

На правах рукописи



Парамонов Максим Евгеньевич

Оптимизация сверхпроводниковых туннельных элементов и определение их параметров

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2025

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:

Кошелец Валерий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Рязанов Валерий Владимирович доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией сверхпроводниковой наноэлектроники Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)

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

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский педагогический государственный университет

Защита диссертации состоится «3» октября 2025 г., в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), расположенном по адресу: 125009, Москва, 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/Paramonov/index.html>

Автореферат разослан « » 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.111.02

доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Кузьмин Лев Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Большой объем информации об объектах и процессах в окружающем космическом пространстве несёт в себе инфракрасная (ИК) область спектра. В эту область субмиллиметровых длин волн попадает максимум интенсивности теплового излучения относительно холодных космических объектов с температурой от 3 до 3000 К, таких как звезды на начальных стадиях звездообразования, погруженные в протозвездные газово-пылевые облака; межзвездная пыль и газ, а также планеты и малые тела Солнечной системы. Космическая пыль способна поглощать и впоследствии переизлучать энергию проходящего через нее излучения в дальнем ИК-диапазоне. Смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) являются наиболее чувствительными входными элементами для когерентных приемников на частотах от 0.1 до 1.2 ТГц, их шумовая температура ограничена только квантовым пределом. В настоящее время СИС - приемники используются в качестве штатных устройств на большинстве как наземных, так и космических радиотелескопов во всем мире. Для реализации предельных параметров СИС-приемников на субТГц и ТГц частотах необходимы туннельные переходы с очень высокой прозрачностью туннельного барьера, что напрямую зависит от используемых материалов и технологии изготовления. Существенную роль играют спектральные характеристики сверхпроводящего интегрального генератора гетеродина (расположенного на одном чипе со смесителем) – ширина линии генерации и возможность непрерывной перестройки его частоты в широком диапазоне. Создание и исследование новых типов сверхпроводящих генераторов, помимо радиотехнических приложений, позволит найти им применение в криогенной квантовой электронике, тем самым выводя последнюю на новый уровень.

Целью диссертационной работы является: оптимизация конструкции сверхпроводниковых интегральных структур, определение их электрических

параметров и развитие измерительных методик для исследования и совершенствования устройств сверхпроводниковой электроники.

Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

1. Получение количественных оценок основных параметров барьеров сверхпроводящих туннельных структур СИС различных типов; определение зависимости основных параметров барьера от плотности туннельного тока перехода.
2. Реализация непрерывной перестройки частоты в сверхпроводящем генераторе гетеродина за счет подавления Фiske - резонансов в распределенном джозефсоновском переходе.
3. Разработка, изготовление и исследование спектральных характеристик принципиально нового джозефсоновского полуфлаксонального генератора с инжекторами, основанного на создании разрыва фазы внутри перехода.

Научная новизна представленной диссертационной работы заключается в следующем:

- 1) Проведенное исследование по оценке основных параметров сверхпроводящих туннельных структур на основе ниобия позволило объяснить резкое снижение параметра качества R_j/R_n для барьеров Nb/Al-AlO_x/Nb по сравнению с Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN при плотности тока $J > 15$ кА/см².
- 2) Исследования зависимостей основных параметров барьера от плотности туннельного тока переходов Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN экспериментально подтвердили линейность (в полулогарифмическом масштабе) данных характеристик в диапазоне плотностей туннельного тока от 0.1 до 30 кА/см².
- 3) Полученная зависимость средней высоты туннельного барьера от удельного сопротивления барьера для переходов Nb/Al-AlN/Nb продемонстрировала значительное снижение высоты барьера с ростом плотности туннельного тока (увеличение параметра $R_n S$) связанная, по – видимому, с эффектом диффузии азота из барьерного слоя в ниобиевый электрод.

4) Впервые исследованы спектральные характеристики сверхпроводящего генератора, основанного на разрыве джозефсоновской фазы и перевороте полуфлаксона, который образуется на месте разрыва фазы.

Теоретическая и практическая значимость работы

1) Полученные зависимости основных параметров барьеров Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN от плотности туннельного тока перехода позволяют проектировать и изготавливать высококачественные смесительные элементы для когерентных приемников на частотах от 0.1 до 1.2 ТГц.

2) Конструктивное усовершенствование криогенного генератора гетеродина позволило реализовать непрерывную перестройку частоты в диапазоне 250 – 450 ГГц, который является резонансным для традиционных РДП-генераторов на основе структуры Nb/Al-AlO_x/Nb. Разработанное решение обеспечивает узкую ширину линии генерации для реализации режима фазовой стабилизации, что критически важно для интеграции генератора в состав спектрометрического оборудования высокого разрешения, где стабильность и точность частоты выступают ключевыми требованиями.

3) Разработанный и созданный сверхпроводящий полуфлаксонный генератор с инжекторами позволяет получать стабильное узкополосное излучение в диапазоне 100 - 300 ГГц, частота этого излучения может быть стабилизирована с помощью системы фазовой автоподстройки. Данный генератор может быть использован в качестве стабильного опорного источника микроволнового излучения для сверхпроводящих квантовых схем взаимодействия с кубитами.

Методология и методы исследования

Для изготовления экспериментальных образцов с туннельными структурами и СВЧ - интегральных схем использовались методы тонкопленочных технологий, включающих в себя: магнетронное распыление, контактную фотолитографию, прямую электронную литографию, ионное и плазмохимическое травление, анодирование. Экспериментальные измерения

производились при температуре жидкого гелия в транспортном сосуде Дьюара, а также в заливном криостате с помощью специально разработанного сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН научного экспериментального комплекса. Расчет геометрии сверхпроводящих элементов, СВЧ - согласующих структур и проектирование фотошаблонов для контактной фотолитографии осуществлялся средствами специализированного программного обеспечения для ПК. Для определения основных параметров туннельных СИС – переходов использовались методы численного моделирования и расчеты в соответствии с теориями Симмонса и Роуэла из ВАХ на больших напряжениях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Экспериментально полученные линейные зависимости (в полулогарифмическом масштабе) величин средней высоты $\bar{\phi}$ и толщины d от плотности туннельного тока для переходов Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN позволяют оценить удельные емкости этих переходов во всем исследованном диапазоне и экстраполировать результаты в область более высоких плотностей тока, где прямые измерения параметров барьеров невозможны.
2. Снижение средней высоты туннельного барьера в переходах Nb/Al-AlN/Nb, по сравнению с оксидными Nb/Al-AlO_x/Nb, позволяет реализовывать туннельные структуры с плотностью тока выше 15 кА/см² при технологически достижимой толщине изоляционного слоя порядка 1 нм и дает возможность реализовывать параметр качества R_j/R_n не ниже 25.
3. Включение поглощающих слоев в конструкцию криогенного генератора гетеродина субТГц диапазона на основе распределенного туннельного перехода (РТП) для интегральных приемных систем позволяет увеличить параметр затухания электромагнитной волны внутри перехода α , вследствие чего на ВАХ в «резонансном режиме» работы генератора происходит подавление ступеней Фiske, подобно области вязкого течения вихрей. Это дает возможность производить непрерывную

перестройку генератора в широком диапазоне частот.

4. Полуфлаксонный генератор, впервые исследованный в данной работе, имеет полную совместимость с наиболее востребованными низкотемпературными сверхпроводящими схемами для радиотехнических приложений и квантовых вычислений (кубиты) благодаря малым размерам, низкому энерговыделению и отсутствию потребности во внешнем магнитном поле. Его мощность составила 10 нВт, ширина линии излучения 1 МГц.

Степень достоверности результатов и апробация работы

Полученные в результате экспериментов характеристики хорошо согласуются с расчетными теоретическими моделями. Методика прямого измерения СВЧ - излучения была апробирована на аналогичных структурах в составе реальных приемных устройств. Достоверность подтверждается соответствием результатам исследований подобных экспериментальных структур другими ведущими научными группами, работающим в области сверхпроводящей электроники.

Личный вклад автора

Работы были выполнены М.Е. Парамоновым в соавторстве с сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Парамоновым оптимизирована методика измерений вольт-амперных характеристик переходов с туннельными барьерами: Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN в широком диапазоне напряжений, вплоть до предельных 1.5 В, при температуре жидкого гелия. Проведен цикл измерений туннельных переходов в диапазоне плотностей тока от 0.1 до 30 кА/см², выполнена обработка полученных зависимостей и оценка основных параметров туннельных барьеров, выполнено их сравнение и анализ. М.Е. Парамонов принимал участие в экспериментах по изучению спектральных характеристик различных модификаций РДП – генератора. Автором самостоятельно были изготовлены сверхпроводящие

СВЧ – микросхемы для изучения свойств полуфлаксонного генератора методами тонкопленочных технологий. Все технологические процессы производились на оборудовании, входящим в УНУ «Криоинтеграл» (ИРЭ им. В.А. Котельникова), работоспособность и своевременный ремонт которого также обеспечивались Максимом Парамоновым. Для изготовления высококачественных туннельных переходов на основе ниобия, М.Е. Парамоновым была разработана и собрана технологическая установка жидкостного анодного окисления тонких пленок. М.Е. Парамонов принимал участие в первых измерениях спектров излучения нового полуфлаксонного генератора и обеспечивал техническую модернизацию измерительного оборудования для проведения исследований. В том числе им была спроектирована и реализована криогенная головка для измерений по постоянному току двухсторонних кремниевых чипов размером 3 x 4 мм с 16 - пиновой контактной группой с каждой из сторон чипа. Автор также принимал участие в обработке всех экспериментальных результатов и подготовке всех научных публикаций.

Публикации

Основные результаты проведенных исследований представлены в 17 работах по профилю диссертации: 4 статьи – в российских рецензируемых периодических изданиях (журналах) из перечня ВАК РФ (по состоянию на 18.03.2025), 5 статей опубликованы в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, 7 тезисов докладов – на международных и российских конференциях, 1 патент РФ на изобретение. Список работ приведен в конце автореферата.

Структуры и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объём исследования составляет 129 страниц, и содержит 96 рисунков. Список литературы содержит 85 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и определены ее цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 обосновывается важность изучения субТГц области спектра (в частности, коротковолнового ТГц - излучения). Представлены современные методики и аппаратные решения для научного исследования данной области длин волн. Описывается методика когерентного приема ТГц – излучения и его детектирования при помощи гетеродинного преобразователя частоты. Показано, что классические резистивные смесители с присущим им дробовым и тепловым шумом, имеют ограничения из-за малой нелинейности на ВАХ используемых полупроводниковых туннельных переходов. В настоящее время, смесители на основе туннельных переходов сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) являются наиболее чувствительными входными элементами для когерентных приемников на частотах от 0.1 до 1.2 ТГц.

В данной главе вводятся основные определения и термины, связанные с особенностями работы сверхпроводящих приборов, основанных на эффекте Джозефсона. Описывается процесс преобразования частоты на СИС - смесителе. Описаны сложности, связанные с согласованием СИС - смесителя со сверхпроводящей СВЧ – схемой, вследствие наличия заметной емкости туннельного перехода. Дан обзор существующих ТГц - генераторов, используемых в гетеродинной радиотехнике высокого разрешения. Выбор генератора, основанного на распределенном джозефсоновском переходе (РДП), в качестве гетеродина в схеме преобразователя частоты связан с его полной технологической совместимостью со сверхпроводящим смесителем и простотой изготовления. Отмечены сложности, связанные с невозможностью непрерывной перестройкой частоты при фиксированном токе смещения для традиционной конструкции РДП – генератора в резонансной области его ВАХ. Также дано краткое описание

нового класса сверхпроводящих РДП – генераторов, для работы которых не требуется внешнее магнитное поле, способные работать в качестве “on-chip” СВЧ – генераторов в квантовых схемах.

Глава 2 посвящена методике изготовления сверхпроводящих СВЧ – схем, основанных на туннельных СИС – переходах, и методам их экспериментального исследования. Описан весь технологический цикл изготовления, основанный на методах тонкопленочных технологий. Изготовление СВЧ – схемы на кремниевой подложке начинается с проектирования и изготовления фотошаблона для контактной литографии. Далее, следуя технологическому маршруту, разработанному сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН на основе технологии селективного травления ниобия и анодирования – SNEAP (**S**elective **N**iobium **E**tching and **A**nodization **P**rocess) последовательно производились операции послойного формирования топологии рабочей схемы. Используемые методики включали в себя: контактную фотолитографию, методы магнетронного распыления по постоянному току и ВЧ, реактивное ионное травление и жидкостное анодирование. Для совершенствования технологического процесса и внедрения технологии SNAP (процесс селективного анодирования ниобия, на англ. **S**elective **N**iobium **A**nodization **P**rocess) автором работы была разработана и собрана технологическая установка контролируемого жидкостного анодного окисления тонких пленок; проведена серия экспериментов.

В данной главе также описан уникальный комплекс измерительного оборудования, разработанный сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, позволяющий проводить прецизионные измерения по СВЧ и постоянному току. Описаны методы измерения основных характеристик туннельных сверхпроводящих структур. Автором работы была спроектирована и реализована криогенная головка для измерений по постоянному току двухсторонних кремниевых чипов размером 3 x 4.2 мм с 16 – пиновой контактной группой с каждой из сторон чипа.

Дан обзор оборудования для проведения низкотемпературных

спектральных измерений. Проводится описание гелиевого заливного криостата – его внутреннее электронное оснащение и навесное оборудование, включающее в себя систему частотной стабилизации и систему ФАПЧ.

Глава 3 посвящена оценке основных параметров туннельного барьера джозефсоновских переходов Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN в широком диапазоне значений плотностей тока (рисунок 1). Представлен метод оценки параметров туннельных барьеров (средней высоты $\bar{\phi}$ и толщины d), основанный на анализе ВАХ переходов.

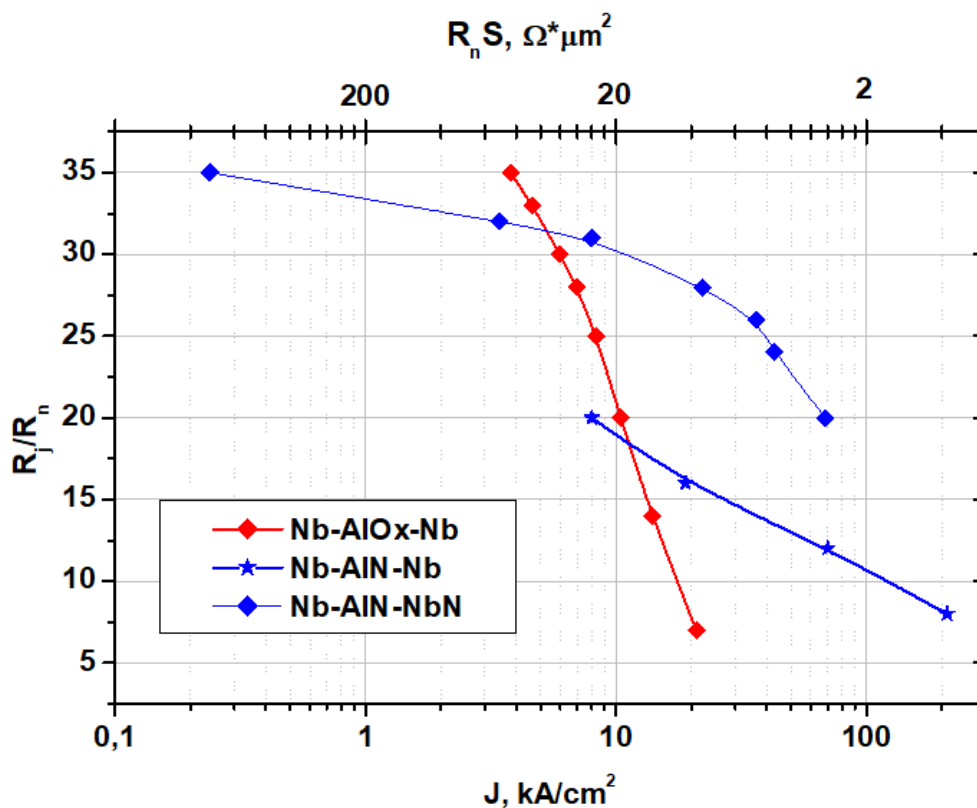
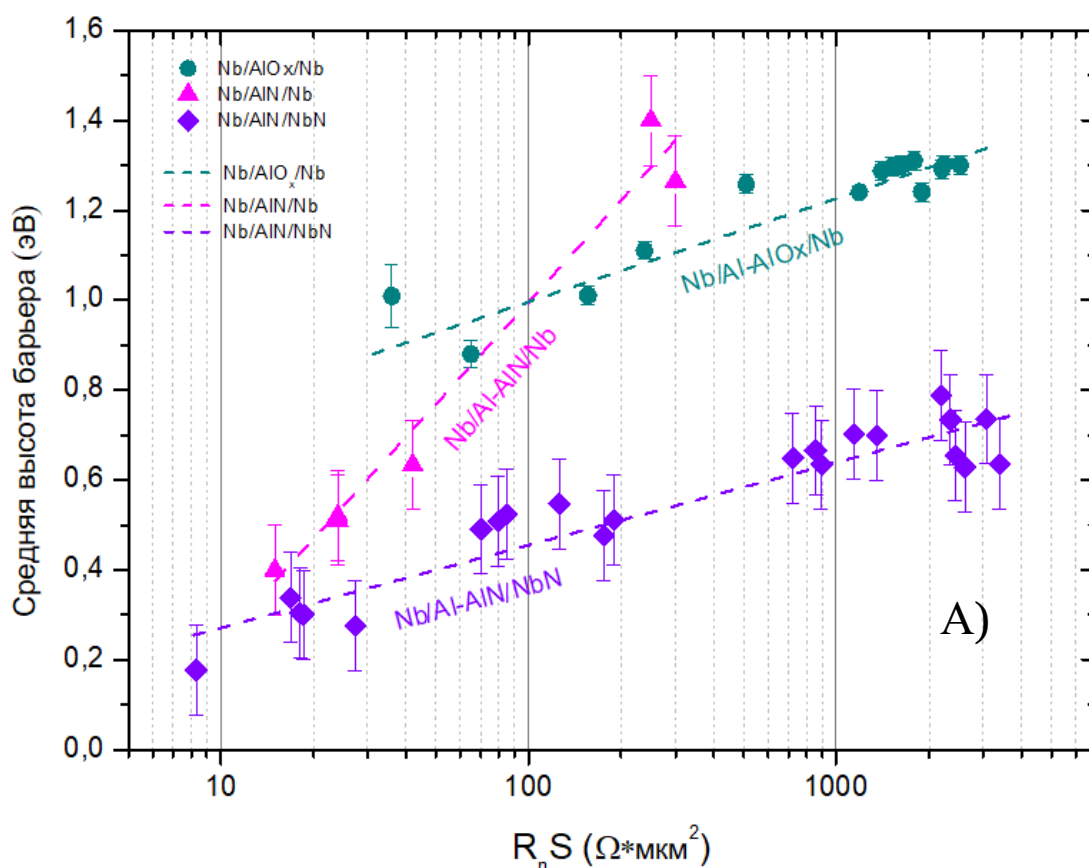


Рисунок 1. Зависимости отношения параметра качества R_i/R_n от значения плотности туннельного тока СИС – перехода J . Значение J для данных переходов рассчитано из ВАХ (величина щелевого напряжения V_g и нормального сопротивления R_n). Взято из работы: М.Ю. Torgashin, et al./IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2007. №17. – С. 379.

Метод включает следующие этапы: экспериментальные измерения ВАХ в широком диапазоне напряжений, анализ зависимости дифференциальной проводимости перехода от напряжения, полученный при дифференцировании экспериментальных данных, аппроксимация полученных данных при помощи модели Симмонса и оценка параметров барьера итерационными методами. Метод позволяет прогнозировать параметры барьеров для проектирования СВЧ-устройств с высокой плотностью тока. К преимуществам данной методики можно отнести ее универсальность (так как она применима для разных типов туннельных барьеров), высокую точность и возможность адаптации для задач анализа материалов и оптимизации технологических процессов. Метод успешно применён для анализа структур, используемых в сверхпроводниковых смесителях и генераторах ТГц-диапазона.

Экспериментально определены зависимости средней высоты $\bar{\phi}$ (см. рисунок 2 А) и ширины d (см. рисунок 2 Б) туннельного барьера от параметра прозрачности туннельного барьера для каждого типа переходов.



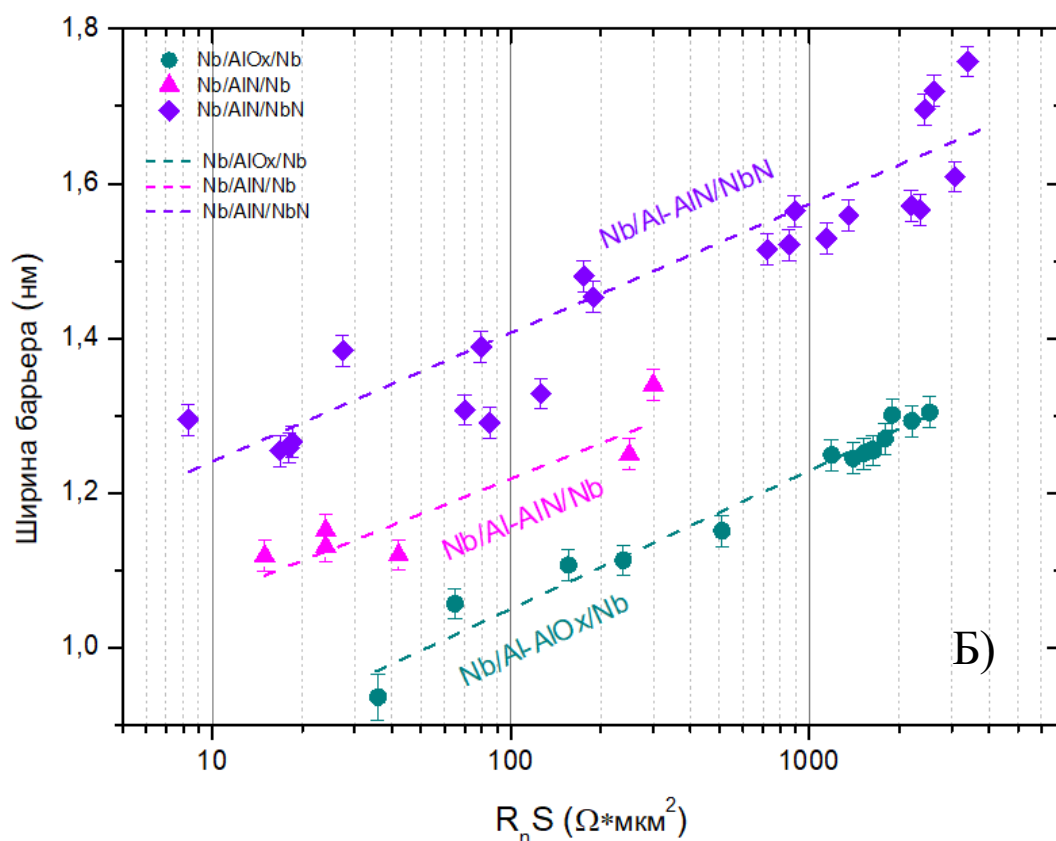


Рисунок 2. А) Зависимости средней высоты туннельного барьера от значения $R_n S$, кружки - туннельные переходы Nb/Al-AlO_x/Nb, треугольники - туннельные переходы Nb/AlN/Nb, ромбики - туннельные переходы Nb/AlN/NbN. Б) Зависимости ширины туннельного барьера от значения $R_n S$, кружки - туннельные переходы Nb/Al-AlO_x/Nb, треугольники - туннельные переходы Nb/AlN/Nb, ромбики - туннельные переходы Nb/AlN/NbN. Штриховые линии соответствующих цветов - линейные аппроксимации зависимостей

Снижение средней высоты туннельного барьера перехода с прослойкой из AlN на 0.5 эВ, по сравнению с барьером из AlO_x, позволяет получать переходы с плотностью тока выше 15 кА/см² при технологически достижимой толщине изоляционного слоя порядка 1 нм, что дает возможность реализовывать параметр качества R_j/R_n не ниже 25. Показано, что в исследованном диапазоне $R_n S$ от 10 до 2100 $\Omega \cdot \text{мкм}^2$ (уменьшении плотности туннельного тока перехода J от 20 до 0.1 кА/см²) средняя высота и толщина туннельного барьера для переходов на основе Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb и

Nb/Al-AlN/NbN линейно (в полулогарифмическом масштабе) снижаются. Экспериментально наблюдаемая линейная зависимость параметров туннельного барьера от $R_n S$ позволила оценить емкость переходов на основе структуры Nb/Al-AlN/NbN в области значений $R_n S < 10 \Omega \cdot \mu\text{м}^2$, требуемых для создания малошумящих приемников и генераторов ТГц диапазона.

Глава 4 описывает предложенный и реализованный метод подавления резонансов в субТГц сверхпроводящем генераторе гетеродина на основе РДП (семейство ВАХ которого представлено на рисунке 3).

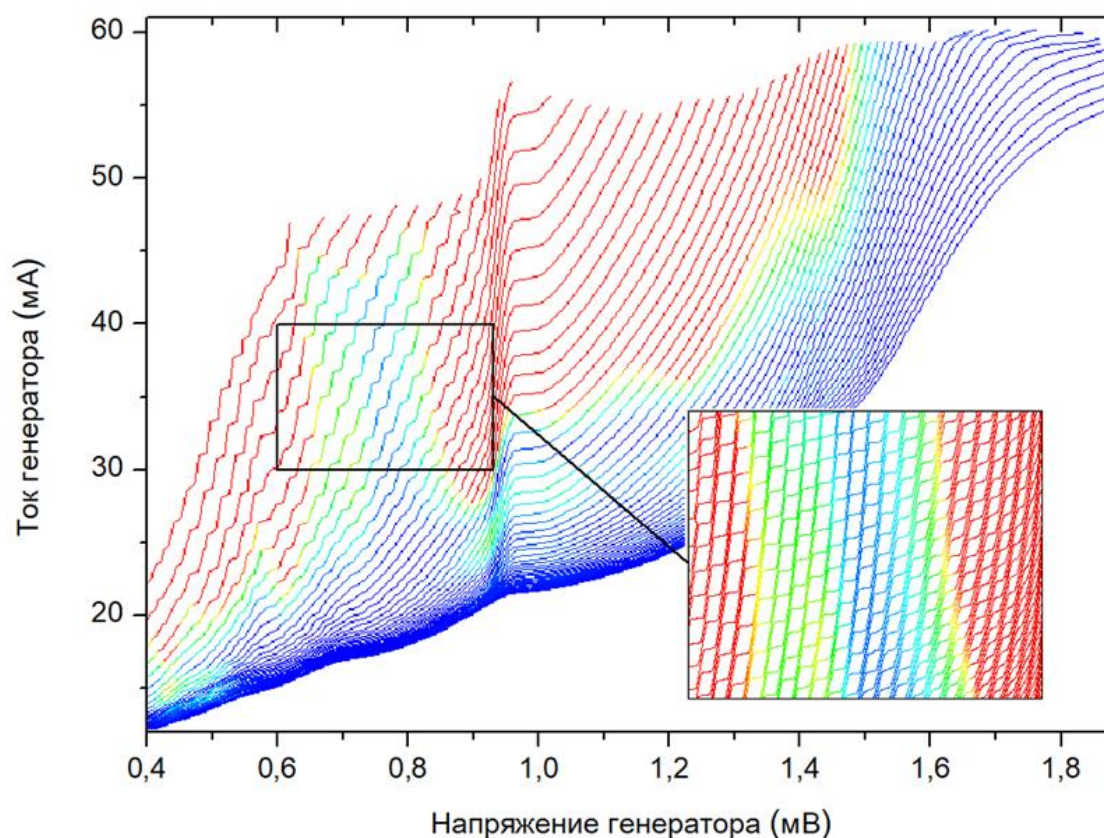


Рисунок 3. Семейство ВАХ генератора на основе структуры Nb/Al-AlOx/Nb измеренное при различных значениях магнитного поля. На увеличенной области показана структура резонансных Фиске ступеней измеренная с меньшим шагом по току I_{bias} и току I_{CL} .

Метод был основан на введении поглощающих слоев из нормального металла в области перекрытия электродов и на концах РДП. Были изготовлены и испытаны несколько модификаций конструкции РДП (см. рисунок 4). На примере конструкции с расположением поглощающих слоев на неизлучающем конце генератора продемонстрировано полное подавление резонансов при напряжениях $V < V_g/3$.

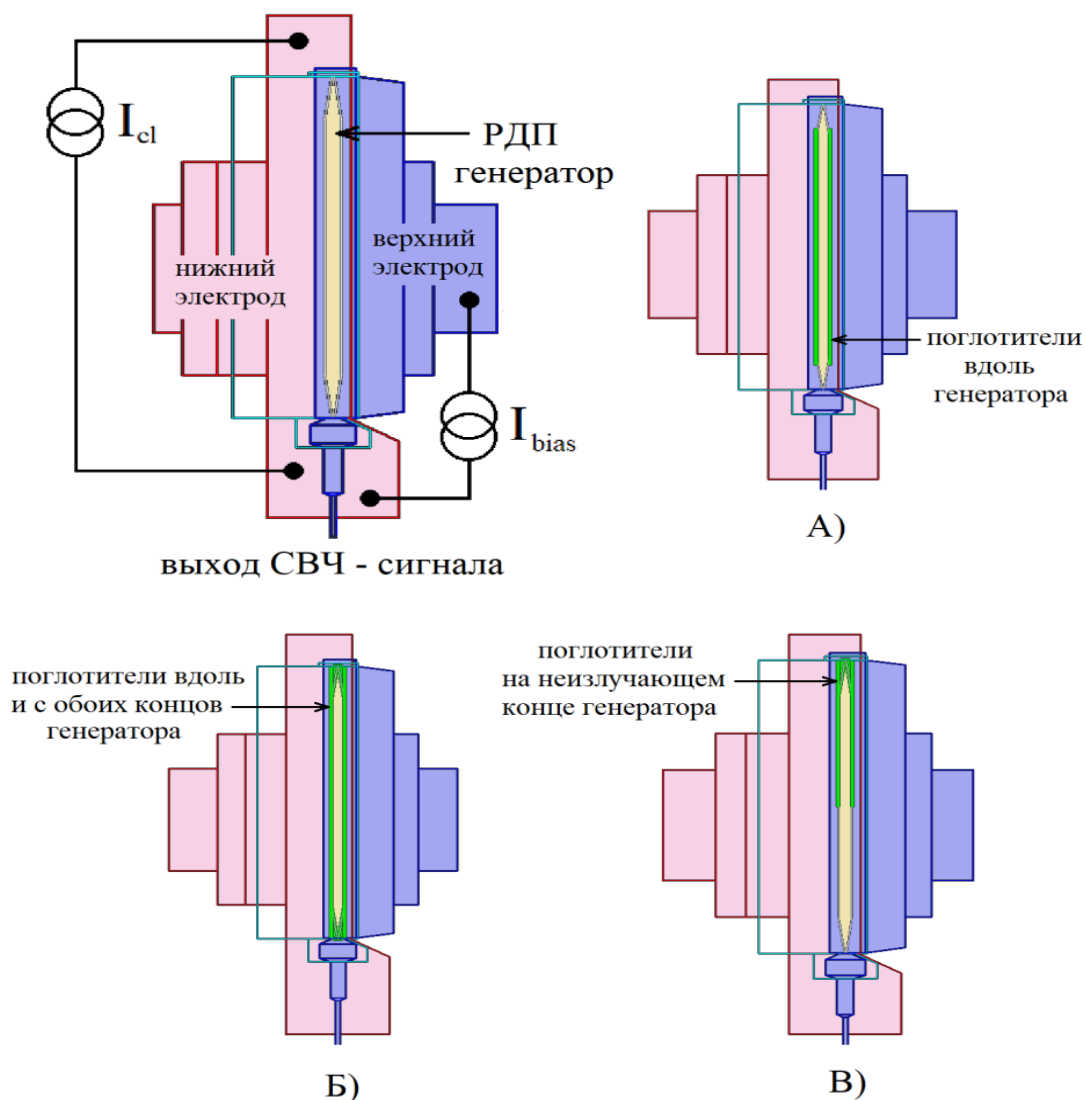


Рисунок 4. Структурные схемы сверхпроводящих РДП – генераторов с различным расположением поглощающих слоев. В левом верхнем углу показана стандартная схема РДП – генератора со схемой подключения управляющих токов. Модификации РДП – генератора с расположением поглощающих слоев: А) вдоль генератора; Б) по всему периметру генератора; В) со стороны неизлучающего конца.

Прямое сравнение зависимостей дифференциального сопротивления $R_d(V)$ для двух конструкций генераторов (с поглощающими слоями и без них) показано на рисунке 5. Хорошо видно, что график $R_d(V)$ для РДП с поглотителями стал более гладким без резких скачков. В результате появилась возможность непрерывной перестройки частоты сверхпроводящего генератора гетеродина в диапазоне частот 200 – 700 ГГц при произвольном токе смещения.

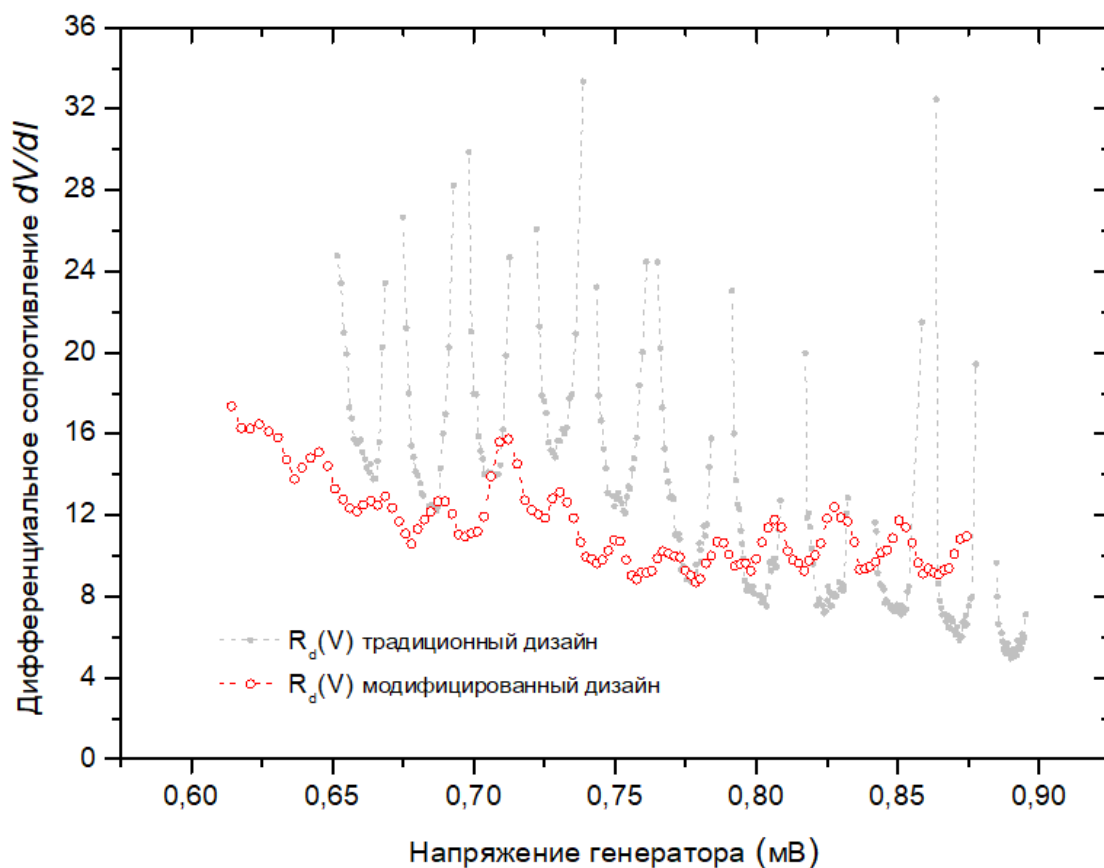


Рисунок 5. Графики зависимостей дифференциального сопротивления для традиционного РДП – генератора (серый цвет) и генератора с поглотителями.

Далее продемонстрирован спектр излучения такого генератора и измерена ширина линии: она составила 4 – 12 МГц, что позволило реализовать фазовую синхронизацию РДП – генератора (рисунок 6) во всем диапазоне частот перестройки (см. например рисунок 7 и рисунок 8). Новая конструкция РДП - генератора позволяет эффективно подавлять резонансные особенности без существенного влияния на выходную мощность.

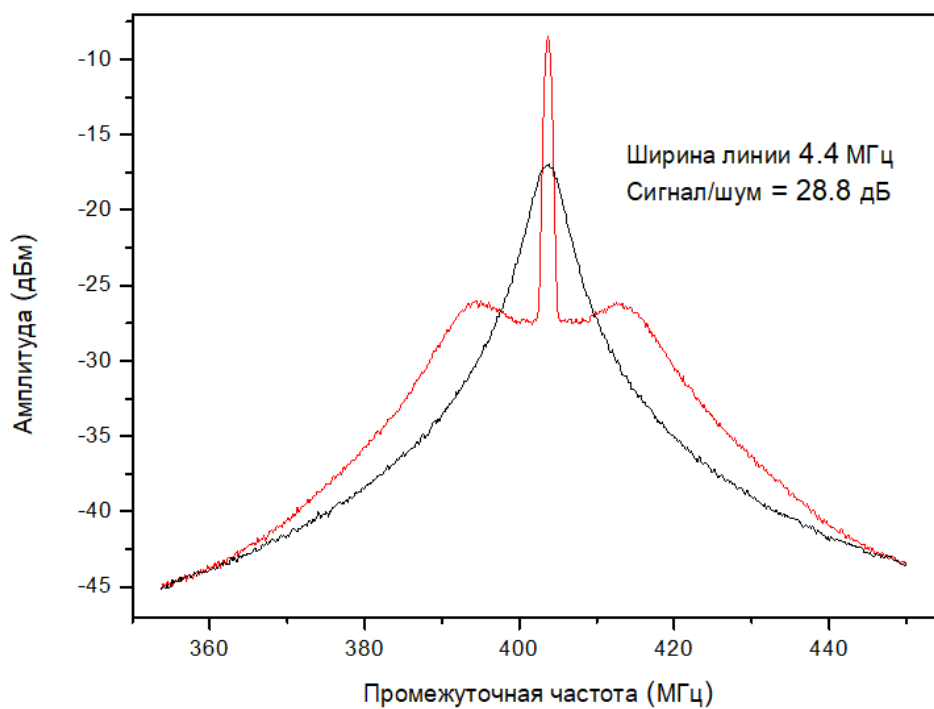


Рисунок 6. Спектр излучения РДП – генератора с поглотителями на ПЧ в одной из рабочих точек (черная кривая). Частота генератора составляла 363 ГГц. Спектр в режиме ФАПЧ (красная кривая)

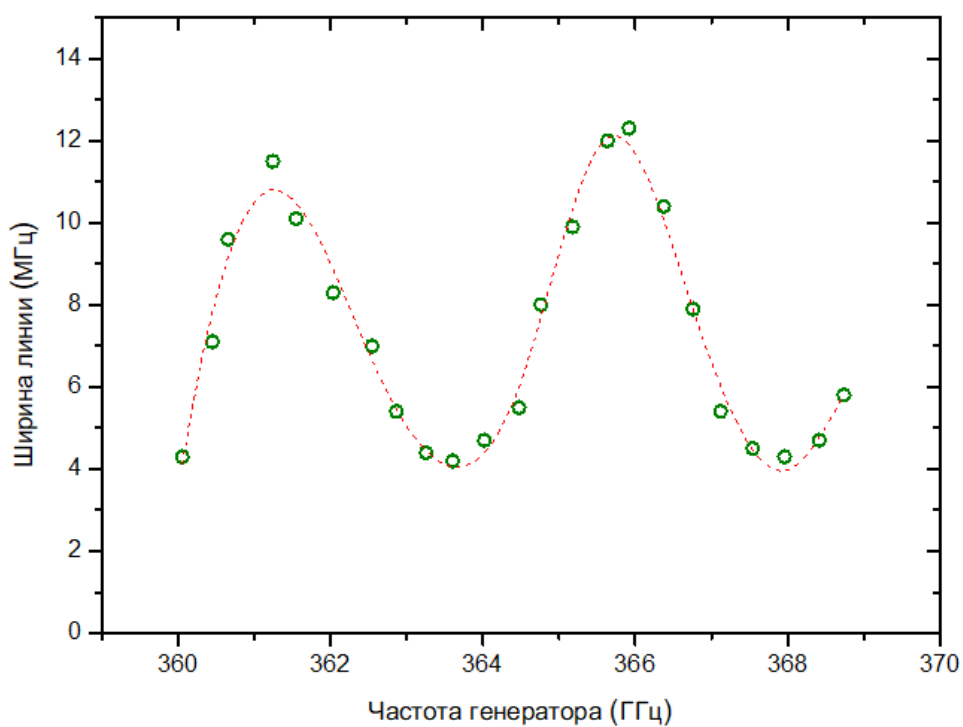


Рисунок 7. Зависимость ширины линии излучения РДП – генератора с поглотителями от частоты перестройки в диапазоне частот 360 - 369 ГГц.

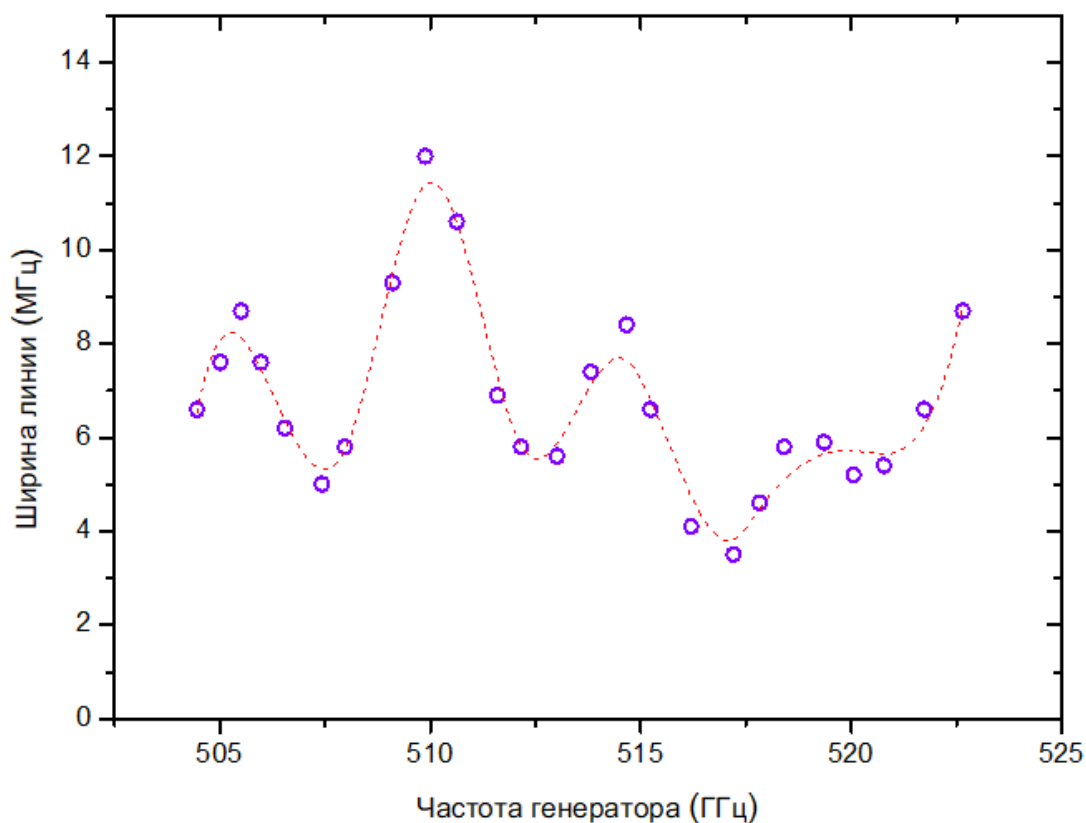


Рисунок 8. *Зависимость ширины линии излучения РДП – генератора с поглотителями от частоты перестройки в диапазоне частот 504 - 522 ГГц.*

Глава 5 посвящена разработке сверхпроводящей интегральной микросхемы с генератором гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода с двумя линиями токовых инжекторов (см. рисунок 9), предназначенной для исследования спектральных характеристик полуфлаксонального сверхпроводникового генератора субтерагерцового диапазона.

Принцип работы генератора основан на перевороте полуфлаксона, который спонтанно появляется на месте π – разрыва джозефсоновской фазы. Этот разрыв создается внутри РДП при пропускании через инжекторы постоянного тока. Конструктивно инжекторы расположены в верхнем слое РДП изготовленного по геометрии “overlap”. Генератор соединен с детектирующим джозефсоновским туннельным переходом СИС, находящимся на том же чипе, через микрополосковую линию и согласующую структуру.

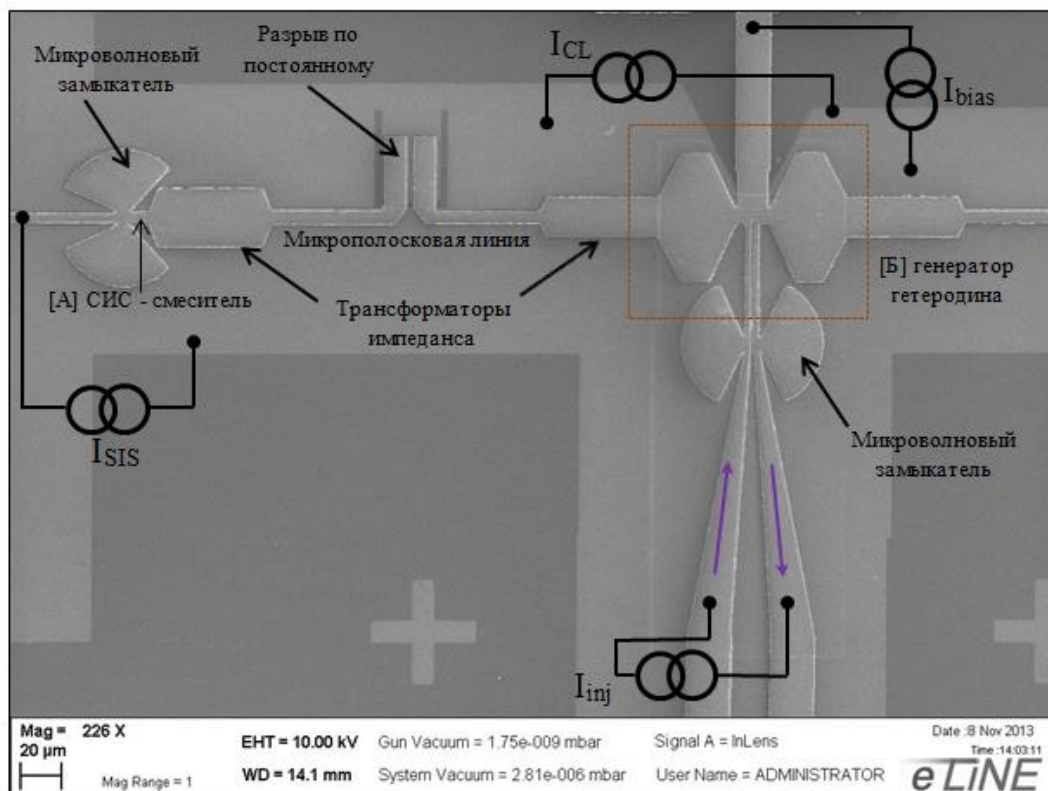


Рисунок 9. Фотография СВЧ – микросхемы для экспериментов с полуфлаксоным генератором (получена с использованием сканирующего электронного микроскопа).

Оценка мощности излучения, принятой детектором, составила примерно 8 нВт, что сравнимо с потребляемой мощностью генератора 100 нВт. Измерения ширины линии излучения генератора производилось в специальном заливном криостате, предназначенном для СВЧ измерений. На детектор подавался сигнал от опорного лабораторного СВЧ – генератора на частоте $\sim 10 - 12$ ГГц. Нужная гармоника опорного синтезатора и сигнал на основной частоте генератора смешивались на СИС - переходе. Полученный сигнал на разностной (промежуточной) частоте ~ 400 МГц усиливался и выводился на экран спектроанализатора (см. рисунок 10). Измеренная ширина линии излучения составляла 1 - 10 МГц, что характерно для геометрических (Фиске) резонансов. Были проведены успешные эксперименты по фазовой стабилизации линии излучения (рисунок 11).

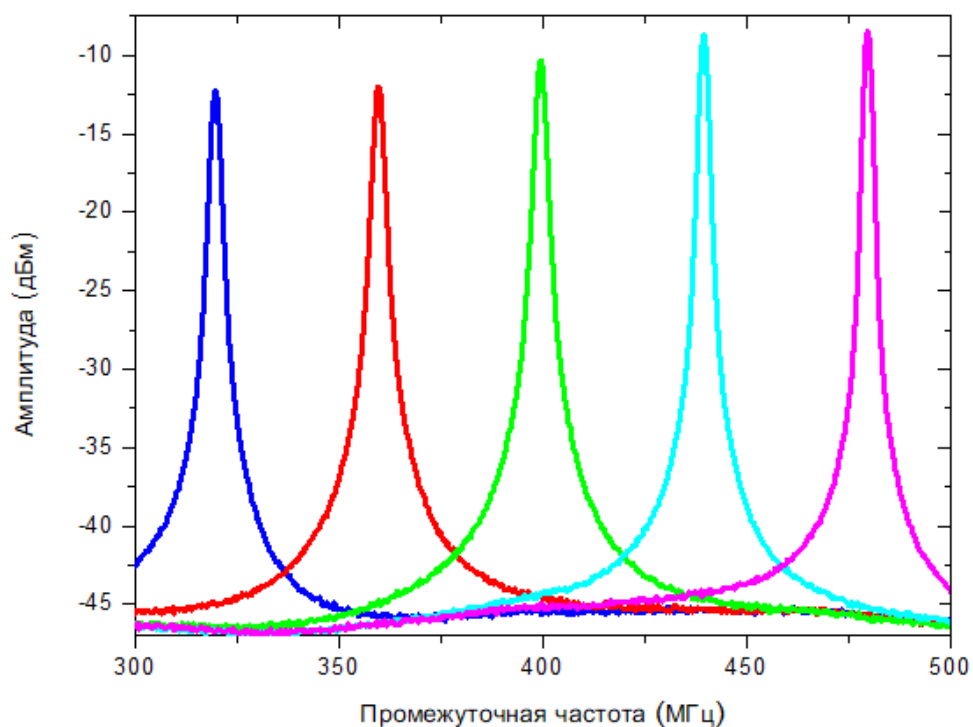


Рисунок 10. Спектры излучения полуфлаксона генератора при разных токах смещения, генератора $I_{bias} = 338 - 345$ мкА.

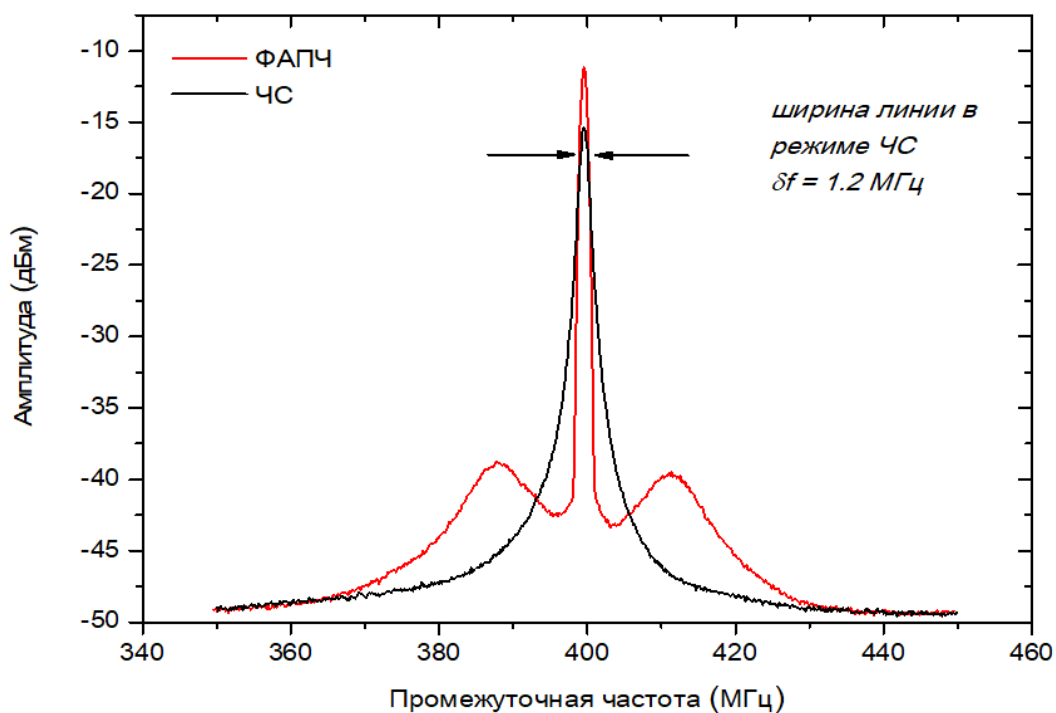


Рисунок 11. Преобразованные вниз по частоте спектры излучения РДП – генератора с инжекторами на частоте 209.5 ГГц

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Впервые были проведены количественные оценки параметров барьеров (средней высоты и ширины) для трех основных типов сверхпроводящих туннельных структур используемых в схемах когерентных приемников ТГц - диапазона: $\text{Nb/Al-AlO}_x/\text{Nb}$, Nb/Al-AlN/Nb и Nb/Al-AlN/NbN , изготовленных на одном технологическом оборудовании, входящим в УНУ «Криоинтеграл» (ИРЭ им. В.А. Котельникова). Определены зависимости основных параметров барьера от величины $R_n S$ для данных переходов в диапазоне плотностей тока от 0.1 до 30 kA/cm^2 . Показано, что низкие значения высоты нитридных барьеров AlN при высокой плотности тока (по сравнению с барьерами из AlO_x), позволяет реализовывать структуры с более толстыми барьерными слоями требуемой плотности тока; это, в свою очередь, открывает возможность изготовления переходов с высокой плотностью тока (больше 15 kA/cm^2) и малой утечкой при напряжениях ниже щелевого. Найденная в работе зависимость параметров туннельного барьера от величины $R_n S$ позволила производить оценку емкости СИС – переходов на этапе их изготовления, требуемых для создания малошумящих приемников субмиллиметрового диапазона.
2. Разработан перестраиваемый по частоте криогенный генератор гетеродина субтерагерцового диапазона на основе распределенного туннельного перехода (РДП) для интегральных приемных систем. Плавная перестройка частоты генератора обеспечивается введением в его конструкцию поглощающих элементов, позволяющих увеличить параметр затухания электромагнитной волны α в РДП, что обеспечивает подавление ступеней Фiske в резонансном режиме работы. Ширина линии генерации при перестройке частоты изменялась в пределах 4 - 12 МГц, что позволило реализовать режим фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).
3. Впервые был разработан и изготовлен сверхпроводящий

высокочастотный генератор, основанный на перевороте полуфлаксона в длинном джозефсоновском переходе; и измерены его основные характеристики по постоянному току и СВЧ. Мощность излучения на детекторе находящемся на том же чипе составила 8 нВт и сравнима с потребляемой мощностью генератора 100 нВт. Ширина линии излучения генератора составила 1 МГц, реализован режим ФАПЧ.

**Публикации в журналах, вошедших в Перечень изданий,
рекомендованных ВАК (по состоянию на 18.03.2025):**

1. **Парамонов М.Е.**, Кошелец В.П., Голдобин Э.Б. Мощность излучения и ширина линии джозефсоновского полуфлаксона генератора //Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13. – №. 2. – С. 41-43
2. **Парамонов М.Е.**, Голдобин Э.Б., Кошелец В.П. Измерение ширины линии джозефсоновского генератора с инжекторами //Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №. 7. – С. 4-4
3. **Парамонов М.Е.**, Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Фоминский М.Ю., Ермаков А.Б., Кошелец В.П. Параметры туннельного барьера сверхпроводниковых структур на основе ниобия //Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – №. 9. – С. 1370-1374
4. Чекушкин А.М., **Парамонов М.Е.**, Кошелец В.П. Подстройка параметров туннельного барьера СИС-перехода путем варьирования состава верхнего электрода // Физика твердого тела - 2024. - Т.66. - №7. - С. 1042-1046

**Публикации в зарубежных рецензируемых журналах, входящих
в Международные реферативные базы данных и системы
цитирования WOS и Scopus:**

5. **Paramonov M.**, Fominsky M.Yu., Koshelets V.P., Neumeier B., Koelle D., Kleiner R., and Goldobin E. Radiation power and linewidth of a semifluxon-based Josephson oscillator //Applied Physics Letters. – 2014. – Т. 104. – №. 6
6. Rudakov K. I., Khudchenko A.V., Filippenko L.V., **Paramonov M.E.**, Hesper R., Lima D.A., Baryshev A.M., Koshelets V.P. THz range low-noise SIS receivers for space and ground-based radio astronomy //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 21. – С. 10087
7. **Paramonov M.E.**, Filippenko L.V., Khan F.V., Kiselev O.S., Koshelets V.P.

Superconducting Sub-Terahertz Oscillator with Continuous Frequency Tuning
//Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 17. – С. 8904

8. K.I. Rudakov, **M.E. Paramonov**, P.N. Dmitriev, A.M. Baryshev, A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets. Analysis of High-Frequency Parameters of Superconducting Planar Structures //Journal of Communications Technology and Electronics. – 2016. – Т. 61. С. 1395–1399
9. **Paramonov M. E.**, Filippenko L. V., Dmitriev P. N., Fominsky M. Y., Koshelets, V. P. Determination of the Parameters of Tunneling Barriers of Superconducting Tunnel Structures for Submillimeter Receivers //Journal of Communications Technology and Electronics. – 2019. – Т. 64. – С. 1144-1148

Тезисы докладов на конференциях:

10. В.П. Кошелец, А.А. Артанов, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, К.В. Калашников, О.С. Киселев, Н.В. Кинев, **М.Е. Парамонов**, К.И. Рудаков, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, «Сверхпроводниковые интегральные приемники ТГц диапазона», Тезисы 1-ой Всероссийской Микроволновой конференции, Москва, 27-29 ноября 2013 г.
11. **Парамонов М.Е.** Голдобин Э.Б. Кошелец В.П., «Измерение ширины линии джозефсоновского генератора с инжекторами», Сборник докладов III Всероссийской микроволновой конференции, 25-27 ноября 2015, г. Москва, стр. 88-91, 2015.
12. К.И. Рудаков, П.Н. Дмитриев, **М.Е. Парамонов**, А.М. Барышев, А.В. Худченко, Р. Хеспер, В.П. Кошелец, Сверхпроводниковые приемные структуры для новых радиоастрономических проектов. XI Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 25 - 28 февраля 2019.
13. **М.Е. Парамонов**, Л.В. Филиппенко, П.Н. Дмитриев, М.Ю. Фоминский, А.Б. Ермаков, В.П. Кошелец, Параметры туннельного барьера сверхпроводниковых структур на основе ниобия, XXIV Междунар. симп., 10-13 марта 2020, Н.Новгород, т. 1, с. 97-98.
14. Pavel N. Dmitriev, **Maxim E. Paramonov**, Kirill I. Rudakov, and Valery P. Koshelets, “High-quality NbN-MgO-NbN SIS junctions and integrated circuits for THz applications”, 25th International Symposium on Space Terahertz Technology ISSTT-2014, 27-30 April 2014, p. 60.
15. V.P. Koshelets, A.A. Artanov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko,

- M.Yu. Fominsky, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, **M.E. Paramonov**, K.I. Rudakov, and H.B. Wang, “Sub-terahertz Integrated Oscillators and Receivers”, 10th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (THz-PLASMA 2016), Nanjing, China, October 09-12, 2016, Abstract Book, p. 58.
16. P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, **M.E. Paramonov**, K.I. Rudakov, and V.P. Koshelets, “Superconducting Local Oscillators; Development and Optimization”, 27th International Symposium on Space Terahertz Technology, 12-15 April 2016, Nanjing, China, Abstract Book, p. 122.

Патенты автора:

17. **M.E. Парамонов**, Л.В. Филиппенко, М.Ю. Фоминский, В.П. Кошелец. "Криогенный перестраиваемый генератор гетеродина субтерагерцового диапазона для интегральных приемных систем".

Патент No. 2638964; Дата государственной регистрации 19.12.2017.