялись специальным плагином к Microsoft Excel. По температурной «шумовой дорожке» можно определить разброс между минимумом и максимумом температуры, который составляет около 0.05 К (см. рис. 5.5 и 5.6).



Рисунок 5.5 - Температурная «шумовая дорожка» (показания термометра от времени).



Рисунок 5.6 - Показания термометра криосистемы замкнутого цикла от времени (увеличенный фрагмент).

Период колебаний температуры можно оценить, например, по осцилляции тока СИС смесителя, т.к. канал измерения тока позволяет проводить измерения намного быстрее. На рис. 5.7 приведена зависимость тока смещения СИС смесителя от времени в процессе охлаждения системы (рабочая температура еще не стабилизировалась, что объясняет дрейф среднего значения). Напряжение рабочей точки Vsis = 3мВ. Остальные устройства отключены. Период колебаний: Т ~ 0,7 с; амплитуда по току – 1-2 мкА. На рис. 5.8 приведен график зависимости тока смещения СИС смесителя от времени на квазичастичной ступени после стабилизации рабочей температуры криостата и поданном сигнале от РДП. Напряжение рабочей точки СИС смесителя: $Vsis = 3 \ MB$, рабочая точка распределенного джозефсоновского перехода: $f_{LO} = 497 \ \Gamma T \mu$, ток смещения $Ib=21,7 \ MA$, ток управляющей линии магнитного поля $Icl = 64,5 \ MA$.



Рисунок 5.7 - Осцилляции тока СИС смесителя в фиксированной рабочей точке (кривые соответствуют разному начальному времени измерений) вызванные колебаниями температуры. Напряжение V_{sis} = 3mV. Период колебаний T ~ 0,7 с. На один период приходится около 10 точек кривой.



Рисунок 5.8 - Осцилляции тока СИС смесителя в заданной рабочей точке при подаче сигнала РДП. (Vsis = 3 мВ, частота излучения РДП 497 ГГц). Период колебаний T ~ 0,7 с.



Рисунок 5.9 - Быстрое преобразование Фурье для кривой Isis(t) с рис. 5.7.

Приведенный на рис. 5.9 график преобразования Фурье, выполненного для одной из кривых с рис. 5.7 показывает один пик на частоте $f_T = 1,416 \, \Gamma \mu$, что соответствует определенному по графикам периоду Т ~ 0,7 с. Высшие гармоники отсутствуют, что косвенно свидетельствует о том, что осцилляции тока вызваны только тепловыми эффектами, а не электрическими наводками вследствие механических вибраций.

5.3 Исследование РДП в системе замкнутого цикла

Для тестовых целей была выбрана экспериментальная сборка с образцом сверхпроводникового интегрального приемника T4d-021#06 на основе структуры Nb-AlN-NbN. В данном образце используется гетеродин на основе РДП оптимизированной конструкции, описанной в Разделе 3 и 4: длина L = 400 мкm, ширина W = 16 мкm, область перекрытия электродов $W_{idle} = 12 \text{ мкm}$. Для подключения образца использовалась типовая конструкция монтажного блока, разработанная и испытанная для проекта TELIS. Образец был установлен на кремниевой линзе и с помощью ультразвуковой сварки подключен к контактным площадкам платы питания и линий передачи промежуточной частоты. Линза с платой питания на специальном держателе помещались в цилиндрический магнитный экран из криопермаллоя и соединялись с холодной пластиной криокулера с помощью двух дополнительных теплопроводов из алюминиевой проволоки диаметром 2 мм.

Семейство вольт-амперных характеристик РДП приведено на рис. 5.10. Цветом показан условный уровень мощности РДП, детектируемый СИС смесителем. Синий цвет на графике соответствует нулевому уровню наведенного тока СИС смесителя, красный – уровень наведенного тока выше 60 мА. Воль-амперная характеристика образца в системе замкнутого цикла соответствовала ВАХ, измеренной в тестовой «макалке» при погружении в жидкий гелий.

Согласно стандартной методике, описанной в предыдущих главах, исследована возможность спектрального анализа излучения РДП в разработанной криосистеме замкнутого цикла. На ВАХ РДП выбиралась некоторая рабочая точка с заданной частотой; сигнал РДП подавался на СИС смеситель, где смешивался с гармоникой опорного стабильного синтезатора. Разностный сигнал в полосе промежуточных частот 0 - 1 ГГц через цепочку усилителей промежуточной частоты подавался на лабораторный анализатор спектра Agilent.



Рисунок 5.10 – Семейство вольт-амперных характеристик РДП (образец T4d-021#06) при различных токах контрольной линии от 20 мА до 100 мА.



Рисунок 5.11 – Спектральная характеристика РДП в режиме частотной и фазовой стабилизации на частоте 547 ГГц. Штриховая кривая сдвинута по частоте для наглядности.

Вследствие описанных в предыдущем разделе температурных колебаний, связанных с рабочим циклом компрессора и клапанов системы охлаждения, проведение корректных измерений ширины линии распределенных джозефсоновских переходов без дополнительной температурной стабилизации в нашей системе оказалось невозможным. Осцилляции температуры приводили к тому, что рабочая точка РДП по напряжению также осциллировала вблизи некоторого среднего значения, V_{РЛП}. При этом менялась частота генерации РДП, что приводило к осцилляциям спектральной линии в диапазоне промежуточных частот, наблюдаемом с помощью анализатора спектра. Поскольку ток смещения и ток контрольной линии задаются от внешних стабильных источников (время стабилизации по крайней мере на порядок меньше периода температурных колебаний Т = 0,7 с), осцилляции напряжения вызваны изменением наклона ВАХ в рабочей точке (увеличение крутизны ступеней при охлаждении образца за счет уменьшения потерь). Амплитуда колебаний частоты РДП может составлять от десятков МГц (что соответствует отклонению напряжения примерно от 20 нВ до 100 нВ) до нескольких сотен МГц (до 400 нВ). Наблюдение таких сильно «блуждающих» линий затруднено. Тем не менее, в случаях, когда амплитуда осцилляций частоты не превышала 200 МГц, система частотной и фазовой автоподстройки частоты, в целом, справлялась с задачей стабилизации РДП по отношению к опорному генератору.

На рис. 5.11 представлен преобразованный вниз по частоте спектр РДП, полученный в режиме ФАПЧ на частоте 547 ГГц по стандартной методике. Сплошной красной кривой показана усредненная (100 измерений) спектральная характеристика в режиме поддержания частоты ("frequency lock"), штрихпунктирной черной – усредненная спектральная линия РДП в режиме фазовой стабилизации ("phase lock"). Рассчитанная для красной кривой полуширина спектральной линии составляет $\delta f = 2,4 M \Gamma u$, в то же время спектральное качество, рассчитанное по стандартной методике для кривой, снятой в режиме фазовой стабилизации, составляет CK = 95%. Как легко видеть на рис. 5.12, эти цифры не укладываются в стандартную модель, связывающую спектральное качество и полуширину линии РДП. При таком высоком спектральном качестве полуширина автономной линии генерации РДП должна лежать в диапазоне 1-1,5 МГц.



Рисунок 5.12 – Зависимость спектрального качества от полуширины линии генерации РДП. Сплошной кривой показана модельная зависимость для системы ФАПЧ с полосой 10 МГц.

Уширение вызвано проведенным усреднением по времени, т.к. за счет тепловых колебаний даже при активной системе стабилизации частоты спектр излучения РДП не стабилен. На рис. 5.11 тонкой штриховой кривой показан спектр РДП, полученный без усреднения в режиме частотной стабилизации. Была выбрана широкая входная полоса спектроанализатора ("resolution bandwidth") для ускорения измерений. Визуально видно, что отношение сигнал-шум в режиме измерения без усреднения намного выше, и соответствующая полуширина лоренцевской кривой должна быть меньше. На рис. 5.13 приведена спектральная кривая, снятая в режиме поддержания частоты без усреднения (см. рис. 5.11), на которую наложена аппроксимация лоренцевской кривой с полушириной 1.5 МГц (подгонка проведена с не очень высокой точностью из-за большого уровня шумов на исходной кривой). Это значение уже хорошо согласуется с зависимостью спектрального качества от полуширины линии и позволяет сделать вывод о том, что дополнительного влияния на спектр РДП, помимо тепловых флуктуаций, нет.



Рисунок 5.13 – Спектр РДП в полосе ПЧ, записанный без усреднения (кривая 3 на рис. 5.11). Полуширина аналитической подгоночной кривой составляет 1.5 МГц.

Заключение раздела

Колебания температуры, связанные с работой компрессора, делают систему замкнутого цикла малопригодной для исследования спектральных характеристик распределенных джозефсоновских переходов вследствие того, что даже небольшие колебания температуры на уровне 0.05 К приводят к значительным колебаниям рабочей частоты РДП, амплитуда которых, в зависимости от рабочей точки, может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен мегагерц. Таким образом, система ФАПЧ может эффективно поддерживать частоту РДП только в «хороших» рабочих точках с низким значением дифференциальных сопротивлений и полноценное измерение во всем диапазоне не представляется возможным.

Использование криосистем замкнутого цикла для охлаждения интегральных сверхпроводниковых схем с РДП возможно в случае применения дополнительных систем стабилизации температуры.

Простейшим способом демпфирования колебаний может служить использование редкоземельных сплавов, теплоемкость которых при низких температурах значительно превышает теплоемкость обычных металлов.

На момент выполнения работ производители криогенных систем не имели серийных систем активной стабилизации температуры, которые могли бы обеспечивать необходимую точность (лучше 0,05 К), тем не менее, создание такой системы кажется технически реализуемой задачей.

Наиболее радикальным, но гарантирующим хороший результат решением является использование реконденсирующих систем с криокулером замкнутого цикла. Общим в таких системах является резервуар для жидкого гелия, который монтируется на второй ступени криокулера. Резервуар может наполняться либо традиционным способом с использованием жидкого гелия, чтобы затем обеспечивать длительное время автономной работы за счет криосистемы замкнутого цикла, либо такой резервуар может быть заполнен газообразным гелием, который при охлаждении будет сжижаться и обеспечивать необходимую температурную стабилизацию. Второй вариант закрытой системы более предпочтителен, т.к. не требует дополнительного сервисного обслуживания.

Заключение

Получены следующие результаты:

- Экспериментально исследована зависимость электрофизических и спектральных характеристик РДП от топологии туннельного контакта. Выявлена зависимость дифференциального сопротивления РДП от геометрической ширины перехода и размера области перекрытия электродов; определены оптимальные значения параметров, приводящие к существенному уменьшению ширины линии генерации РДП.
- Исследован генератор на основе распределенного джозефсоновского перехода Nb-AlN-NbN с согласующими структурами из Nb, который позволяет расширить область применения генераторов на основе РДП в диапазоне 250-700 ГГц.
- 3) Экспериментально исследованы спектральные характеристики образцов РДП на основе туннельных структур Nb-AlN-NbN в диапазоне 250 – 700 ГГц. Ширина автономной линии генерации в диапазоне 250-700 ГГц составляет от 2 до 7 МГц, излучаемая мощность - около 0,5 мкВт. Форма спектральной линии определяется, как и в случае переходов Nb-AlOx-Nb, широкополосными токовыми флуктуациями.
- 4) Проведено экспериментальное исследование спектральной чувствительности и диаграммы направленности интегральных линзовых антенн для серии образцов микросхем сверхпроводниковых приемников. Цель исследования: отбор микросхем для проекта TELIS (наклонное зондирование атмосферы, канал 490 - 630 ГГц).
- 5) Разработано несколько криогенных измерительных систем, в частности, криогенная система замкнутого цикла для сверхпроводникового интегрального приемника. Продемонстрирована возможность эксплуатации сверхпроводникового интегрального приемника с РДП в криосистеме замкнутого цикла. Обнаружены ограничения, возникающие при работе с такой системой. Предложены способы решения возникающих проблем.
- 6) По результатам исследований РДП Nb-AlN-NbN получен патент РФ на изобретение.

Публикации автора по теме диссертации

Основные публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК

[A1] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.R. Wesselius, P.A. Yagoubov, C. Mahaini, J. Mygind, "Externally Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receivers: Achievements and Limitations" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 13, No 2, pp.1035-1038, 2003

[A2] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V.Filippenko, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, A.L. Pankratov, V.V. Kurin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen. "Superconducting Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receiver"// Superconducting Science and Technology, v. 17, pp. S127-S131, 2004

[A3] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A.
V. Khudchenko, M.Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko, "Superconducting Integrated Receiver for TELIS" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, 2005

[A4] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, V.V. Kurin, A.L. Pankratov, J. Mygind, "Optimization of the Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for the Submm Integrated Receiver" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, 2005

[А5] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков , Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, **М.Ю. Торгашин**, А.В. Худченко, «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы.», // Известия ВУЗов «Радиофизика», Том XLVIII, № 10–11, стр. 947-954, 2005

[A6] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V., A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, W.J. Vreeling, W. Wild, and O.M. Pylypenko, "Superconducting Submm Integrated Receiver for TELIS" // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing Ltd, volume 43 (2006), p. 1377 – 1381

[A7] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev,
A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild,
"Integrated Submillimeter Receiver for TELIS" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 17, pp. 336-342, 2007

[A8] **M.Yu. Torgashin**, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V.Filippenko, and P.A. Yagoubov, "Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 17, pp.379- 382, 2007

[А9] Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., **Торгашин М.Ю.**, Худченко А.В, Ягубов П.А.,. "Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона длин волн для атмосферных исследований" // Известия ВУЗов «Радиофизика», Том L, № 10–11, стр. 935-940, 2007

[A10] 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, №5, с.75-81, 2010

[A11] Gert de Lange, 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, 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, 2010

Другие издания и доклады на конференциях

[A12] V.P. Koshelets, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin** and J. Mygind, Глава 7 "Development and Applications of Josephson Flux-Flow Oscillators" в сборнике Studies in High Temperature Superconductors, v.50, ред. Anant Narlikar, c. 205-226, Nova Science Publishers, New York, 2006

[А13] Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., **Торгашин М.Ю.** "Криогенный генератор гетеродина на основе распределённого туннельного перехода для интегрального спектрометра субмм волн с системой ФАПЧ", Патент на изобретение № 22325003, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской федерации 20 мая 2008 года.

[A14] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V.Filippenko, O.V. Koryukin, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, «Integrated Submillimeter and Terahertz Receivers with Superconducting Local Oscillator», presented at the 8th International Workshop "From Andreev Reflection to the International Space Station" Björkliden, Kiruna, Sweden, March 20-27, 2004.

[A15] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A.
V. Khudchenko, M.Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko, "Superconducting Integrated Receiver for TELIS", Applied Superconductivity Conference ASC'2004, USA, October, 2004; Report 2ET06.

[A16] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, V.V. Kurin, A.L. Pankratov, J. Mygind, "Optimization of the Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for the Submm Integrated Receiver", Applied Superconductivity Conference ASC'2004, USA, October, 2004; Report 2ET07.

[А17] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, И.Л. Лапицкая, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, **М.Ю. Торгашин**, А.В. Худченко, «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы.», Всероссийский семинара по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, Нижний Новгород, март, 2005.

[A18] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V. Khudchenko, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R. W.M Hoogeveen, and W. Wild, "Superconducting Submm Integrated Receiver with Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for TELIS"; The 16th International Symposium on Space Terahertz Technology, Sweden, May 2005, Conference Proceedings ISSTT 2005, p. 276 – 271.

[A19] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.V. Koryukin, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**. Development of the Flux-Flow Oscillators for Submm Integrated Receiver" Extended Abstract of the ISEC 2005, September 2005, the Netherlands, p. PL-07.

[A20] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V. Khudchenko, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, W.J. Vreeling, W. Wild, and O.M. Pylypenko, "Superconducting Submm Integrated Receiver for TELIS" – Abstract for the 7th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS '05, Report TH-P4-136, p.332; September 2005, Vienna. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing Ltd, volume 43 (2006), p. 1377 – 1381.

[A21] V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V.Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, I.L. Lapitskaya, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R. W.M Hoogeveen, "Integrated Submillimeter Receiver for TELIS", The Joint International Workshop "Nanosensors and Arrays of Quantum Dots and Josephson Junctions for space applications" combined with the 10th International Workshop "From Andreev Reflection to the Earliest Universe" Björkliden, Kiruna, Sweden, April 1-9, 2006.

[A22] P. Yagoubov, R. Hoogeveen, **M. Torgashin**, A. Khudchenko, V. Koshelets, N. Suttiwong, G. Wagner, M. Birk, "550-650 GHz spectrometer development for TELIS", The 17th International Symposium on Space Terahertz Technology, Paris, May 2006, Conference Proceedings ISSTT 2006, report FR3-3.

[A23] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, "Iintegrated Submillimeter Receiver for TELIS", presented at the Applied Superconductivity Conference ASC-2006. Seattle, USA, August 2006, report 2EY01.

[A24] **M.Yu. Torgashin**, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V.Filippenko, and P.A. Yagoubov, "Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits" presented at the Applied Superconductivity Conference ASC-2006. Seattle, USA, August 2006, report 3EG08.

[A25] Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., **Торгашин М.Ю.**, Худченко А.В. и Вакс В.Л., "Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм волн для мониторинга атмосферы", 4-ая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, ноябрь 2006 г.

[A26] Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., **Торгашин М.Ю.,** Худченко А.В. "Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона волн для атмосферных исследований", Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2007.

[A27] 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 Spectrometer for TELIS", presented at the 18th International Symposium on Space Terahertz Technology, Pasadena, CA, USA, March 2007, report 10-5

[A28] V. P. Koshelets, A.B. Ermakov, P. N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, N. V. Kinev, O. S. Kiselev, I.L. Lapitskaya, A. S. Sobolev, **M. Yu. Torgashin**, P. A. Yagoubov, R. W.M. Hoogeveen, G. de Lange, and W. Wild, "Superconducting integrated receivers for radio astronomy and atmospheric monitoring", 11-th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2007), Washington D.C., USA, June 2007.

[A29] 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.

[A30] 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

[A31] 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.

[А32] Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., **Торгашин М.Ю.**, Филиппенко Л.В., Худченко А.В., «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм диапазона волн для атмосферных исследований и радиоастрономии». Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2009.

[A33] 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", Yerevan, Armenia, May 26 - 28, 2009.

[A34] 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.

[A35] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, I.L. Lapitskaya, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, "Superconducting Integrated Terahertz Spectrometer for Atmosphere Monitoring and Radio Astronomy", Invited talk to the I.F. Schegolev Memorial Conference "Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems", October 11–16, 2009, Chernogolovka, Russia.

[A36] Valery Koshelets, Pavel Dmitriev, Andrey Ermakov, Lyudmila Filippenko, Andrey Khudchenko, Nickolay Kinev, Oleg Kiselev, Alexander Sobolev, **Mikhail Torgashin**, "Superconducting integrated submm wave receiver for atmosphere monitoring", The 10-th Workshop on Submm-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Wu-Xi, China, November 15-18, 2009.

[A37] 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**, Gert de Lange, Arno de Lange, Leo de Jong, Pavel A Yagoubov, Vladimir L. Vaks, Sergey I. Pripolzin, "Superconducting Integrated THz Receivers", 21th International Symposium on Space Terahertz Technology, Oxford, Great Britain, 23-25 March 2010.

[А38] 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.

[A39] 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", presented at the "Infrared, Millimeter Wave, and Terahertz Technologies" conference is part of Photonics Asia 2010, 18-20 October 2010, Beijing, China.

[A40] **М.Ю. Торгашин**, Киселев О.С., Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелец, «Интегральный приемник субмм диапазона на основе низкотемпературных сверхпроводников», конференция «Прикладная сверхпроводимость – 2010», 23 марта 2010 г, Москва.

Литература

[1] Интернет-ресурс <u>https://www.ieee.org/membership-</u> catalog/productdetail/showProductDetailPage.html?product=PER195-ELE

[2] Интернет-ресурс <u>http://almaobservatory.org/</u>

[3] Mittleman, D. M., Jacobsen, R. H. & Nuss, M. C., *T-ray imaging*, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 2, 679-692 (1996)

[4] Ishigaki, K. Shiraishi, M.; Suzuki, S.; Asada, M.; Nishiyama, N.; Arai, S., «Direct intensity modulation and wireless data transmission characteristics of terahertz-oscillating resonant tunnelling diodes», Electronics Letters, Vol. 48, Issue: 10, pages: 582 – 583, 2012

[5] M.Tarasov; L.Kuzmin; V.Edelman; S.Mahashabde; P.DeBernardis, "Optical Response of a Cold-Electron Bolometer Array Integrated in a 345-GHz Cross-Slot Antenna", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, no. 6, pp. 3635-3639, 2011

[6] Gaidis M.C., LeDuc H.G., Bin M., Miller D., Stern J.A., Zmuidzinas J. "Characterization of low noise quasi-optical SIS mixers for the submillimeter band" // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, p. 1130-1139 (1996).

[7] Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. — М.: Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.

[8] C.P. Endres, F. Lewen, T.F. Giesen, and S. Schlemmer, D.G. Paveliev, "Application of a Superlattice Multiplier for High Resolution THz Spectroscopy", Review of Scientific Instruments, vol. 78, Issue 4, pages 043106 - 043106-6, 2007.

[9] A. Maestrini et al., Design and Characterization of a Room Temperature All-Solid-State Electronic Source Tunable From 2.48 to 2.75 THz, IEEE Transaction on THz science and Technology, Vol. 2, No. 2, 2012

[10] G. Chattopadhyay, "Technology, Capabilities, and Performance of Low Power Terahertz Sources", IEEE Transactions on THz Science and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 33 – 53, 2011.

[11] J. Ward et al., "Local Oscillators from 1.4 to 1.9 THz"// J. Ward , E. Schlecht , G. Chattopadhyay , H. Javadi , J. Gill , I. Mehdi , A. Maestrini and C. Tripon-Canseliet , Proc. 16th Int. Space Terahertz Technol. Symp., pp.374 -377 (2005)

[12] T. Berg et al., Stability of HEB Receivers at THz Frequencies, Proceedings of SPIEVol. 5498, pp.605-615 (SPIE, Bellingham, WA, 2004)

[13] P. Khosropanah et. al., Sensitivity of an NbN hot electron bolometeter based heterodyne receiver at 4.3 THz, Proceedings of the 18th International Symposium on Space Terahertz Technology, pp. 190-192, 2007

[14] Tsu R., Esaki L. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. P. 562.

[15] Suzuki S., Asada M., Teranishi A., Sugiyama H., Yokoyama H. // Appl. Phys Lett., 97, 242102 (2010).

[16] M. Feiginov, C. Sydlo, O. Cojocari, P. Meissner // Appl. Phys Lett., 99, 233506 (2011)

[17] P. Khosropanah et. al., Phase locking of a 2.7 THz quantum cascade laser to a microwave reference, Optics Letters, Vol. 34, No. 19, pp. 2958-2960, 2009.

[18] M. Hajenius, R Khosropanah, J.N. Hovenier, J.R. Gao, T.M. Klapwijk, S. Dhillon, S. Barbieri, P. Filloux, C. Sirtori, D.A. Ritchie and H.E. Beere // Proceedings of the 17th Symposium on Space Terahertz Technology, pp. 347-350, 2006.

[19] В.Д. Анцыгин, А.А. Мамрашев, Н.А. Николаев, О.И. Потатуркин, «Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера», // Автометрия, Т.46, №3, стр. 110-117, 2010г.

[20] I.C. Mayorga, A. Schmitz, T. Klein, C. Leinz, R. Gusten, "First In-Field Application of a Full Photonic Local Oscillator to Terahertz Astronomy", // IEEE Trans. THz Sci. and Tech., Vol. 2, No. 4, pp. 393-399 (2012).

[21] K.L. Wan, A.K. Jain, and J.E. Lukens, "Submillimeter Wave Generation Using Josephson Junction Arrays", Appl. Phys. Lett. **54**, 1805 (1989)

[22] Tarasov, M.; Stepantsov, E.; Lindstrom, T.; Kalabukhov, A.; Ivanov, Z.; Claeson, T., "Antenna coupled planar arrays of Josephson junctions", Physica C, v 372-376, pt.1, p. 355-9 (2002).

[23] 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. **105**, 057002 (2010)

[24] M. Li, J. Yuan, N. Kinev, J. Li, B. Gross, S. Gurenon, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, V.P. Koshelets, H. Wang, and P. Wu, "Linewidth dependence of coherent terahertz emission from Bi₂Sr₂CaCu₂O₈ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime" // PHYSICAL REVIEW B (Rapid Communications) **86**, 060505 (2012)

[25] А. Бароне, Дж. Патерно. «Эффект Джозефсона». Москва, "Мир", 1984.

[26] В.В. Шмидт. «Введение в физику сверхпроводников», Москва, МЦНМО, 2000.

[27] M. Cirillo, I. Modena, P. Carelli, and V. Foglietti, "Millimeter wave generation by fluxon oscillations in a Josephson junction", // J. Appl. Phys. 65, 2376 (1989)

[28] A. C. Scott and W. J. Johnson, "Internal Flux Motion in Large Josephson Junctions",// Appl. Phys. Lett., Vol. 14, No. 10, pp. 316-318 (1969)

[29] A. Barone, "Flux-Flow Effect in Josephson Tunnel Junctions", // Journ. Appl. Phys.,Vol. 42, No. 7, pp.2747-2751 (1971)

[30] S.N. Erns, A. Ferrigno, R.D. Parmentier, "Josephson Junction Fluxon Oscillators of In-Line Geometry", // IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No. 3, pp. 1007-1009 (1983)

[31] N. F. Pedersen and A. Davidson, «Phase locking of long Josephson junctions», // Phys. Rev. B, Vol. **41**, No. 1, pp. 178-186 (1990)

[32] A.S. Sobolev, J. Mygind, and V.P. Koshelets, "Linewidth and Dc Properties of the Flux-Flow Oscillator with Mixed Inline-Overlap Bias", // 8th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS '07, Brussels, (2007)

[33] Leonid S. Revin, Andrey L. Pankratov, "Spectral and power properties of inline long Josephson junctions", // Phys. Rev. B, 86, 054501 (2012)

[34] F. Lombardia, U. Scotti di Uccio, Z. Ivanov, T. Claeson, M. Cirillo, "Flux flow in YBa₂Cu₃O_{7-delta} grain-boundary Josephson junctions with a four-terminal configuration", // Applied Physics Letters, Vol. 76, No. 18, pp. 2591–2593, (2000)

[35] Дмитриев П.Н., «Разработка и исследование новых типов сверхпроводниковых туннельных переходов для приемных СВЧ устройств». // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2009 г.

[36] Филлипенко Л.В., «Интегральные сверхпроводниковые приемные структуры на основе высококачественных туннельных переходов». // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2009 г.

[37] P.N. Dmitriev,I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko, A.B. Ermakov, S.V. Shitov, G.V. Prokopenko, S.A. Kovtonyuk, and V.P. Koshelets. "High Quality Nb-based Integrated Circuits for High Frequency and Digital Applications", // IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 13, No 2, pp. 107-110 (2003)

[38] B. Josephson Possible new effects in superconductive tunnelling. // Physics Letters, Vol. 1, Iss. 9, 251-253 (1962)

[39] Josephson, B. D. Supercurrents through barriers. Adv. Phys., 14(56), 419–451 (1965)

[40]Ferrell, R., & Prange, R. Self-Field Limiting of Josephson Tunneling of Superconducting Electron Pairs. // *Physical Review Letters*, *10*(11), 479–481 (1963).

[41] Kulik, I. O. Wave propagation in a Josephson tunnel junction in the presence of vortices and the electrodynamics of weak superconductivity. *Sov.Phys. JETP*, 24(6), 1307–1317 (1967).

[42] Y. Zhang. Theoretical and experimental studies of the flux-flow type Josephson oscillator //Ph.D.-thesis, Chalmers University of Technology, (1991).

[43] Pankratov, A. Form and width of the spectral line of a Josephson flux-flow oscillator. // *Physical Review B*, 65(5), 054504-1–9 (2002).

[44] Pankratov, A. Long Josephson junctions with spatially inhomogeneous driving. //Physical Review B, 66(13), 134526, (2002).

[45] Pankratov, A., Sobolev, A., Koshelets, V., & Mygind, J. Influence of surface losses and the self-pumping effect on current-voltage characteristics of a long Josephson junction. //Physical Review B, 75(18), 184516-1–5 (2007).

[46] James C. Swihart "Field Solution for a Thin-Film Superconducting Strip Transmission Line" // Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 3, pp. 461-469 (1961)

[47] Lee, G. S., Barfknecht, A. T. "Geometric and material dispersion in Josephson transmission lines". // IEEE Transactions on Appiled Superconductivity, 2(2), 67–73 (1992).

[48] Khapaev, M. M., & Kupriyanov, M. Y., New ideas for long Josephson junctions realistic devices simulation. // Journal of Physics: Conference Series, 129, 012037, (2008).

[49] Khapaev, M. M., & Kupriyanov, M. Yu. Sheet current model for inductances extraction and Josephson junctions devices simulation. // Journal of Physics: Conference Series, 248, 012041, (2010).

[50] Лихарев К.К., Ульрих Б.Т. Системы с джозефсоновскими контактами. М.: Издво Моск. ун-та. 1978. 447 с.

[51] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука. 1985. 320 с. [52] A.L. Pankratov Form and width of the spectral line of a Josephson flux-flow oscillator // Phys. Rev. B, V. 65, 054504 (2002).

[53] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, A.S. Sobolev, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind, "Radiation linewidth of flux flow oscillators" // Superconductor Science and Technology, (14), 1040-1043, (2001)

[54] M.Salerno, M.R. Samuelsen, A.V. Yulin, "Spectral linewidth of Josephson Oscillators" // Physical Review Letters, 86(23), 5397-5400, (2001).

[55] Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., K. Yoshida. Flux-flow type Josephson oscillator for mm and submm wave region. // J.Appl.Phys, 54 (6), pp. 3302-3309 (1983).

[56] Nagatsuma T., Enpuku K., Yoshida, K., & Irie, F. (1984). Flux-flow type Josephson oscillator for mm and submm wave region. II. Modeling. // J.Appl.Phys, 56 (11), 3284–3293.

[57] Nagatsuma T., Enpuku K., Sueoka K., Yoshida K., & Irie F. Flux-flow type Josephson oscillator for mm and submm wave region. III. Oscillation stability.// J.Appl.Phys, 58 (1), 441–449, (1985).

[58] Qin, J., Enpuku, K., & Yoshida, K. Flux-flow type Josephson oscillator for mm and submm wave region. IV. Thin-film coupling. // J.Appl.Phys., 63(4), 1130–1135, (1988).

[59] Koshelets V. P., Shchukin A. V., Shitov S.V., & Filippenko, L.V. Superconducting millimeter wave oscillators and SIS mixers integrated on a chip. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 3(1), 2524–2527 (1993).

[60] V. P. Koshelets, S. V. Shitov, L. V. Filippenko, A. M. Baryshev, H. Golstein, T. de Graauw, W. Luinge, H. Schaeffer, H. van de Stadt "First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz" // Appl. Phys. Lett., 68, 1273 (1996)

[61] S.V. Shitov, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets, A.M. Baryshev,W. Luinge, Jian-Rong Gao, "Superconducting Chip Receiver for Imaging Applications".// IEEETrans. on Appl. Supercond. 9, 3773–3776 (1999)

[62] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, V.L. Vaks, J. Mygind, A.M. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein, "Flux Flow Oscillators for Submm Wave Integrated Receivers" // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 9, 4133–4136 (1999)

[63] V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin, L. V. Filippenko, and J. Mygind, "Linewidth of Submillimeter Wave Flux-Flow Oscillators"//Appl. Phys. Lett., 69, (5), pp. 699–701, (1996).

[64] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, V.L. Vaks, J. Mygind, A.B. Baryshev,W. Luinge, N. Whyborn, " Phase Locking of 270-440 GHz Josephson Flux Flow Oscillator" // Rev. of Sci. Instr., v. 71, No 1, pp. 289-293, (2000).

[65] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, W. Luinge, J. Mygind, V.L. Vaks, D.G. Pavel'ev, "Superfine Resonant Structure on IVC of Long Josephson Junctions and its Influence on Flux Flow Oscillator Linewidth" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., v.11, No 1, pp. 1211-1214, (2001).

[66] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, A.S. Sobolev, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind, "Radiation linewidth of flux flow oscillators" // Superconductor Science and Technology, 14, pp. 1040-1043 (2001)

[67] A.B. Ermakov, S.V. Shitov, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets, W. Luinge, "A data acquisition system for test and control of superconducting integrated receivers" // IEEE Trans. on Appl. Supercond., v.11, No 1, pp. 840-843, (2001).

[68] H.Doedens, W.Horinga, Thermal Load of the Sub-mm Test Dewar Caused by Radiation, Thermal Conductivity and Electrical Dissipation, Технические заметки для внутреннего пользования SRON, Issue 5, 11-10-1999, с разрешения W.Horinga.

[69] Ruud Hoogeveen, "Atmospheric lines in the 500 – 700 GHz range as potential targets for the TELIS test flight". TELIS technical notes TLS-SRON-TN-2004-028, 14/01/2005.

[70] U. Mair, M. Krocka, G. Wagner, M. Birk. H.-W. Hübers, H. Richter, A. Semenov, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, T. de Graauw et al., "TELIS – development of a new balloon borne THz/submm heterodyne limb sounder"// Proceedings of 14-th International Symposium on Space Terahertz Technology, pp. 204-214 (Tucson, Arizona, April 22-24, 2003).

[71] С.В. Шитов, «Интегральные устройства на сверхпроводниковых туннельных переходах для приемников милимметровых и субмиллиметровых волн» // Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук, Москва, 2003.

[72] Polzikova, N.I.; Mansfeld, G.D.; Tokpanov, Y.S.; Koshelets, V.P.; "Resonant Subterahertz Coherent Acoustic Waves Excitation by Josephson Junction", // Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS), 2011 Joint Conference of the IEEE International, May 2011, San Fransisco, USA.

[73] Tucker J.R.. Quantum detection at millimeter wavelengths. / Tucker J.R., Feldman M.J. // Rev. Mod. Phys., v. 4, pp. 1055-1113, 1985.

[74] K.V. Kalashnikov, A.V. Khudchenko, and V. P. Koshelets, "Harmonic phase detector for phase locking of cryogenic terahertz oscillators" // Appl. Phys. Lett. 103, 102601 (2013)

[75] А.В. Худченко, К.В. Калашников, В.П. Кошелец, «Система стабилизации частоты перестраиваемого криогенного генератора» // Патент РФ №2450435, приоритет от 01.03.2011 г.

[76] A. Shoji, S. Kityu, and S. Kohjiro, Superconducting properties and normal-state resistivity of single-crystal NbN films prepared by a reactive rf-magnetron sputtering method // Appl. Phys. Lett. 60, 1624 (1992)

[77] S. Kohjiro, Z. Wang, S.V. Shitov, S. Miki, A. Kawakami, and A. Shoji, «On-Chip Detection of Radiation Power from Flux-Flow Oscillators with Epitaxial and High-Jc NbN/A1N/NbN Junctions» // Proceedings of 13th Int. Symp. on Space THz Technol., pp. 483-492, 2002

[78] Приватная информация от г.н.с. ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН М.А. Тарасова о результатах исследования вибрационного спектра криокулера Heliox производства Oxford Instruments.