

На правах рукописи

КОРЮКИН Олег Валерьевич

СОГЛАСУЮЩИЕ ЦЕПИ СМЕСИТЕЛЕЙ
НА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ

Специальность 01.04.03 – «Радиофизика»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), г. Москва

Научный руководитель: Шитов Сергей Витальевич,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: Гольцман Григорий Наумович,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики факультета физики и информационных технологий Московского педагогического государственного университета

Снигирев Олег Васильевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета Московского государственного университета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики Российской академии наук (г. Нижний Новгород)

Защита состоится «19» сентября 2014 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 при ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



А.А. Потапов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из необходимых условий для получения высокой чувствительности приемников сверхвысоких частот (СВЧ) является их охлаждение до предельно низких температур. При уменьшении температуры тепловой шум может стать меньше квантовых шумов на частоте сигнала, что создает возможность реализации практических схем приемников с шумами, близкими к их фундаментальному (квантовому) минимуму. Одними из подходящих устройств для использования в составе малощумящих криогенных приемников миллиметровых и субмиллиметровых волн являются сверхпроводниковые смесители на туннельных переходах, работающие при температуре жидкого гелия. Сверхпроводниковые гетеродинные приемники имеют важную особенность, отличающую их от полупроводниковых приемников, таких как, например, охлаждаемые смесители на диодах Шоттки. В сверхпроводящих туннельных контактах типа сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) нет сопротивления растекания, а, следовательно, можно согласовать такой элемент без СВЧ потерь, даже в случае, если есть значительная паразитная емкость. Сегодня уже реализован ряд практических гетеродинных приемников субмиллиметрового диапазона длин волн на основе входных смесителей на сверхпроводниковых туннельных переходах. Эти приемники применяются в радиоастрономии для наблюдения спектров излучения колебательных и вращательных переходов молекул межзвездного газа, что позволяет изучать эволюцию Вселенной. Гетеродинные приемники на основе ниобиевых ($\text{Nb-AIO}_x\text{-Nb}$) СИС-смесителей являются самыми эффективными на частотах от 50 ГГц до 1 ТГц в качестве радиоастрономических инструментов при изучении, например, спектрального состава излучения молекул вещества, составляющего пылевые облака и межзвездный газ. Кроме того, приборы с туннельными СИС-

переходами могут быть использованы для генерации, обнаружения и усиления слабых сигналов от постоянного тока до частот порядка 1000 ГГц. Перспективным направлением исследования на сегодня является также интегрирование СИС-переходов и приборов на их основе с другими устройствами (например, генераторами) на одном чипе, и, можно отметить, что СИС-переходы в сверхпроводниковой электронике играют такую же значительную роль, как транзисторы в электронике полупроводниковой.

Цели и задачи

Целью данной работы являлась разработка новых подходов к построению высокочувствительных смесителей миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн на СИС-переходах. Основной задачей являлся поиск оптимизированных решений, неразрывно связывающих выбор материалов и топологию интегральных настроечных элементов, обеспечивающих наименьшие потери сигнала в области субмиллиметровых волн (терагерцовых частот). Для поиска таких оптимизированных решений были поставлены следующие задачи:

- Теоретически обосновать и провести детальное численное моделирование новых схем и топологии СИС-смесителей с широкополосными согласующими цепями на СВЧ и ПЧ.
- На основе проведенных расчетов разработать практические конструкции СИС-смесителей миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с применением комбинации из сверхпроводящих и нормальных металлов.
- На основе вычислительных методик оценить результативность косвенного анализа экспериментальных данных сверхпроводниковых интегральных микросхем, содержащих СИС-смесители, с целью определения их внутренних параметров.

Научная новизна

- Впервые разработан смеситель диапазона 3 мм на СИС-переходах, позволяющий реализовать одновременно фундаментальную широкополосность на ПЧ и возможность перехода от двухполосного режима приема к режиму с подавлением зеркального канала за счет механической настройки волноводной камеры.
- Впервые предложен компактный волноводный балансный СИС-смеситель диапазона 787-950 ГГц с двумя смесительными чипами, чипом связи между сигнальным и гетеродинным волноводами, с применением нормального алюминия в настроечных цепях, позволяющий минимизировать длину волноводного тракта и снизить потери, вносимые прямоугольными одномодовыми волноводами, к фундаментальному минимуму.
- Впервые разработан и испытан квазиоптический СИС-смеситель диапазона длин волн 350 мкм с фиксированной двухполосной настройкой на основе СИС-переходов NbN-AlN-NbN и с применением нормального алюминия в настроечных цепях.
- Впервые проведен детальный электромагнитный анализ по выявлению и устранению паразитных резонансов в диапазоне ПЧ в квазиоптической смесительном блоке.

Практическая ценность работы

- Продемонстрирован широкий диапазон применимости принципа одностороннего подключения чипа СИС-смесителей; диапазон длин волн составил от 350 мкм до 3 мм. Это дает возможность улучшить выходные характеристики в части расширения полосы ПЧ и соответствует современным требованиям практических радиоастрономических исследований.

- Продемонстрирована методика применения нормальных материалов в настроечных цепях волноводных и квазиоптических СИС-смесителей диапазона длин волн 350 мкм в сочетании с односторонним подключением чипа, что дает возможность улучшить входные характеристики в части получения высокой чувствительности и широкой полосы.
- Продемонстрирована методика вычисления внутренних параметров сверхпроводниковой микросхемы с СИС-смесителем на основе измерений ее АЧХ.
- Разработан компактный волноводный балансный СИС-смеситель диапазона длин волн 350 мкм с уменьшенным потреблением мощности гетеродина и гибридной конструкцией смесительного элемента с применением нормального алюминия.
- Разработан и испытан квазиоптический СИС-смеситель диапазона длин волн 350 мкм с фиксированной двухполосной настройкой и с применением нормального алюминия.

Положения, выносимые на защиту

- Разработаны конструкции согласующих цепей с полосой не менее 20% и КСВН менее 2 для эффективной передачи СВЧ сигнала на СИС-переходы с минимальными потерями для диапазонов 86-115 ГГц – менее 0,5 дБ и менее 2 дБ в диапазоне 787-950 ГГц при одновременной передаче выходного сигнала ПЧ на выход смесителя в диапазоне 4-8 ГГц с КСВН менее 2.
- Разработаны и оптимизированы новые решения для волноводных СИС-смесителей субмиллиметрового (терагерцового) диапазона 787-950 ГГц: смеситель с односторонним подключением чипа в канале в широкой стенке волновода и балансный смеситель с двумя такими чипами друг напротив друга и чипом связи для инъекции мощности гетеродина.

- Произведен детальный электромагнитный анализ экспериментального чипа квазиоптического смесителя субмиллиметрового (терагерцового) диапазона 787-950 ГГц на основе СИС-переходов NbN-AlN-NbN с применением нормального алюминия в настроечных цепях. Детальный анализ шумовой температуры смесителя показал возможность получения шумов на уровне не выше 10 квантов.
- Выявлены факторы, влияющие на возникновение паразитных резонансов в тракте ПЧ квазиоптического смесителя. На основе детального трехмерного электромагнитного анализа показано, что эти резонансы возникают вследствие присутствия электрической емкости между чипом и смесительным блоком, даны рекомендации по их устранению и получению полосы ПЧ 4-12 ГГц.
- Продемонстрирована методика вычисления внутренних параметров СИС-смесителя сверхпроводниковой приемной микросхемы на основе измерений ее АЧХ.

Личный вклад автора

- Созданы трехмерные электромагнитные компьютерные модели смесителя диапазона 3 мм с чипом с односторонним подключением и произведен их расчет и оптимизация.
- Произведено компьютерное трехмерное электромагнитное моделирование двух новых конфигураций терагерцового волноводного смесителя: смесителя с односторонним подключением чипа и балансного смесителя с двумя чипами друг напротив друга и чипом связи с волноводом гетеродина. Создан комплект фотошаблонов для производства чипов для таких смесителей.
- Создана трехмерная модель квазиоптического смесителя на диапазон 787-950 ГГц, рассчитаны согласующие цепи, произведено сравнение результатов расчета разными компьютерными симуляторами.

7

- Создана компьютерная электромагнитная модель квазиоптической смесительной камеры и чипа в диапазоне ПЧ, включающая в себя полную конфигурацию подводящих проводников (бондинга). Выявлены причины резонансов в диапазоне ПЧ, возникающих вследствие паразитной емкости между чипом и корпусом смесительной камеры.
- Совместно с Уваровым А.В. проведены эксперименты по измерению шумовой температуры квазиоптического смесителя. Совместно с Буковским М.А. и Уваровым А.В. был проведен детальный анализ шумовой температуры.
- Произведено измерение и анализ, полученных экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) смесителей на чипах сверхпроводникового интегрального приемника, даны рекомендации по улучшению конструкции чипов и обозначены критические параметры.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена использованием широко распространенных пакетов компьютерного моделирования, проверкой компьютерных моделей экспериментальным исследованием на большом количестве образцов, а также сравнением их с теоретическими расчетами. Признанием полученных результатов научной общественностью при обсуждениях на научных семинарах, конференциях, а также положительными рецензиями статей при публикациях результатов в научных журналах.

Апробация работы

Результаты представленных в диссертации исследований докладывались на следующих международных и российских конференциях:

- International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT '03, '05, '06, '07, '08)

8

- 8th International Workshop "From Andreev Reflection to the International Space Station" (2004)
- Applied Superconductivity Conference (ASC '04)
- International Superconductive Electronics Conference (ISEC '05)
- European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS '05)
- Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia (2005, 2007)
- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, Нижний Новгород (2005)
- 4th ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications (2006)
- XI всероссийская научная школа-семинар «Волны – 2007»
- 6-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW'07)
- 2nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications" (TERA-2012).

Публикации

Результаты данной диссертационной работы опубликованы в 20 работах, в том числе в 4 статьях в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и в 16 докладах на международных и российских конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Работа содержит 187 страниц, 95 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 108 работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулированы ее цели. Изложены научная новизна работы, ее практическая ценность и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлено описание теоретических и практических основ исследования СИС-смесителей. Приведены основные свойства и работа туннельных СИС-переходов, их энергетическая структура и сравнение с другими аналогичными устройствами, такими как, охлаждаемые смесители на диодах Шоттки (ДБШ), диодах супер-Шоттки (ДСШ) и СИН-переходах (сверхпроводник–изолятор–нормальный металл).

Описаны сверхпроводниковые волноводные и квазиоптические смесители, дается их определение и основные характеристики, сделаны выводы о достоинствах и недостатках существующих типовых схем. Приведены примеры из работ, содержащих типовые схемы смесителей.

Приведен раздел об интегрировании СИС-переходов, где описаны способы подключения СИС-переходов для получения заданной широкополосности, отстройки внутренней емкости переходов, согласования переходов с антенной и трактом ПЧ. Описаны линии передачи из сверхпроводников, балансные схемы смесителей.

Приведены принципы масштабного моделирования. Перечислены преимущества такого метода. Описана достоверность использования масштабных моделей. Из уравнений Максвелла для полей в волноводе следует, что при увеличении геометрических размеров системы в N раз, все частоты должны быть уменьшены в такое же число раз $f_s = f_r/N$, где f_s представляет частоты в модельной системе, а f_r в реальной. Приведен пример масштабной модели, которая была использована для разработки волноводного смесителя, работающего на частоте 230 ГГц с масштабным коэффициентом $N = 45$. Метод масштабного моделирования может быть применен для расчета разнообразных типов антенн и передающих линий, и,

кроме того, для проверки точности других методов расчета, где используются приближенные формулы.

Далее описаны принципы компьютерного моделирования. Объяснены сложности с представлением СИС-переходов в компьютерных программах. Представлено сравнение разных типов симуляторов. Рассмотрен вопрос достоверности результатов расчетов в компьютерных симуляторах.

В разделе об интегрировании компонентов сверхпроводникового гетеродинного приемника описана интеграция источника гетеродина на чип смесителя. Для этого используются распределенные туннельные переходы, работающие в режиме джозефсоновской генерации, и на чип интегрируются элементы стабилизации частоты гетеродина – система ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты), в том числе гармонический смеситель (ГС), а также элементы тракта ПЧ, развязка по постоянному току между СИС-переходами и гетеродином.

Дано краткое представление об основных методах и этапах тестирования СИС-смесителей. Прежде всего, это измерение по постоянному току, дающее представление о качестве СИС-переходов, а также, в случае интегральных приемников, о качестве ФФО (генератор на распределенном джозефсоновском переходе, от англ. Flux Flow Oscillator) и диапазоне и мощности накачки СИС-смесителя и ГС от ФФО. Описано измерение смесителя в режиме прямого детектора с помощью Фурье-спектрометра. Это измерение позволяет определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) смесителя, не прибегая к сложным гетеродинным измерениям. Дано описание измерения шумовой температуры, где гетеродином служит либо внешний источник (например, лампа обратной волны (ЛОВ)), либо, интегрированный на чип, распределенный джозефсоновский переход. Для понимания правильности выбора элементов квазиоптического тракта, в том числе иммерсионной линзы и планарной антенны на чипе, служит измерение диаграммы направленности. Изложена методика такого измерения.

Представление о практической направленности исследований, изложенных в последующих главах, в конце главы 1 представлено краткое описание международных проектов VLBI, TELIS и ALMA.

В заключение главы сформулирована постановка задачи и цели диссертационной работы.

В главе 2 рассмотрены волноводные СИС-смесители. В первой части главы была поставлена задача разработки нового смесительного чипа 3 мм диапазона, который должен иметь сравнительно высокую частоту ПЧ (около 4.5 ГГц) с возможностью подавления зеркального канала, что требовало кардинального снижения индуктивности цепей ПЧ.

Было проведено масштабное моделирование смесительной камеры на основе волновода полного сечения с цилиндрическим бесконтактным поршнем в частотном диапазоне 3.75-5 ГГц, которое позволило определить импеданс подключения цепочки СИС-переходов в режиме подавления зеркального канала.

В процессе электромагнитного моделирования была создана модель анализируемого устройства (рис. 1), правильно отражающая реальную структуру смесителя, указаны материалы для каждого объекта, определены порты и заданы граничные условия на поверхностях. Модель включала в себя смесительную камеру с волноводным каналом, в который помещен чип, и подвижный короткозамыкающий настроечный поршень в конце волновода противоположном входу. Постановка задачи включала оптимизацию настроечного элемента, определяющего частотный диапазон и эффективность заграждения зеркального канала, а также анализ и определение условий сходимости электродинамического решения. Расчетный модуль, использующий метод конечных элементов, производил расчет электромагнитного поля для построенной модели. Для полученной модели смесителя был разработан комплект фотошаблонов, по которому будут изготовлены чипы смесителя. Измерение этих чипов должно будет

подтвердить реализуемость предложенной конструкции чипа. Разработанные чипы в дальнейшем могут применяться в смесителях, построенных по балансной схеме.

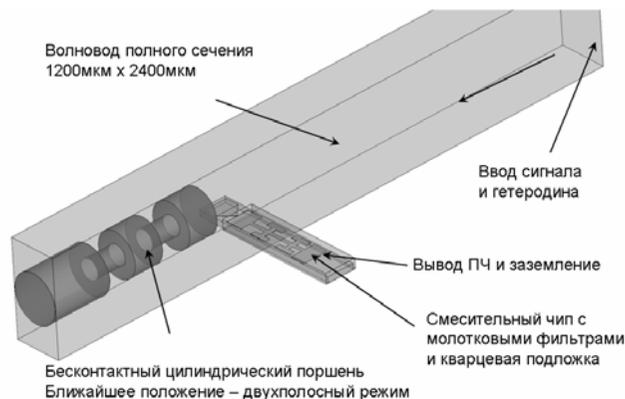


Рисунок 1. Общий вид электромагнитной модели волноводного смесителя диапазона 86-115 ГГц с подавлением зеркального канала.

Далее описывается разработка двух вариантов нового волноводного смесителя на частотный диапазон 787-950 ГГц для возможного применения в 10 диапазоне проекта ALMA. Первый вариант – с односторонним чипом, когда контакт на корпус, сигнал ПЧ и постоянное смещение заводится с одной стороны на чип, закрепленный на одной стенке волновода. Полезный сигнал и сигнал гетеродина смешиваются вне смесителя с помощью сеточного диплексера, затем поступают на рупор и далее в волновод смесительной камеры. Моделирование смесителя дало следующие результаты: прохождение сигнала -3 дБ, согласование по входу -15 дБ.

Было проведено варьирование параметров для оценки стабильности модели и определены допустимые отклонения параметров. Было обнаружено, что самым критическим параметром является площадь СИС-переходов. Положение подложки чипа в канале и в волноводе допускают ошибки позиционирования около 10 мкм в данном диапазоне частот.

На основе оптимизированной модели смесителя был сделан фотошаблон для изготовления чипов. На одной пластине находится 60 чипов, количество

напыляемых слоев равно пяти. Чипы устанавливаются в модифицированную смесительную камеру, исходная конструкция которой была разработана W.L. Shan (РМО, Китай). В новой модифицированной конфигурации смесителя изменена конструкция канала, куда помещается чип, а также вывод ПЧ и задание тока смещения. Разработка данного смесителя является предварительным этапом построения балансного смесителя.

Второй вариант смесителя – балансный смеситель (рис. 2), который состоит из двух смесительных чипов, заходящих в волновод от противоположных стенок одного поперечного сечения через соосные каналы в широкой стенке волновода. Третий чип является чипом связи между сигнальным волноводом и волноводом гетеродина, который проходит рядом с основным, волноводы разделяет лишь тонкая стенка толщиной всего лишь 70 мкм, сквозь которую проходит чип связи. В силу особой конфигурации запитывание волноводов производится с разных направлений, что оказывается весьма удобным: не требует поворотов и обеспечивает минимальную длину волноводных трактов. Развязка между волноводами составила лучше -30 дБ, прохождение мощности гетеродина на СИС-переходы -12 дБ, прохождение сигнала на СИС-переходы одного чипа -6 дБ (рис. 2), из них 3 дБ соответствуют потерям в настроечных элементах из нормального алюминия.

Было проанализировано влияние возможных неточностей в позиционировании подложек в их собственных каналах в общем пространстве волновода, а также при изготовлении переходов. На основании этого анализа был сделан вывод, что неточности позиционирования подложки около 10 мкм не ухудшают работу смесителя. Однако сравнительно малое (2%) изменение размеров переходов, то есть их различие на разных чипах в одном смесителе, приводит к заметной деградации характеристик смесителя. Это требует высокой степени воспроизводимости чипов, что возможно при использовании чипов из одной серии (с одной

пластины) или при применении электронно-лучевой литографии. Разработанный балансный смеситель, в случае его практической реализации, способен превзойти по характеристикам свой аналог – балансный смеситель с квадратурным гибридом.

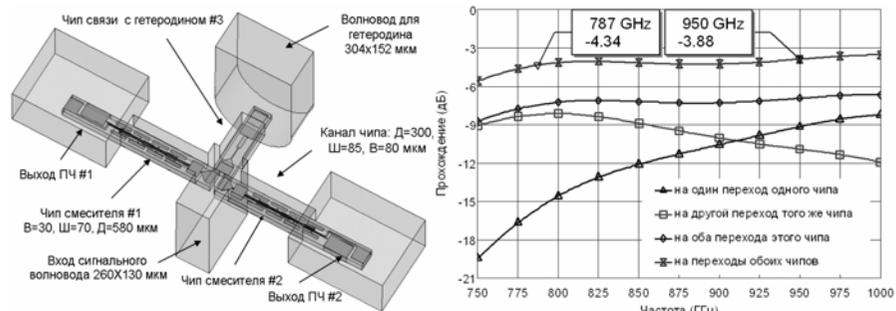


Рисунок 2. Электромагнитная модель компактного балансного смесителя (слева) и результаты моделирования в диапазоне 787-950 ГГц (справа).

В главе 3 проведено исследование квазиоптических смесителей на СИС-переходах, прежде всего, на основе туннельной структуры NbN/AlN/NbN для смесителя диапазона 787-950 ГГц. Нижний электрод был изготовлен из эпитаксиальной пленки NbN, а настроечный контур (верхний электрод) из нормального металла (алюминия) в лаборатории Advanced ICT Research Institute, NICT (г. Кобэ, Япония). Вся структура размещена на подложке из MgO. Экспериментальный смеситель был спроектирован для исследования работы двойного СИС-перехода с настроечной структурой из нормального металла (алюминия) и проверки новых материалов на частотах выше щелевой частоты ниобия (700 ГГц).

Для данного смесителя было проведено моделирование согласующих цепей в трех различных коммерчески-доступных симуляторах: MWO, HFSS, CST. Приведены графики сравнения расчета во всех трех симуляторах. Рассмотрено, какие порты и куда были подключены в структуре. Объяснен выбор размеров пространства окружающего структуру цепей смесителя.

Результаты расчета моделей из трехмерных симуляторов экспортировались в схему для подключения необходимых импедансов и правильного возбуждения токов в структуре.

Описана экспериментальная установка и методика измерения ВАХ СИС-переходов. Дано описание установки для измерения шумовой температуры смесителя и представлены результаты (пример) такого измерения (рис. 3).

Анализ измеренной шумовой температуры позволил определить шумовой вклад каждой из составных частей смесителя в полную шумовую температуру приемного устройства. Вклад элементов оптического тракта составил 600 К, шумы самого смесительного элемента (СИС-переходов) 130 К, потери в его настроечном контуре составили 3 дБ, а отражение от поверхности линзы из кремния без просветляющего покрытия дали еще 2 дБ потерь. При этом шумы тракта ПЧ оказались незначительны и составили всего лишь 5-10 К. Из этого анализа видно, что достигнутое минимальное значение шумовой температуры, скорректированное на оптические потери, составляет 400 К на 890 ГГц (менее 10 квантов) и лежит в области лучших значений для волноводных смесителей данного диапазона. Это позволило рекомендовать настроечную структуру с использованием алюминия для волноводных смесителей на частотах около 1 ТГц. Такой смеситель может послужить альтернативным вариантом для использования в проекте ALMA или в другом аналогичном проекте.

В этой главе исследована также проблема согласования чипа с широкополосным усилителем ПЧ. Для существующего смесителя была создана электромагнитная модель на ПЧ, учитывающая в том числе, проводки ультразвуковой сварки. Было проверено, что характеристики по ПЧ совпадают с расчетными характеристиками, затем электромагнитная модель была оптимизирована, и получено оптимальное число (10), расположение и длина (1,25 мм) соединительных проводков так, чтобы уменьшить потери на ПЧ (увести частоту резонанса за диапазон ПЧ). Данная конфигурация была

применена в экспериментальном смесителе, и результаты эксперимента подтвердили расчет. Даны рекомендации по устранению паразитных резонансов в таких устройствах за счет изменения длины и числа контактов проводков, соединяющих чип и корпус смесительной камеры.

Далее представлена методика анализа параметров чипа сверхпроводникового интегрального приемника на диапазон 500-650 ГГц, в том числе, его составных компонентов, их работы, взаимодействия друг с другом. Микросхема приемника является интегральной совокупностью нескольких устройств, которые могут, в принципе, быть использованы порознь: источника гетеродина, СИС-смесителя, гармонического СИС-смесителя, антенны, линий задания магнитного поля, и других развязывающих и согласующих элементов. Характеристики каждого из этих элементов (устройств), объединенных в одной микросхеме, не могут быть измерены по отдельности из-за взаимного влияния этих элементов друг на друга. Таким образом, тестирование микросхемы приемника не только трудоемко, но и требует определения (вычисления) параметров по результатам влияния элементов схемы друг на друга в соответствии с определенной моделью.

Проведено измерение с помощью ФТС-спектрометра для получения АЧХ смесителя в режиме прямого детектирования (рис. 4). На основе измеренных зависимостей АЧХ проводился комплексный анализ, и было достоверно продемонстрировано, что наиболее критическим параметром является площадь СИС-переходов, которая влияет не только на АЧХ СИС-смесителя, но также определяет уровень связи с источником гетеродина, с гармоническим смесителем, что в свою очередь влияет на потери сигнала внутри микросхемы. Даны рекомендации, согласно которым: необходимо изготавливать образцы с размерами переходов 0.95 мкм^2 ; в чипах с дипольной антенной необходимо изменить размеры антенны, для того, чтобы она была настроена на частоту 600 ГГц, например, удлинить ее; также

требуется изменить настроечную структуру связи между ФФО и СИС/ГС для уменьшения провалов между пиками, что видно как из накачки СИС, так и из ФТС. Результаты, полученные при измерениях с помощью Фурье-спектрометра (рис. 4), удовлетворительно совпали с предсказаниями численного расчета, что косвенно подтвердило правильность основных моделей и расчетных методов.

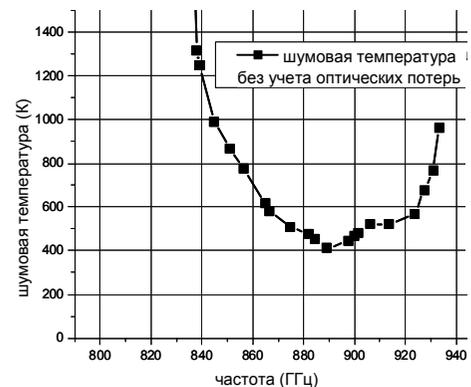


Рисунок 3. Шумовая температура экспериментального квазиоптического СИС-смесителя, скорректированная на оптические потери и шумы диплексера.

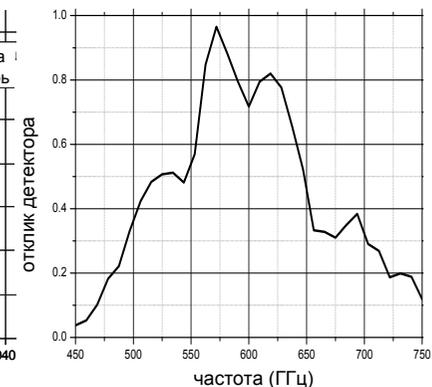


Рисунок 4. АЧХ смесителя, измеренная в режиме прямого детектирования с помощью ФТС-спектрометра.

В заключении перечислены основные результаты диссертации:

1. Разработана трехмерная модель СИС-смесителя диапазона 86-115 ГГц с подавлением зеркального канала за счет настраиваемого поршня и односторонним подключением чипа. Проведена оптимизация модели с помощью компьютерной программы электромагнитного моделирования, в результате, получены низкие потери на отражение по входу смесителя – менее -15 дБ, что удовлетворяет требованиям к смесителю для практического радиотелескопа.

2. Проведено моделирование двух конфигураций волноводных смесителей с СИС-переходами для использования в терагерцовом диапазоне с широкой полосой ПЧ 4-12 ГГц: СИС-смеситель с чипом в канале в широкой

стенке волновода с одной стороны и балансный СИС-смеситель с двумя чипами в обеих широких стенках волновода и чипом инъекции мощности гетеродина.

Для одиночного смесителя потери на отражение ожидаются менее минус 15 дБ, потери на прохождение не превышают 2 дБ. Утечка сигнала в канал гетеродина составила менее -30 дБ. Передача мощности гетеродина на чип чуть менее -6 дБ, передача сигнала на переходы около -4 дБ.

Для балансного смесителя утечка сигнала в волноводный тракт составила менее -30 дБ, прохождение мощности гетеродина на переходы -12 дБ, прохождение сигнала -6 дБ. На основании анализа возможных отклонений был сделан вывод об устойчивости конструкции к неточностям позиционирования чипов и разбросу площадей СИС-переходов с разных чипов.

3. Произведен расчет согласующих цепей квазиоптического смесителя в диапазоне 0,7-1 ТГц. В результате компьютерного трехмерного моделирования смесителя достигнуто согласование лучше -15 дБ.

Проведено экспериментальное исследование квазиоптического смесителя на сосредоточенных СИС-переходах из эпитаксиальных пленок NbN и настроенным контуром из нормального металла (алюминия) на подложке MgO в диапазоне 787-950 ГГц. Разработан стенд для измерения шумовой температуры смесителя, ее величина составила 400 К.

4. Исследована проблема согласования чипа квазиоптического СИС-смесителя с широкополосным усилителем ПЧ. Даны рекомендации по устранению паразитных резонансов в таких устройствах за счет оптимизации конструкции соединений между чипом и корпусом смесительного блока.

5. На основе большого измерения АЧХ смесителей и анализа статистически достоверных данных для коррекции геометрических параметров микросхемы дана рекомендация изготавливать образцы с эффективным размером СИС-переходов 0.95 мкм^2 .

Результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

- [A1] S.V. Shitov, V.P. Koshelets, P.A. Yagoubov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, O.V. Koryukin, An.B. Ermakov, and R.W.M. Hoogeveen, SIR Chip for TELIS // Abstract for the Fourteenth International Symposium Space Terahertz Technology, Tucson, Arizona, USA, April 22-24, 2003.
- [A2] 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.
- [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 // Report 2ET06 at the Applied Superconductivity Conference ASC'2004, USA, October 2004.
- [A4] 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 Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, pp. 960-963, 2005.
- [A5] 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 высших учебных заведений. Радиофизика, том 48, № 10-11, стр. 947-954, 2005.
- [A6] P.A. Yagoubov, J. Dercksen, R.W.M. Hoogeveen, V.P. Koshelets, O.V. Koryukin, and O.M. Pylypenko, 550-650 GHz spectrometer development for TELIS // Abstract for the 16th International Symposium on Space

- Terahertz Technology, Sweden, p. 438-443, May 2005.
- [A7] 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 // Abstract for the 16th International Symposium on Space Terahertz Technology, Sweden, p. 276-281, May 2005.
- [A8] 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 семинар по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, Нижний Новгород, март 2005.
- [A9] 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, p. 1377 – 1381, 2006.
- [A10] S.V. Shitov, Y. Uzawa, T. Noguchi, T. Matsunaga, T. Tamura, A. Endo, A. V. Uvarov, I.A. Cohn, O.V. Koryukin, Development of the ALMA band-10 QO SIS mixer // Abstracts of 6th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Purple Mountain Observatory, NAOC, CAS, Nanjing, China, Dec. 8-10, 2005.
- [A11] S.V. Shitov, Y. Uzawa, T. Noguchi, W.L. Shan, T. Matsunaga, T. Tamura, A. Endo, O.V. Koryukin, A.V. Uvarov, I.A. Cohn, Development of a SIS receiver for ALMA Band-10 // Proceedings 4th ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications, MilliLab, Espoo, Finland, p. 465, Feb. 15-17, 2006.
- [A12] S.V. Shitov, O.V. Koryukin, Y. Uzawa, T. Noguchi, A.V. Uvarov, I.A. Cohn, Development of Balanced SIS Mixers for ALMA Band-10 // Proceedings of 17th International Symposium on Space Terahertz Technology, Paris, Report P1-18, 10-12 May, 2006.
- [A13] O. Koryukin, S. Shitov, M. Bukovski, A. Uvarov, Y. Uzawa, T. Noguchi, Z. Wang and M. Krough, Balanced Waveguide Mixer for ALMA Band 10 (787-950 GHz): HFSS simulations // the 7th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka, Japan, pp. 195-204, January 17-19, 2007.
- [A14] A.V. Uvarov, S.V. Shitov, O.V. Koryukin, M.A. Bukovski, Y. Uzawa, T. Noguchi, M. Kroug, M. Takeda, Z. Wang and A.N. Vystavkin, Tolerance Analysis of THz-Range Lens-Antenna and Balanced SIS Mixers // 18th International Symposium on Space Terahertz Technology, Pasadena, California, USA, 21-23 March, 2007
- [A15] О.В. Корюкин, С.В. Шитов, М.А. Буковский, А.В. Уваров, Моделирование и анализ сверхпроводниковых волноводных смесителей на туннельных СИС-переходах диапазона 787-950 ГГц // Труды XI всероссийской научной школы-семинара «Волны – 2007», МГУ, Москва, 21-26 мая 2007.
- [A16] S. V. Shitov, O. V. Koryukin, Y. Uzawa, T. Noguchi, A. V. Uvarov, M. A. Bukovski, I. A. Cohn, Design of Balanced Mixers for ALMA Band-10 // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 347-350, 2007.
- [A17] S. V. Shitov, O. V. Koryukin, A. V. Uvarov, M. A. Bukovsky, Y. Uzawa, T. Noguchi, M. Takeda, Z. Wang, M. Krough and A. N. Vystavkin, Study On SIS Mixers For ALMA BAND-10 // 6-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Sub-Millimeter Waves (MSMW'07), Kharkov, Ukraine, p.219-221, report W-12, June 25 - 30, 2007.

- [A18] M.A. Bukovski, S.V. Shitov, A.V. Uvarov, O.V. Koryukin and Y. Uzawa
SIS Mixers for ALMA Band-10: Comparison of Epitaxial and Hybrid
Solutions // Abstract for 19th International Symposium on Space Terahertz
Technology, Groningen, The Netherlands, April 28-30, 2008.
- [A19] O.V. Koryukin, S.V. Shitov, A.N. Vystavkin, Microwave design of a
superconducting mixer with single-side chip mount for radio astronomy // 2-
nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation:
Generation, Detection and Applications", Moscow, Abstract book, p.61,
June 20 - 22, 2012.
- [A20] Корюкин О.В., Шитов С.В., Выставкин А.Н., Сверхпроводниковый
смеситель на основе чипа с односторонним подключением для
радиоастрономии // Известия высших учебных заведений.
Радиофизика, том 56, № 1, стр. 55-65, 2013.