

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



ПАРАМОНОВ Максим Евгеньевич

**«Оптимизация сверхпроводниковых туннельных элементов
и определение их параметров»**

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: д-р физ-мат наук, проф. Кошелец В.П.

Москва 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	13
§1.1. Современные методы исследования субмиллиметрового диапазона.....	13
§1.2. Гетеродинный приемник. Смеситель	15
§1.3. Квантовые смесители	17
§1.4. Туннельные СИС – смесители	18
§1.5. Генераторы ТГц – диапазона. Сверхпроводящие джозефсоновские генераторы	21
§1.6. Генераторы на основе распределенного джозефсоновского перехода	23
§1.7. Взаимодействие генератора и смесителя.....	27
§1.8 Новый тип сверхпроводящего генератора на основе РДП	31
ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	32
§2.1. Изготовление экспериментальных образцов методами тонкопленочных технологий	32
§2.2. Методы тонкопленочных технологий	36
2.2.1. Контактная фотолитография	36
2.2.2. Плазмохимическое травление	37
2.2.3. Анодное окисление тонких пленок	38
2.2.4. Формирования изоляционного слоя из диоксида кремния.	42
2.2.5. Формирование верхнего электрода и контактных площадок, разрезание.....	43
§2.3. Методики и оборудование для проведения низкотемпературного эксперимента. Измерения по постоянному току.....	44
§2.4. Криоголовка для измерений двухсторонних кремниевых микрочипов	49
§2.5. СВЧ – измерения. Схема гармонического СИС – смесителя. Измерительная аппаратура.....	54
ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУННЕЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ	64
§3.1. Туннельные переходы на основе структур Nb/Al-AlO _x /Nb, Nb/Al-AlN/Nb(N)	64
§3.2. Методика оценки основных параметров туннельного барьера	66
§3.3. Экспериментальные туннельные переходы Nb/Al-AlO _x /Nb и Nb/AlN/Nb(N). Аппроксимация экспериментальных данных	69
§3.4. Результаты оценки основных параметров туннельного барьера	77
§3.5. Выводы по главе.....	80
ГЛАВА 4. СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР ГЕТЕРОДИНА	81
§4.1. РДП - генераторы основе структур Nb/Al-AlO _x /Nb	81
§4.2. Резонансный режим работы РДП - генератора	82
§4.3. Спектры излучения генератора с поглощающими слоями	91
§4.4. Выводы по главе.....	96

ГЛАВА 5. ПОЛУФЛАКСОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ГЕТЕРОДИНА	97
§5.1. Сверхпроводящие генераторы для цифровых схем	97
§5.2. Разрыв джозефсоновской фазы в РДП, полуфлаксон	98
§5.3. Реализация полуфлаксонного генератора с инжекторами тока	100
§5.4 Измерения по постоянному току	102
§5.5. СВЧ – измерения	110
§5.6. Выводы по главе.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118

ВВЕДЕНИЕ

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 3000К, таких как звезды на начальных стадиях звездообразования, погруженных в протозвездные газово-пылевые облака; межзвездных пыли и газа, а также планет и малых тел 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 генератора гетеродина (расположенного на одном чипе со смесителем) – ширина линии генерации и возможность его непрерывной перестройки в широком диапазоне частот. 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.

Постановка задачи

Целями настоящей диссертационной работы является: оптимизация конструкции сверхпроводниковых интегральных структур, определение их электрических параметров и развитие измерительных методик для исследования и совершенствования устройств сверхпроводящей 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 полуфлаксона генератора с инжекторами, основанного на создании разрыва фазы внутри перехода.

Научная новизна

- 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 $J > 15 \text{ кА/см}^2$.
- 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.

Научная и практическая ценность 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 или в заливном криостате с помощью специально разработанного сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН научного экспериментального комплекса. Расчет геометрии сверхпроводящих элементов, СВЧ - согласующих структур, проектировка 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.

Положения, выносимые на защиту

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 (РДП) 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.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались в 7 докладах на международных и российских конференциях с публикацией тезисов:

- International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT), 2014 (Москва, Россия), 2016 (Нанкин, Китай)
- International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (THz-PLASMA), 2016 (Нанкин, Китай)
- Всероссийская микроволновая конференция, 2013, 2015 (Москва, Россия)
- Конференция-конкурс молодых ученых им. И. В. Анисимкина, 2014 (Москва, Россия)
- Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», 2020 (Нижний Новгород, Россия)
- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 2019 (Нижний Новгород, Россия)

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. Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Applied Physics Letters (APL), Applied Sciences (MDPI), Радиотехника и электроника, Физика твердого тела, Журнал Радиоэлектроники, Нелинейный мир.

Степень достоверности результатов проводимых исследований

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.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем 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 водятся 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 (Selective Niobium Etching and Anodization Process), 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. Selective Niobium Anodization Process) 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. Представлен метод оценки параметров туннельных барьеров (средней высоты $\bar{\phi}$ и толщины d), основанный на анализе ВАХ переходов. 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 $\bar{\phi}$ и ширины d туннельного барьера от параметра прозрачности туннельного барьера для каждого типа переходов. Снижение средней высоты туннельного барьера перехода с прослойкой из AlN на 0.5 eV, по сравнению с барьером из AlO_x , позволяет получать переходы с плотностью тока выше 15 кА/см^2 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 $2100 \text{ }\Omega \cdot \text{мкм}^2$ (уменьшении плотности туннельного тока перехода J от 20 до 0.1 кА/см^2) 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 $R_n S < 10 \text{ }\Omega \cdot \text{мкм}^2$, требуемых для создания малошумящих приемников субмиллиметрового диапазона.

Глава 4 описывает предложенный и реализованный метод подавления резонансов в субТГц сверхпроводящем генераторе гетеродина на основе РДП. 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. На примере конструкции с расположением поглощающих слоев на неизлучающем конце генератора продемонстрировано полное подавление резонансов при напряжениях $V < V_g/3$. В результате появилась возможность непрерывной перестройки частоты сверхпроводящего генератора гетеродина в диапазоне частот 200 – 700 ГГц при произвольном токе смещения. Далее продемонстрирован спектр излучения такого генератора и измерена ширина линии: она составила 4 – 12 МГц, что позволило реализовать фазовую синхронизацию РДП - генератора во всем диапазоне частот перестройки. Новая конструкция РДП - генератора позволяет

эффективно подавлять резонансные особенности без существенного влияния на выходную мощность.

Глава 5 посвящена разработке сверхпроводящей интегральной микросхемы с генератором гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода с двумя линиями токовых инжекторов, предназначенной для исследования спектральных характеристик 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.

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. Измеренная ширина линии излучения составляла 1 - 10 МГц, что характерно для геометрических (Фиске) резонансов. Были проведены успешные эксперименты по фазовой стабилизации линии излучения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

§1.1. Современные методы исследования субмиллиметрового диапазона

Существенная сложность в исследовании субмиллиметрового диапазона длин волн при помощи наземного оборудования заключается в сильном поглощении атмосферой электромагнитного излучения в этом диапазоне частот (см. рисунок 1.1).

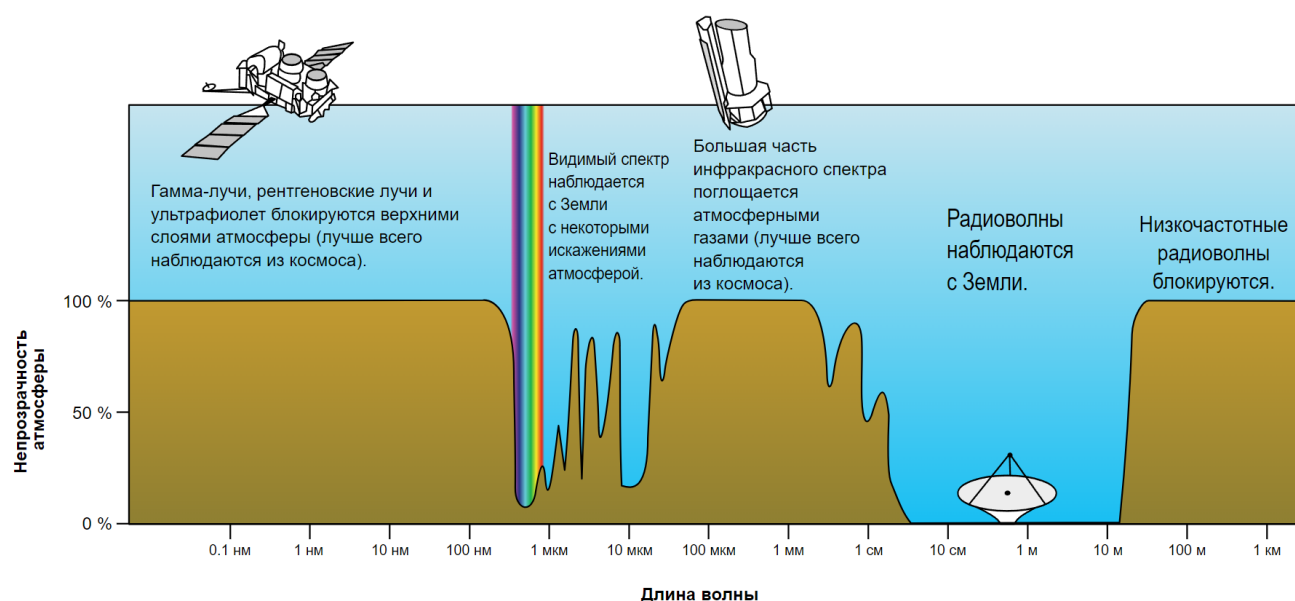


Рисунок 1.1. Пропускание атмосферой электромагнитных волн в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Атмосфера состоит из смеси газов, водяного пара и взвешенных частиц, которые поглощают и рассеивают коротковолновое излучение, оставляя только узкие области, относительно прозрачные для электромагнитных колебаний в видимой и ИК - областях спектра. Рисунок взят из [1].

Большая часть ИК – спектра (в частности ее длинноволновая область) эффективно поглощается молекулами воды и атмосферных газов. Использование космических орбитальных приемных систем позволяет преодолеть ограничения, связанные с атмосферой Земли, хотя и налагает другие, связанные с поддержанием стабильности работы бортовой электроники, прямой и обратной связью с космическим аппаратом, поддержание рабочей, иногда, криогенной температуры на все время работы миссии. Орбитальные телескопы в совокупности с наземными обсерваториями могут быть использованы как радиоинтерферометры со

сверхдлинными базами (РСДБ), метод, который ещё в конце XX века был предложен советскими учёными [2], на данный момент является одним из самых перспективных.

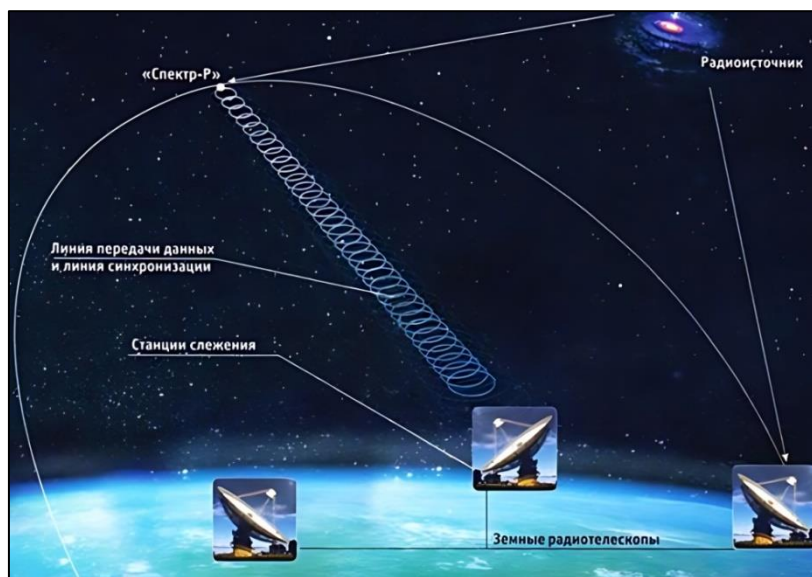


Рисунок 1.2. Иллюстрация РСДБ - системы наземно-космического интерферометра для получения изображений, определения небесных координат и угловых смещений различных объектов Вселенной с исключительно высоким разрешением. Рисунок взят из [3]

В качестве примера - в ближайшие годы российскими учеными запланирован запуск космической миссии «Миллиметр» для исследования миллиметрового и ИК – диапазонов длин волн при помощи криогенного телескопа диаметром 10 м [4]. Планируется, что радиотелескоп будет работать как в режиме одиночного телескопа из точки Лагранжа L2, так и с эллиптической околоземной орбиты в составе наземно-космического интерферометра, необходимого для изучения отдаленных объектов с чрезвычайно малым угловым размером. Для эффективной работы в режиме РСДБ, весь исследуемый диапазон длин волн 0.07- 10 мм разделен на 5 частотных полос. На каждую из них разрабатывается радиометр высокого разрешения. Для наблюдений узких спектральных линий излучений в качестве радиометров используются гетеродинные приемники. Остановимся подробнее на данном методе приема и преобразования исследуемого сигнала.

§1.2. Гетеродинный приемник. Смеситель

Механизм работы когерентного гетеродинного приемника основан на преобразовании вниз частоты исследуемого слабого сигнала на смесительном элементе под действием близкого по частоте сильного сигнала опорного генератора – гетеродина. Структурная схема преобразователя частоты изображена на рисунке 1.3.

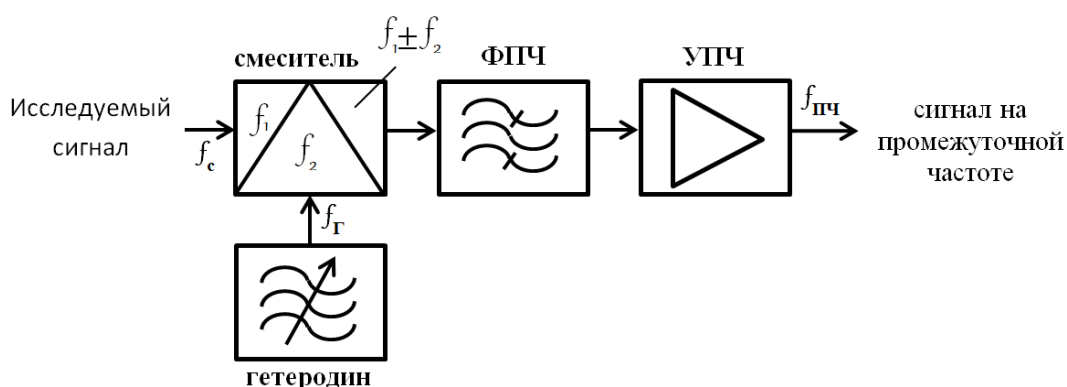


Рисунок 1.3. Блок – схема преобразователя частоты гетеродинного приемника. На вход смесителя поступают слабый исследуемый сигнал и сигнал от гетеродина, далее расположен фильтр промежуточной частоты (ФПЧ) и усилитель промежуточной частоты (УПЧ).

При воздействии на нелинейный элемент суммы гармонических колебаний гетеродина f_G и исследуемого сигнала f_c возникают спектральные составляющие с комбинационными частотами (см. рисунок 1.4). Возникающие на смесителе колебания объединяются в колебания тока с различными суммарными и разностными частотами. Обычно в качестве промежуточной частоты (ПЧ) используется разностная $f_{ПЧ} = |f_G - f_c|$; остальные частоты отсекаются полосовым фильтром ПЧ - тракта. Также в выходном спектре смесителя на $f_{ПЧ}$ может возникать дополнительный (в том числе шумовой) сигнал из-за наличия так называемой зеркальной частоты (обозначена пунктиром на рисунке 1.4).

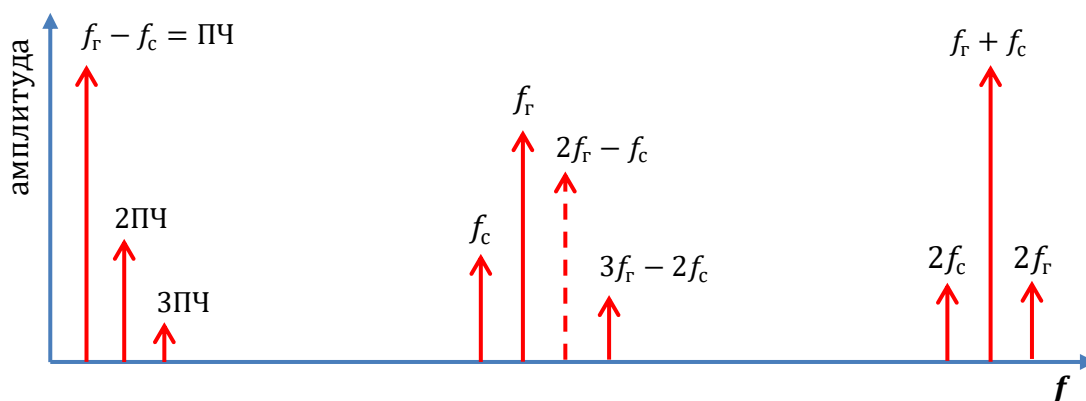


Рисунок 1.4. Спектр, качественно демонстрирующий разнообразие результирующих комбинационных частот на смесителе, среди которых обычно выделяют разностную $f_r - f_c$ и суммарную $f_r + f_c$ частоты.

Зеркальная частота возникает в результате того, что промежуточная частота равна абсолютной разности между частотой сигнала и частотой гетеродина (см. рисунок 1.5). Это означает, что приемник может одновременно принимать сигналы с двумя разными несущими частотами, расположенными симметрично по отношению к частоте гетеродина. Одна из этих частот меньше частоты гетеродина на промежуточную частоту $f_{ПЧ}$, а другая больше частоты гетеродина на ту же величину – говорят, что приемник работает в двухполосном режиме (DSB).

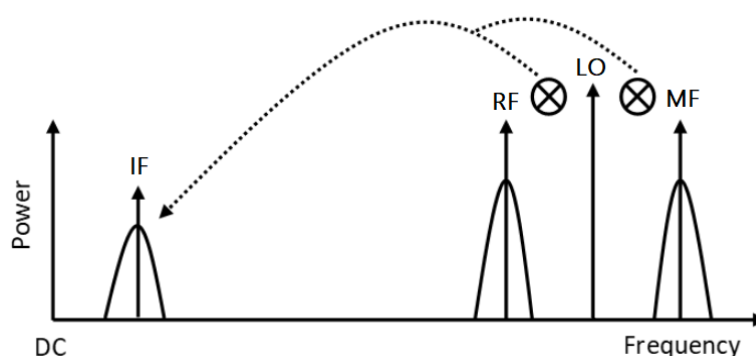


Рисунок 1.5. Спектральная диаграмма, демонстрирующая работу двухполосного гетеродинного приемника. На рисунке IF – промежуточная частота (от англ. Intermediate Frequency), RF – принимаемый сигнал (от англ. Radio Frequency) LO – генератор гетеродина, MF – зеркальный канал (от англ. Mirror Frequency). Рисунок взят из [5].

§1.3. Квантовые смесители

В 70-х годах прошлого века впервые был продемонстрирован туннельный «супер - Шоттки» диод, представляющий из себя контакт сильнолегированного полупроводника (в частности GaAs) со сверхпроводящим металлом [6]. На то время это был самый чувствительный микроволновый смеситель из известных. Изначально представлялось, что супер - Шоттки является почти идеальным туннельным диодом и лишен недостатков классического резистивного смесителя с присущими им дробовым и тепловым шумом из-за сопротивления растекания в полупроводнике. Кроме того, крутизна его ВАХ при криогенных температурах на несколько порядков превосходила характеристики полупроводниковых аналогов. Проводимость такого перехода, относительно тока, сильно менялась в масштабе энергий фотонного воздействия принимаемого излучения hf/e , пересчитанного в напряжение: это проиллюстрировано на рисунке 1.6.

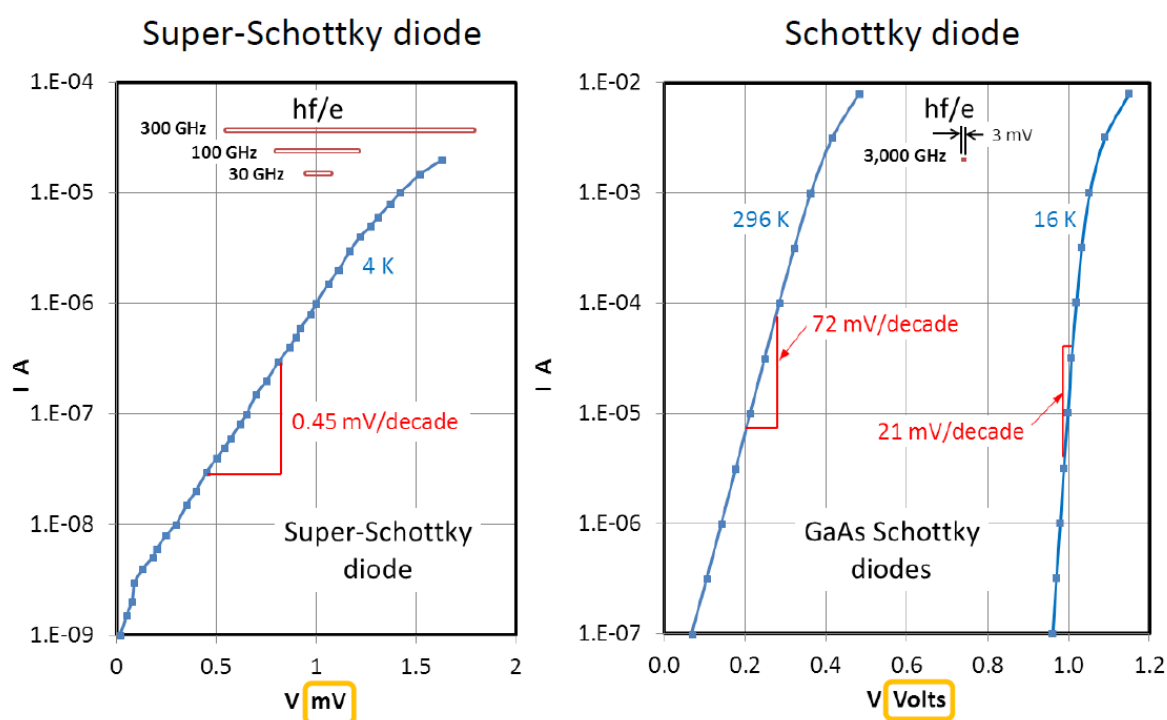


Рисунок 1.6. Сравнение вольтамперных характеристик сверхпроводящего и полупроводникового диодов Шоттки по степени крутизны зависимости. Красными скобками указано напряжение, необходимое для десятикратного изменения тока для каждого типа диода. Сверху над каждой ВАХ показан масштаб энергии фотонного воздействия пересчитанный в напряжение. Рисунок взят из работы [7].

Разработанная Дж. Такером теория квантового смещения [8 - 9] описывала применение переходов с такими свойствами для когерентного приема миллиметрового и суб-миллиметрового излучения. В таком приемнике отклик по току от малого приходящего сигнала приближался к одному электрону на каждый поглощенный фотон на СВЧ. Предсказанные явления позволили производить усиление входного сигнала с преобразованием частоты вниз с уровнем собственных шумов приближающимся к фундаментальному квантовому пределу $hf/k_B T$, который налагается квантовой статистикой на флуктуации поступающего сигнала [10, 11]. Таким образом, квантовые смесители работают на таких частотах, где энергия фотонов становится сравнимой с масштабом напряжения нелинейности постоянного тока. При уменьшении масштаба воздействия (на низких частотах) на нелинейной ВАХ задействуется только ее малый (линейный в пределе низких значений напряжения) участок - тем самым реализуется классическая модуляция ВАХ постоянного тока. Супер - Шоттки диоды впоследствии стали использовать в основном как классические смесители, рабочие частоты таких устройств не удалось поднять выше 100 ГГц из-за паразитных потерь, связанных с увеличением сопротивления растекания в полупроводнике при уменьшении геометрического размера диода. Попытки создать смесители для частот, сравнимых с ИК и даже видимым диапазоном частот, ограничивались малой нелинейностью используемых переходов. Как уже было сказано, квантовые эффекты не будут проявляться до тех пор, пока энергия налетающих фотонов не сравнится с высотой потенциального барьера перехода.

§1.4. Туннельные СИС – смесители

Еще более сильной нелинейностью (по мнению большого количества авторов, самой сильной нелинейностью в природе) обладают сверхпроводящие туннельные СИС – переходы, представляющих из себя слабую связь двух сверхпроводников через тонкий слой изолятора. Типичная ВАХ туннельного СИС – перехода на основе трехслойной структуры Nb/Al – AlO_x/Nb представлена на рисунке 1.7. Туннельные СИС – переходы имеют одночастичные ВАХ которые сильно нелинейны в масштабе 1 мВ благодаря наличию сверхпроводящей энергетической щели – это хорошо видно на вставке рисунка 1.7. Такая ВАХ СИС - перехода обусловлена проявлениями стационарного и нестационарного эффектов Джозефсона: бездиссипативное протекание сверхпроводящего тока через туннельный барьер при токе смещения меньше критического ($I_{bias} < I_c$) и резкое переключение в резистивное состояние с преобладающим протеканием тока одиночных электронов (также называемыми

квазичастицами) при превышении тока I_c . Резкое изменение проводимости туннельного СИС перехода происходит при переходе через напряжение щелевой особенности СИС - контакта $V_g = (\Delta_1 + \Delta_2)/e$. Использование данной квазичастичной нелинейности для преобразования частоты базируется на квантовом поведении одиночных электронов - способность туннелировать через барьерный слой перехода под внешним воздействием приходящих СВЧ - фотонов. В результате воздействия СВЧ – сигнала на СИС – переход, энергия фотонов эффективно поглощается квазичастицами перехода, что приводит к росту туннельного тока и на ВАХ перехода возникают квазичастичные ступени отстоящие от щелевого напряжения V_g на величину hf/e (рисунок 1.8). Вынужденное туннелирование квазичастиц под действием внешнего СВЧ – излучения в англоязычной литературе называется photon assisted tunneling).

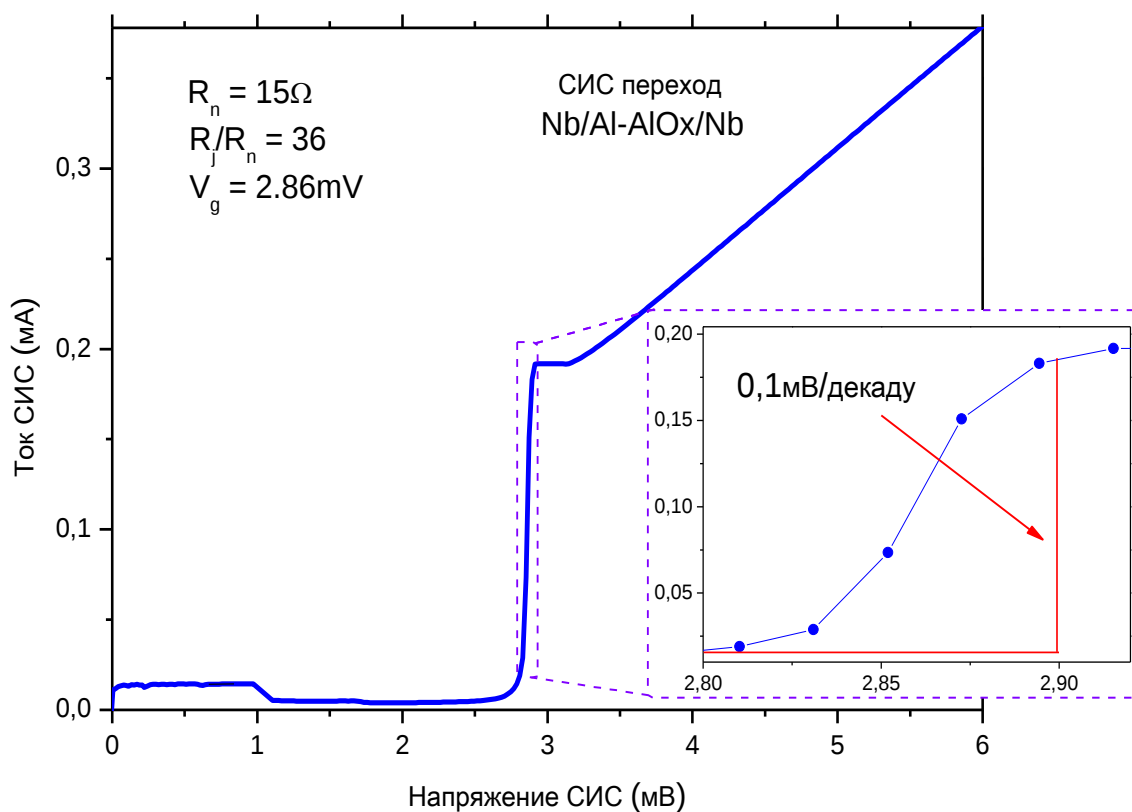


Рисунок 1.7. Типичная ВАХ туннельного СИС – перехода измеренная в режиме задания напряжения (и подавлением критического тока) на основе трехслойной структуры Nb/Al - AlO_x/Nb с характерной щелевой особенностью при напряжении $V_g = (\Delta_1 + \Delta_2)/e$, где Δ - величина энергетической щели ниобия, e – заряд электрона. На вставке: увеличенная область в районе щелевого напряжения V_g . Изменение напряжения на 0.1 мВ соответствует десятикратному приращению тока

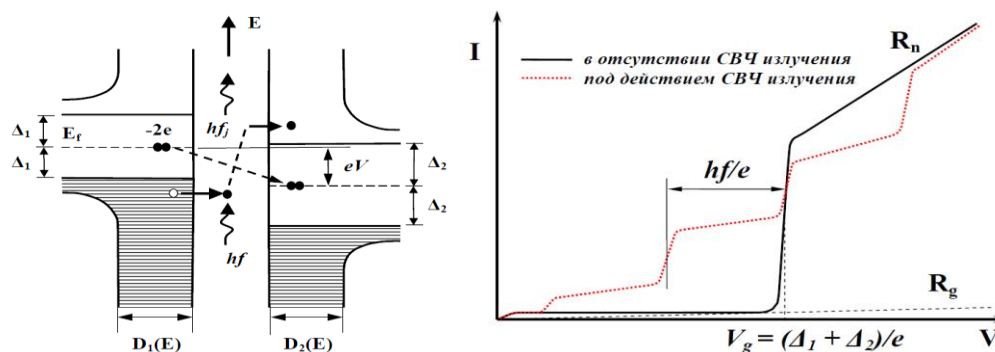


Рисунок 1.8. Энергетическая диаграмма поясняющая процесс вынужденного туннелирования квазичастиц через слой изолятора под действием приходящего фотона с энергией hf (слева) и ВАХи СИС – смесителя автономная и под воздействием внешнего СВЧ – сигнала частотой f (справа).

Механизм квантового преобразования частоты в СИС - смесителе детально представлен в работе [9]. Интересную аналогию данного процесса с принципом действия фотодетектора можно найти в исследовании [12].

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 [13 - 17]. Также СИС – смесители на основе структур Nb/Al-AlN/NbN планируется использовать в составе трех из четырех радиометров в режиме одиночного телескопа для миссии Миллиметрон в диапазонах частот: 500 – 600 ГГц, 750 – 900 ГГц, 1080 – 1220 ГГц.

Важной особенностью туннельных СИС – переходов является их достаточно большая удельная емкость, вследствие наличия изолирующего слоя, которая шунтирует полезный СВЧ – сигнал и влияет на входной импеданс смесителя. Для минимизации влияния емкости на СВЧ – характеристики перехода, при проектировке устройств, принимаются меры по её компенсации включением в схему дополнительной индуктивности. Точная оценка емкости возможна при известных основных электрических и геометрических параметрах будущего СИС – перехода. В связи с этим, одной из основных задач данной работы является: получение количественных оценок основных параметров барьеров наиболее часто используемых типов сверхпроводящих структур СИС и их зависимости от плотности туннельного тока.

Ещё одним принципиально важным элементом схемы преобразователя частоты является собственный перестраиваемый генератор (гетеродин) для исследуемого частотного диапазона.

§1.5. Генераторы ТГц – диапазона. Сверхпроводящие джозефсоновские генераторы

На данный момент существует множество типов ТГц – генераторов с удовлетворяющими характеристиками для использования в гетеродинной радиотехнике высокого разрешения. Среди которых: лампы обратной волны (ЛОВ), многокаскадные полупроводниковые умножители, резонансно – туннельные диоды (РТД), квантово – каскадные лазеры (ККЛ), газовые лазеры и фотонные гетеродины, основанные на преобразованном вниз по частоте сигнале на фотодиоде от двух когерентных лазеров. Фотографии некоторых твердотельных генераторов представлены на рисунке 1.9.

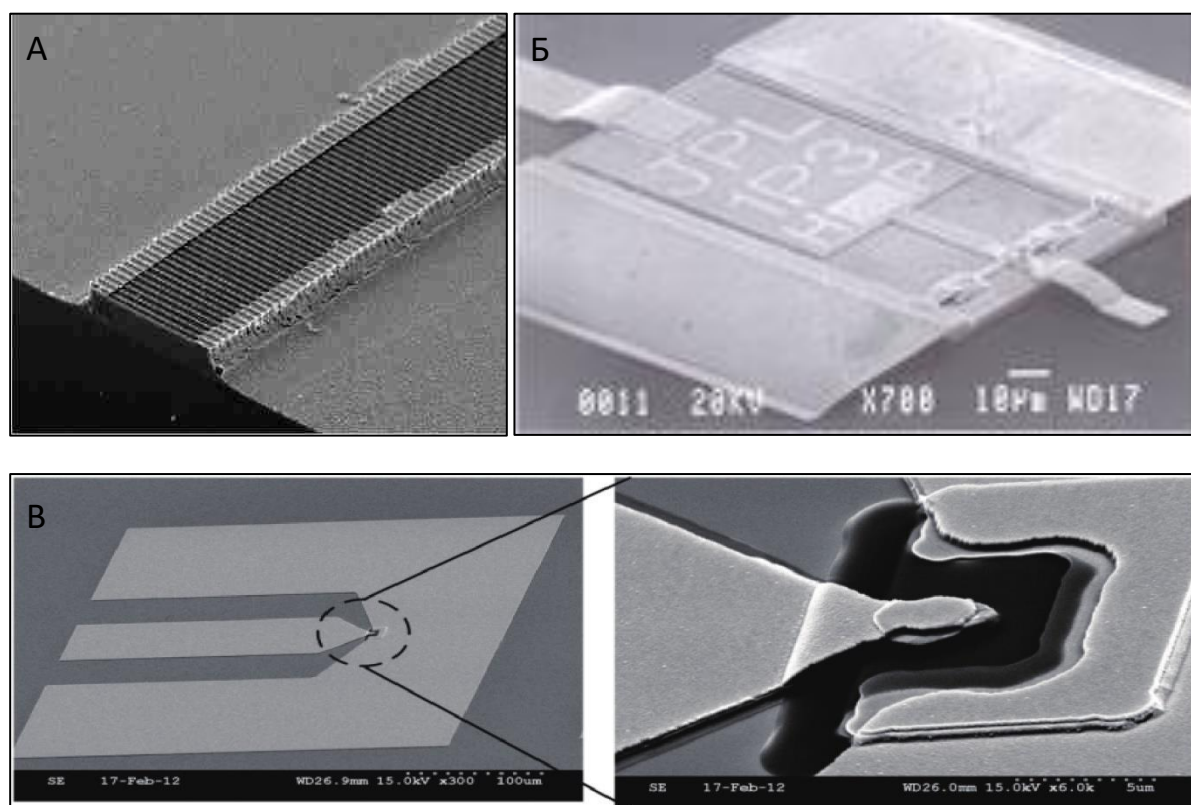


Рисунок 1.9. Микрофотографии ТГц – генераторов применяемых в качестве гетеродинов в спектроскопии высокого разрешения. [А] – квантово – каскадный лазер с распределенной обратной связью (DFB), [Б] – генератор на полупроводниковых умножителях, [В] – резонансно – туннельный диод. Фотографии взяты из [18 - 20].

Каждый генератор занимает свою нишу в различных наземных и космических приемных устройствах миллиметрового диапазона из-за: требований к условиям работы, массы и габаритных размеров, технологической совместимости. Однако, ни один из перечисленных генераторов не может быть интегрирован в сверхпроводящую схему СИС - смесителя из – за

технологической несовместимости. Для их совместной работы применяются различные методы, в том числе, введение квазиоптического тракта с интегрированной на чип смесителя антенной или согласованного со смесительной камерой волновода, которые сами по себе являются сложной инженерной задачей. Новым направлением в развитии сверхпроводниковой электроники стало появление сверхпроводящих генераторов, основанных на нестационарном эффекте Джозефсона. Принцип которого заключается в появлении осциллирующей компоненты сверхпроводящего тока с частотой:

$$f = \frac{2e}{h} V \quad (1.1)$$

пропорциональной приложенному напряжению на постоянную величину:

$$\frac{2e}{h} = \Phi_0^{-1} \cong 483,6 \text{ ГГц/мВ} \quad (1.2)$$

где e – заряд электрона, h – постоянная Планка. Устройства основанные на таком принципе имеют линейную зависимость частоты генерации от приложенного напряжения и являются генераторами управляемыми напряжением (ГУН). В настоящее время самые известные джозефсоновские генераторы построены на цепочке сосредоточенных туннельных переходов из сверхпроводящих материалов на основе ниобия которые включаются в микрополосковую линию. А также, генераторы основанные на ВТСП слоистой мезаструктуре, в которой из-за межслойного перекрытия волновых функций s – и d – типа сверхпроводящего параметра порядка возникают области слабой связи. Для последнего, в масштабах выращенного кристалла, это массив последовательно соединенных джозефсоновских переходов. К слабым местам цепочек джозефсоновских генераторов можно отнести технологическую сложность изготовления большого массива переходов с одинаковыми параметрами для получения перестраиваемого узкополосного излучения. Далее подробнее остановимся на СВЧ – генераторах, построенных на распределенном джозефсоновском переходе (РДП) и основанных на несколько схожем принципе генерации, однако более простых в изготовлении.

§1.6. Генераторы на основе распределенного джозефсоновского перехода

РДП - генератор или сверхпроводящий генератор гетеродина (СГГ) представляет собой длинный джозефсоновский туннельный СИС - переход, подключенный к питающим линиям по геометрии “overlap” (от англ. перекрытие), см. рисунок 1.10.

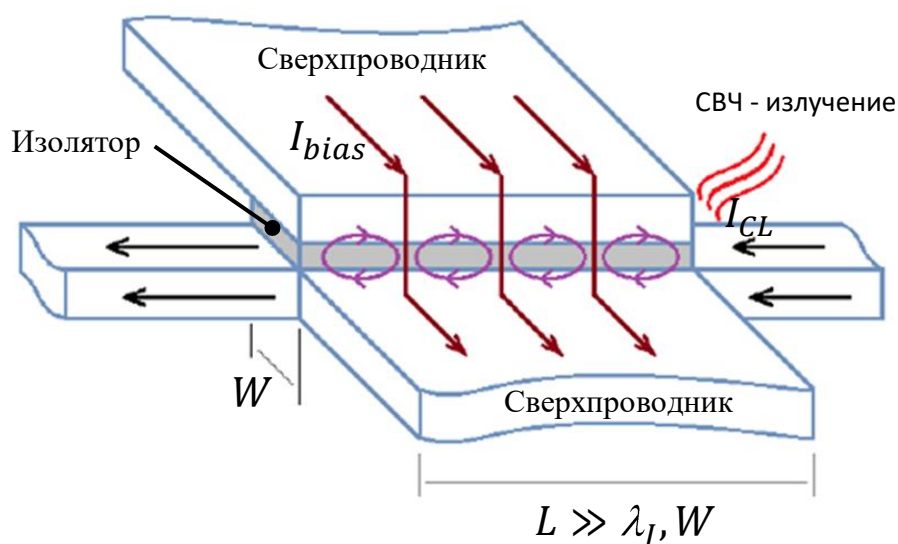


Рисунок 1.10. Структурная схема генератора основанного на РДП.

Длина РДП L больше его ширины W и джозефсоновской глубины проникновения магнитного поля в переход λ_J . Типичные размеры гетеродина, основанного на РДП: $L = 400 - 700$ мкм, $W = 4 - 28$ мкм. Величина плотности критического тока через переход $j_c = 2 - 8$ кА/см², что соответствует глубине проникновения $\lambda_J = 8 - 4$ мкм. В качестве сверхпроводящих материалов используются ниобий Nb либо нитрид ниобия NbN, а для туннельного слоя используются оксид алюминия, либо его нитрид. Принцип работы генератора на основе РДП состоит в следующем. Через РДП задается постоянный ток смещения I_{bias} и прикладывается внешнее магнитное поле (параллельное плоскости перехода), которое задается током I_{CL} через линию управления. Магнитное поле способствует проникновению кванта магнитного потока внутрь перехода на одном из краев контакта - джозефсоновская фаза $\varphi(x)$ вдоль перехода меняется с образованием вихря, несущего квант магнитного потока. Ток смещения заставляет этот квант двигаться, и в результате в переходе возникает однонаправленный поток джозефсоновских вихрей, каждый из которых имеет длину $2\lambda_J$ вдоль

плоскости перехода и $2\lambda_L$ в направлении, перпендикулярном плоскости перехода, где λ_L - лондоновская глубина проникновения поля в переход, типичное значение λ_L для пленок ниобия ~ 90 нм. Двигаясь вдоль перехода под действием силы Лоренца, флаксоны отталкиваются друг от друга и образуют цепочку вихрей, которая при больших магнитных полях является достаточно жесткой [21, 22]. При пересечении противоположного края перехода движущимся флаксонном возникает всплеск напряжения V , интеграл которого по времени равен величине «вышедшего» кванта магнитного потока:

$$\int V dt = \Phi_0 = 2\text{мВ} \cdot 1\text{пс}, \quad (1.3)$$

где Φ_0 – квант магнитного потока. Скорость и плотность этой флаксонной цепочки, а, следовательно, мощность и частота электромагнитного излучения, возникающего при переходе квантов через границу, можно настраивать путем изменения тока смещения I_{bias} и тока через линию управления магнитным полем I_{CL} .

Работа СГГ на основе РДП имеет ряд особенностей, связанных с различными режимами движения флаксонов. При напряжениях $V < V_g/3$, где V_g - щелевое напряжение туннельного перехода реализуется, так называемый, резонансный режим протекания флаксонов. Этот режим характеризуется малым значением параметра затухания электромагнитной волны α , и переход ведёт себя как линия передачи с резонансными модами собственных электромагнитных колебаний. Часть генерируемого потоком флаксонов электромагнитного излучения отражается на конце перехода и достигает его противоположного конца. В результате в переходе возникают стоячие волны с резонансными модами:

$$f_m = m \frac{\pi \cdot c_{SW}}{L}, \quad (1.4)$$

где m – номер моды, c_{SW} – скорость Свайхарта, L – длина перехода. Эти моды взаимодействуют с джозефсоновским током и при совпадении частоты джозефсоновского тока с одной из резонансных мод на ВАХ перехода образуются ступени джозефсоновского тока при напряжениях:

$$V_m = m \cdot h \cdot c_{SW} / 4eL, \quad (1.5)$$

где h - постоянная Планка, e – заряд электрона, называемые ступенями Фиске. Таким образом, вольтамперные характеристики РДП в этой области напряжений имеют ярко выраженную резонансную структуру (см. рисунок 1.11). Это в значительной степени затрудняет осуществление плавной перестройки частоты генератора, и делает её невозможной при постоянном токе смещения из-за отсутствия рабочих точек между ступенями.

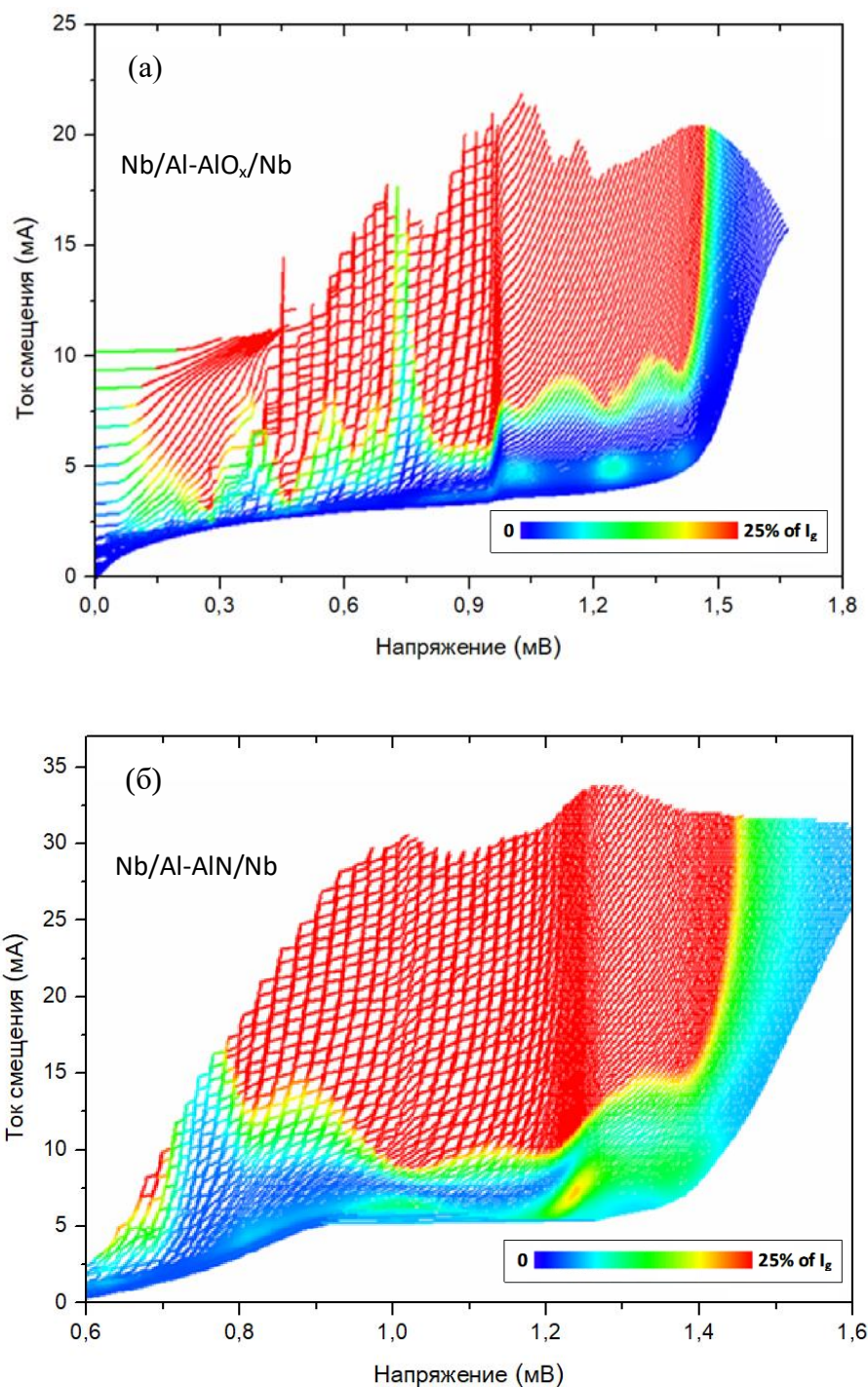


Рисунок 1.11. Семейства ВАХ РДП на основе структур Nb/Al AlO_x/Nb (а) и Nb/Al-AlN/NbN (б), измеренные при различных значениях магнитного поля. Цветовая палитра показывает уровень увеличения постоянного тока (принимającego СВЧ – сигнал) от СИС смесителя, индуцированного излучением РДП (в процентах от скачка его квазичастичного тока на щели I_g). Красные области соответствуют параметрам работы СГГ, при которых рост квазичастичного тока СИС смесителя превышает 25% скачка его тока при целевом напряжении. Этот уровень заведомо выше оптимального для нормальной работы смесителя.

При значениях напряжения $V \sim V_g/3$ происходит резкое возрастание квазичастичного тока перехода, которое объясняется эффектом джозефсоновской самонакачки (на англ. JSC - Josephson self - coupling) [23 - 25]. Суть этого эффекта заключается в поглощении энергии переменного джозефсоновского излучения, генерируемого самим СГГ, квазичастицами; это приводит к уже описанному выше процессу туннелирования с помощью фотонов. Эффект джозефсоновской самонакачки может быть получен из уравнения Вертхамера; согласно теории [26], влияние джозефсоновской самонакачки на ВАХ должно быть более заметным для джозефсоновских туннельных переходов с высокой плотностью критического тока. В результате на ВАХ РДП наблюдается рост квазичастичного тока при напряжениях:

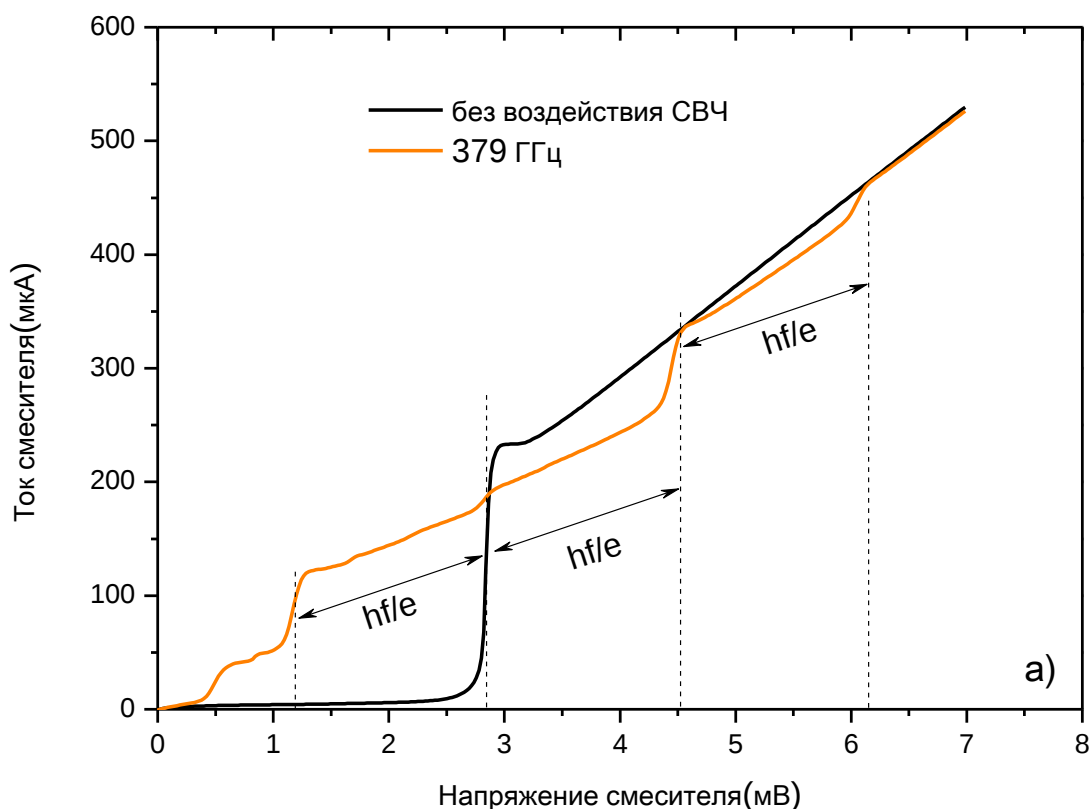
$$V_{JSC} = V_g / (2n + 1), \quad (1.6)$$

где n – целое число, наиболее выраженный эффект наблюдается при $n = 1$, что соответствует $V_{JSC} = V_g/3$ (на рисунке 1.11 эта область хорошо видна в виде характерного уплотнения ВАХ на трети щелевого напряжения, которая составляет примерно 0.95 и 1.25 мВ для переходов на основе структуры Nb/Al - AlO_x/Nb и Nb/Al - AlN/NbN соответственно). Как следствие поглощения ТГц излучения, генерируемого самим СГГ, на частотах f выше $V_g/3$ существенно возрастает коэффициент затухания α . Для туннельного перехода длиной L при выполнении условия $\alpha L / \lambda_j > 1$ эффект самонакачки приводит к исчезновению ступеней Фиске и СГГ переходит в так называемый режим вязкого течения вихрей. Возникновение такой ступени квазичастичного тока характеризуется резким возрастанием дифференциального сопротивления перехода при значениях напряжения, несколько превышающих $V_g/3$. При более высоких значениях напряжений дифференциальное сопротивление РДП уменьшается, сужается полоса автономного излучения, и становится легко осуществимой плавная перестройка частоты СГГ в достаточно широком диапазоне. СГГ генерирует сигнал вплоть до напряжения порядка $V_g/2 = \Delta/e$, пока энергия генерируемых квантов не превышает энергию джозефсоновского взаимодействия 2Δ . Превышение этой энергии приводит к разрыву куперовских пар и поглощению электромагнитной волны в электродах перехода. На практике уже при энергиях порядка Δ возникают сильные потери в электродах.

§1.7. Взаимодействие генератора и смесителя

Как упоминалось в §1.4 сигнал от генератора гетеродина воздействует на СИС - смеситель, на ВАХ которого возникают квазичастичные ступени отстоящие по обе стороны от щелевой особенности при V_g на кратную величину hf/e , соответствующую энергии кванта приходящих фотонов. Высота первой квазичастичной ступени дает качественную оценку мощности приходящего на СИС – смеситель СВЧ сигнала от генератора через схему согласования, а ее ширина пропорциональна частоте сигнала. На рисунке 1.12 (а, б) показаны ВАХ СИС – смесителя под воздействием СВЧ – излучения с частотами 379 ГГц и 642 ГГц соответственно.

Для получения рабочей характеристики генератора (см. рисунки 1.11 и 1.13) и проверки согласующей СВЧ - структуры проводятся циклические измерения ВАХ РДП - генератора при воздействии магнитного поля различной напряженности (подробное описание см. в §2.8). Одновременно с этим, на гармонический СИС – смеситель задается смещающее напряжение 2.5 мВ (для переходов Nb/Al-AlO_x/Nb).



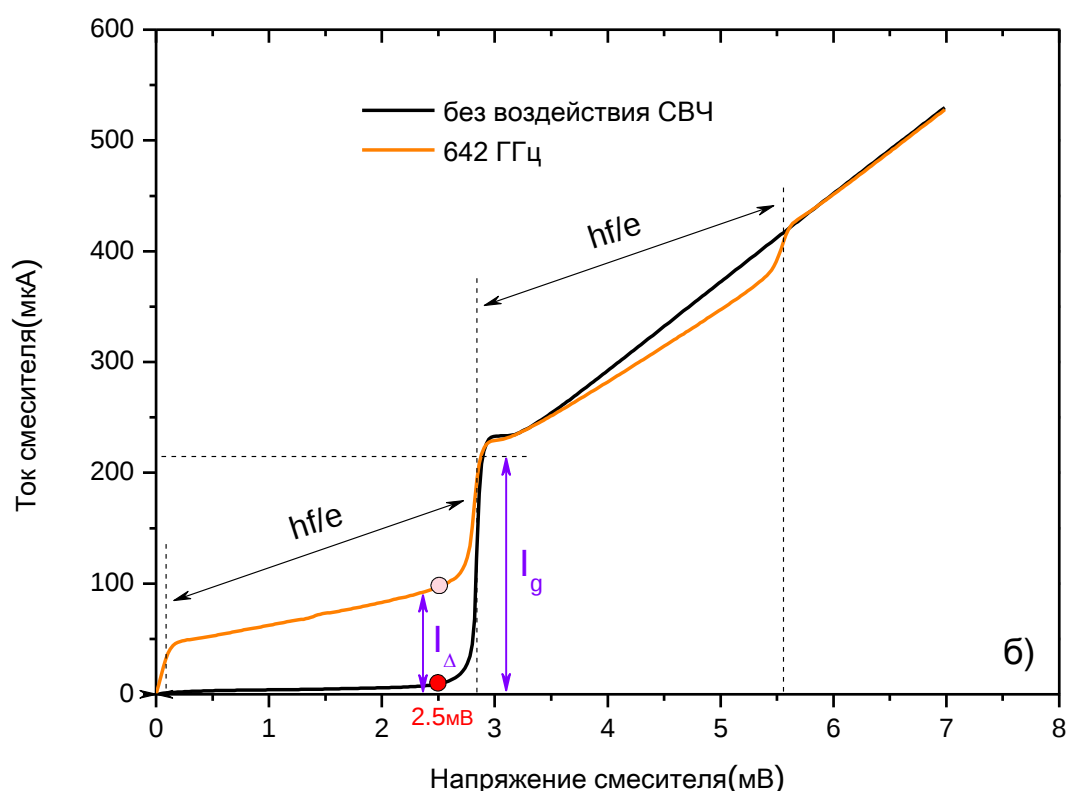


Рисунок 1.12. Вольтамперные характеристики СИС – смесителя без воздействия СВЧ – сигнала (черным) и под действием СВЧ (оранжевым) на частотах 379 ГГц и 642 ГГц. На рисунке б) отмечена точка измерения уровня накачки СИС – смесителя гетеродином на уровне напряжения 2.5 мВ для автономной и накачанной кривой, а также величины скачка квазичастичного тока на щели I_g и приращение тока смесителя I_Δ .

При данном измерении, каждой точке на ВАХ РДП ставится в соответствие приращение тока СИС – смесителя (величина скачка тока накачки I_Δ/I_g в рабочей точке на квазичастичной ступени - см. рисунок 1.12). Мощность приходящего на СИС - смеситель излучения от РДП - генератора изображается на ВАХ РДП дополнительной цветовой шкалой (см. рисунки 1.11 и 1.13). Оптимальный уровень накачки СИС – смесителя достигается когда величина скачка тока на квазичастичную ступень $> 10 - 25\%$ от I_g – скачка тока при щелевом напряжении. Данная методика помогает качественно оценить полосу пропускания СВЧ – тракта между генератором и СИС – смесителем, а также диапазон оптимального уровня накачки смесителя.

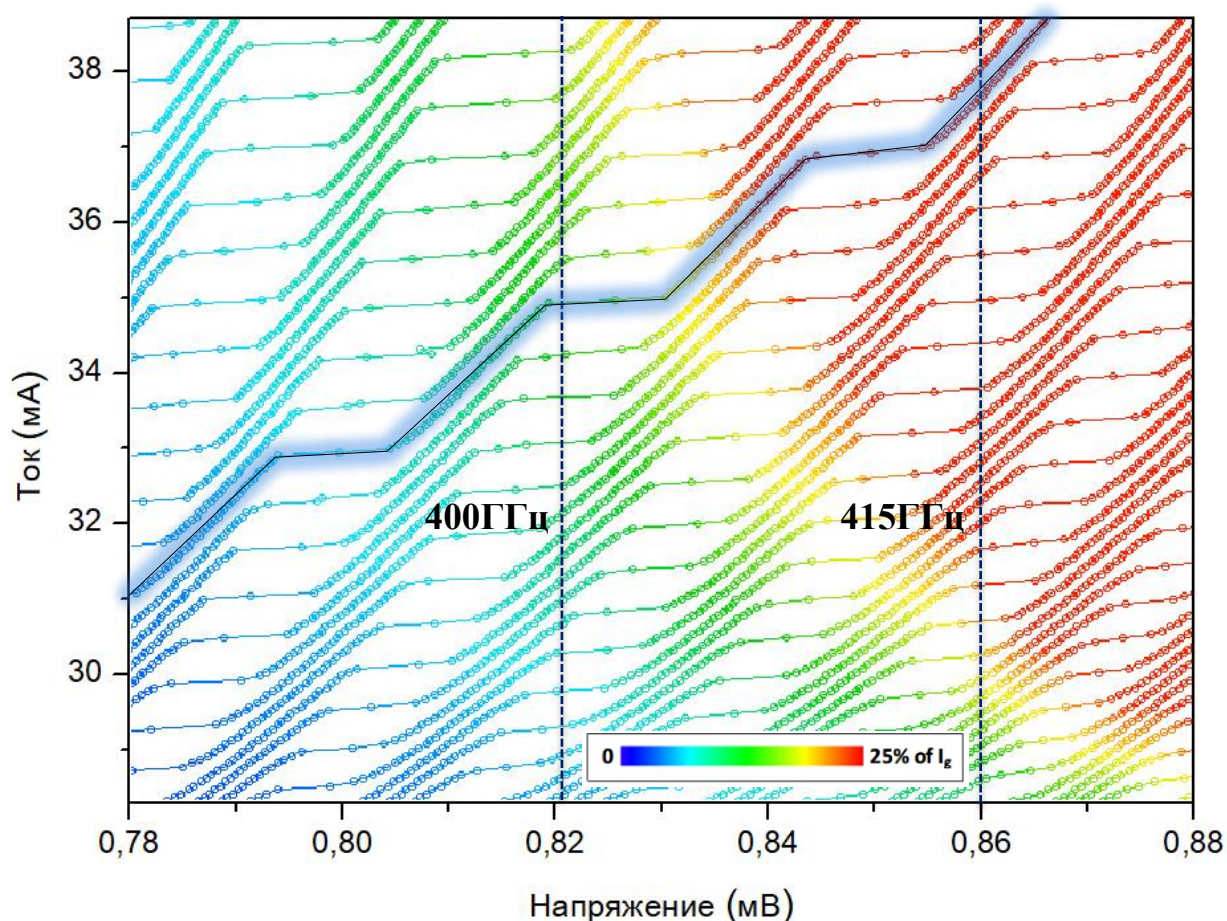


Рисунок 1.13. Семейство ВАХ РДП на основе структур Nb/Al-AlO_x/Nb в узком диапазоне напряжений (резонансная область). Точки на графике окрашены в соответствии со шкалой накачки СИС - смесителя. Подсвеченная кривая на графике представляет из себя отдельную ВАХ, измеренную при фиксированном магнитном поле.

В соответствии с соотношением Джозефсона (1.1), для достижения заданной частоты генерации устанавливается фиксированное напряжение на РДП. На измеренной ВАХ это соответствует некоторым точкам, лежащим на вертикальной прямой (рисунок 1.13). Стоит упомянуть, что форма ВАХ и, следовательно, расположение рабочих точек претерпевает малое изменение при изменении конфигурации и настроек линий управления РДП и термоциклировании [27]. Рабочие точки, расположенные на линии, будут различаться уровнем накачки смесителя (цветовая маркировка) и величиной дифференциального сопротивления, последнее, как будет показано далее, сильно влияет на ширину линии излучения. Перестройка частоты генерации соответствует изменению напряжения на РДП. Как уже отмечалось в предыдущем параграфе, рабочий диапазон перестройки сверхпроводящего генератора ограничен ступенчатой структурой в резонансной области ВАХ РДП. Проблематика, связанная

с отсутствием рабочих точек между ступенями генерации [27], [28] и различные методики решения этого ограничения [28] предпринимались ранее в рабочей группе автора. В указанных работах демонстрируется возможность перехода на близлежащую по магнитному полю ступень, соответствующую тому же напряжению, при условии их перекрытия. Также рассматривается способ конструктивного увеличения продольного размера перехода для сглаживания резонансной структуры, вследствие, увеличения коэффициента затухания α . Однако, оптимального решения подавления Фиске – ступеней в резонансной области работы СГГ, для переходов с высокой плотностью туннельного тока, предложено не было.

Важным условием для успешной работы сверхпроводящего генератора в качестве гетеродина в приемной системе, является его перестройка с шириной линии излучения не превышающей 10 - 15 МГц для реализации режима фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Ширина линии джозефсоновского перехода определяется комбинацией тепловых и дробовых шумов в туннельном переходе, которые преобразуются во флуктуации частоты на дифференциальном сопротивлении туннельного перехода R_d , определяемого как:

$$R_d = \frac{\partial V_{\text{РДП}}}{\partial I_{\text{bias}}} \text{ при } I_{CL} = \text{const}, \quad (1.7)$$

где $V_{\text{РДП}}$ – напряжение генератора, I_{bias} – ток смещения. Для сосредоточенного туннельного перехода автономная ширина линии генерации дается выражением:

$$\delta f = R_d^2 S_I(0), \quad (1.8)$$

где δf – ширина автономной линии генерации, $S_I(0)$ – плотность низкочастотных флуктуаций тока, R_d – дифференциальное сопротивление. Для распределенного перехода полное уравнение для автономной ширины линии генерации оптимизировано благодаря работам [29][30] и определяется эмпирическим выражением:

$$R_d = R_d^{\text{bias}} + K \cdot R_d^{\text{CL}}, \quad (1.9)$$

где R_d^{bias} – дифференциальное сопротивление РДП по току питания, R_d^{CL} – дифференциальное сопротивление РДП по току управления внешним магнитным полем, K – корректировочный коэффициент зависящий от конструкции данного перехода.

Также отметим, что возможность перестройки генератора в доступном диапазоне частот и фундаментальная связь напряжения на джозефсоновском переходе с частотой генерации:

$$\Delta f = \frac{2e}{h} \Delta V, \quad (1.10)$$

где Δf – величина приращения частоты генератора, e – заряд электрона, h – постоянная Планка, ΔV – приращение напряжения на переходе, позволяют провести чрезвычайно точные измерения (точность измерений может достигать 10 нВ) напряжения на генераторе в каждой из рабочих точек. Данный способ определения напряжения на генераторе позволяет с высокой точностью получить значения дифференциального сопротивления R_d^{bias} , необходимого для корректировки эмпирического выражения связи дифференциального сопротивления R_d^{bias} с шириной линии генерации δf уравнение (1.8).

Таким образом, следующей основной задачей данной работы является: реализация методики подавления Фiske - резонансов в субТГц сверхпроводящем генераторе гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода для возможности его непрерывной перестройки в резонансной области его ВАХ и реализации режима ФАПЧ.

§1.8 Новый тип сверхпроводящего генератора на основе РДП

Еще в 80-х годах прошлого века, были исследованы джозефсоновские генераторы, работающие на основе распространения флаксонов вдоль РДП в режиме ступеней нулевого поля (англ. Zero Field Steps) [31-33]. Данные генераторы способны работать в составе очень чувствительных схем вследствие отсутствия необходимости использования магнитного поля для их функционирования. Однако такие генераторы не способны обеспечить значительную мощность для нагрузки из-за противоречивых требований. С одной стороны, для максимизации мощности, передаваемой от РДП на выходную микроволновую линию, связь между выходной линией и РДП должна быть хорошо согласована по импедансу. С другой стороны, при таком хорошем согласовании флаксоны не будут отражаться от края РДП, а будут диссипировать, что останавливает генерацию. Таким образом, создание и исследование новых типов сверхпроводящих генераторов, работающих без применения магнитного поля, является еще одной задачей данной работы. Помимо радиотехнических приложений такие генераторы могут быть использованы в криогенной квантовой электронике, тем самым выводя ее на новый уровень.

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

§2.1. Изготовление экспериментальных образцов методами тонкопленочных технологий

Процесс создания тонкопленочных планарных сверхпроводящих схем начинается с проектирования их топологии в САПР AutoCAD, где на площадке 24×24 мм размещаются двухмерный массив микрочипов. Для одного из используемых вариантов схем это 26 чипов размера 3×4.2 мм², имеющих различную, в зависимости от задач исследователя, топологию (см. рисунок 2.1). Каждый топологический слой будущей схемы задается плоскими геометрическими фигурами в соответствующем слое проекта – чертежа. Затем полученный дизайн переносится в виде отдельных рисунков, соответствующих каждому слою на хромированное стекло фотошаблона (покрытое чувствительным к электронному лучу резистом) с помощью электронного литографа. После процедур проявления и жидкостного травления рабочей поверхности будущего фотошаблона, на стекле остаются прозрачные и непрозрачные, для ультрафиолетовых длин волн, области повторяющие геометрию спроектированного дизайна (см. рисунок 2.2).

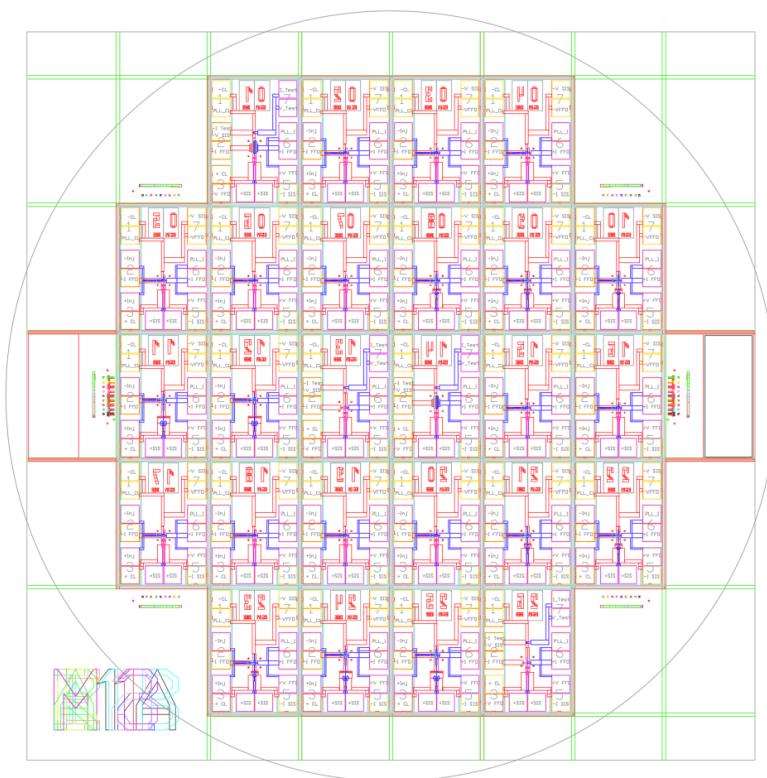


Рисунок 2.1. Проект фотошаблона из САПР AutoCAD для 26 рабочих микрочипов с совмещенными технологическими слоями (различаются цветом).

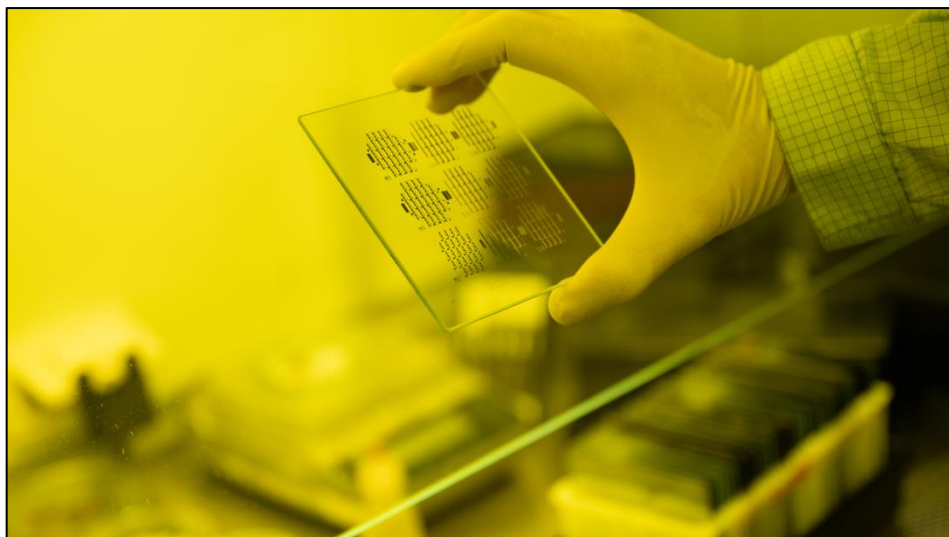


Рисунок 2.2. Фотография фотошаблона размером 100×100 мм для контактной литографии, выполненный на хромированном стекле. На стекле расположены 9 блоков – слоев проекта со знаками совмещения для последовательного применения в процессе литографии.

Наиболее совершенной методикой для изготовления многослойных джозефсоновских структур является технология селективного травления ниобия и анодирования – SNEAP (Selective Niobium Etching and Anodization Process) [34 - 37]. На ее основе, в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ранее были разработан целый ряд технологий изготовления высококачественных многослойных схем на основе структур Nb/Al–AlO_x/Nb, Nb/Al–AlN/Nb, Nb/Al–AlN/NbN, NbN/MgO/NbN [38 - 40]. Ниже, кратко, будет описан базовый технологический маршрут приготовления сверхпроводящей схемы на основе барьера Nb/Al–AlO_x/Nb. Данному технологическому маршруту следовал автор для изготовления СВЧ - микросхем, описанных в главе 5 «Полуфлаксонный генератор».

В качестве подложки для изготовления тестовых структур обычно используются пластины из полированного высокоомного кремния размером 24×24 мм. Для защиты материала подложки в процессе формирования переходов, проводится магнетронное напыление буферного стоп - слоя Al₂O₃ толщиной порядка 100 нм (см. рисунок 2.3). Далее на подложке формируется фоторезистивная маска, определяющая геометрию базового электрода под взрывную литографию (от англ. Lift - off). Следующим этапом производится напыление многослойной структуры, определяющей структуру СИС - перехода.

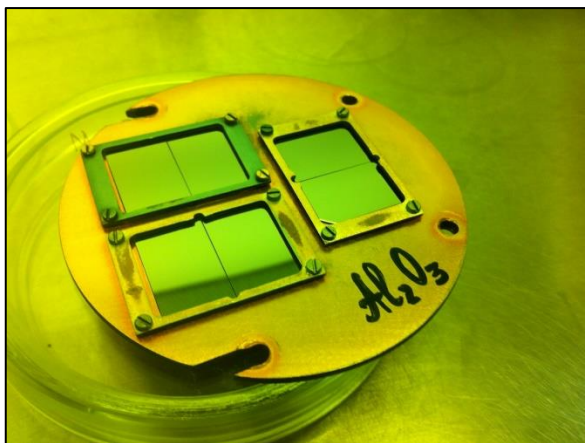


Рисунок 2.3. Фотография столика – держателя образцов с чистыми кремниевыми пластинами перед напылением буферного слоя Al_2O_3

Напыление проводится методом магнетронного распыления в едином вакуумном цикле, в сверхвысоковакуумной установке Leybold L560 с остаточным давлением в камере 10^{-6} Па. Сверхвысокий вакуум обеспечивается криогенным насосом СТИ Cryo - Torr и штатным турбомолекулярным насосом. Распыление рабочего материала на поверхность водоохлаждаемого держателя производится двумя магнетронами на постоянном токе (DC - магнетрон) и одним магнетроном на частоте 13.56 МГц (RF - магнетрон).

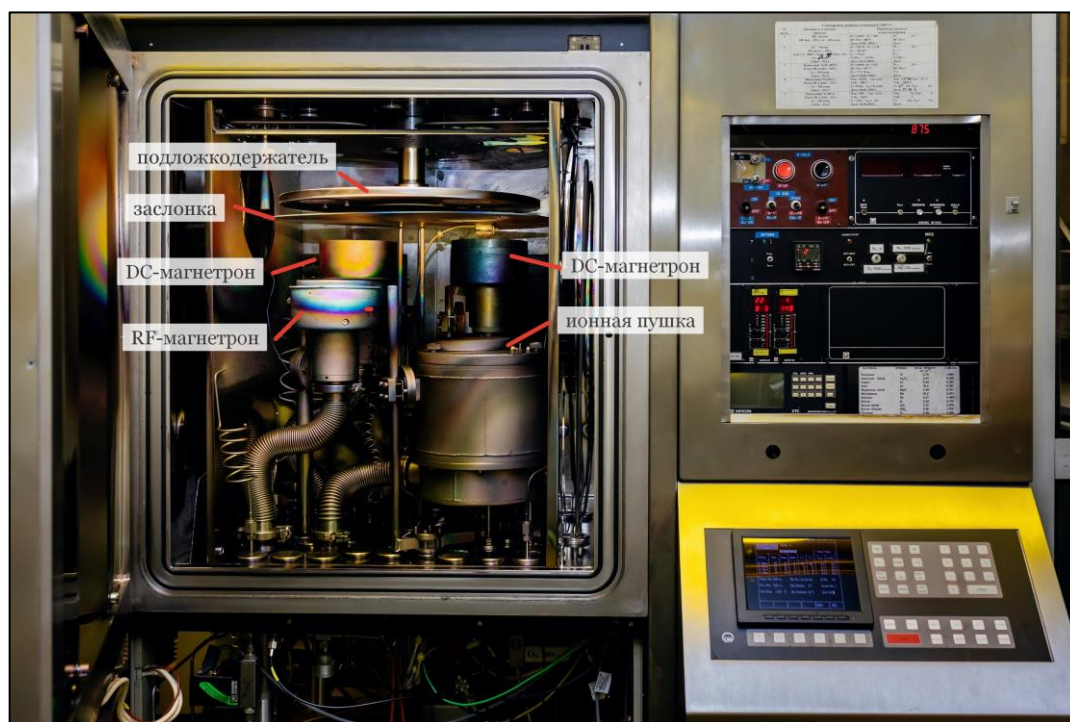


Рисунок 2.4. Фотография сверхвысоковакуумной установки Leybold L560 с открытой дверцей. На фото помечены основные внутренние элементы вакуумной камеры.

После загрузки подложек в установку и достижения рабочего давления, производится предварительная ионная очистка поверхности образцов от органических загрязнений. Далее осаждается слой ниобия (нижнего электрода) толщиной 200 нм, затем слой алюминия толщиной 7 нм для формирования туннельного барьера. Ниобий и алюминий осаждаются методом реактивного DC - распыления в среде аргона.

Как было показано ранее, см., например, [41], тонкая пленка Al (толщиной более 3 нм) равномерно покрывает поверхность ниобия. Для получения барьера из оксида алюминия, поверхность алюминия окисляется в атмосфере чистого кислорода; толщина туннельного оксида задается давлением и временем окисления. Затем осаждается слой ниобия (верхнего электрода в трехслойной структуре) толщиной 50 - 100 нм.

Для получения туннельной структуры с барьером AlN, на нижний электрод из ниобия толщиной 200 нм методом магнетронного распыления наносится тонкий слой алюминия толщиной 5 - 7 нм. Затем часть слоя алюминия нитридируется в плазме из чистого азота, причем возможно получение требуемой толщины туннельного барьера путем варьирования мощности разряда и времени нитридации [42]. Малая мощность разряда и большое расстояние от мишени до образца позволяет избежать как повреждения туннельного барьера высокоэнергетическими ионами, так и дополнительного напыления материала мишени в процессе нитридации. Как и в случае термического окисления, оставшийся тонкий слой алюминия является сверхпроводящим из-за эффекта близости с ниобием, поскольку длина когерентности в алюминии много больше толщины этого слоя. Следующей операцией производится напыление верхнего электрода из ниобия или нитрида ниобия (NbN) толщиной 150 нм.



Рисунок 2.5. Структурная модель базовой трехслойной заготовки Nb/Al–AlO_x/Nb, выращенной методом магнетронного распыления

На этом этапе процедура осаждения базовой трехслойной структуры завершается – подложка, после изъятия из вакуумной камеры, погружается в раствор диметилформамида (ДМФА) или ацетона. Процесс взрывной фотолитографии с применением ультразвука приводит к удалению фоторезистивной маски с подложки и конечному формированию геометрии нижнего электрода.

§2.2. Методы тонкопленочных технологий

2.2.1. Контактная фотолитография

Для формирования геометрии туннельных СИС-переходов применяется метод контактной фотолитографии с использованием жидких фоторезистов высокого разрешения. Наиболее часто используемыми были фоторезисты AZ[®]5214E фирмы MicroChemicals и Microposit[®]S1813 фирмы Shipley. На каждом этапе фотолитографии на подложку методом центрифугирования наносился фоторезист, конечная толщина которого варьировалась скоростью вращения. Процесс нанесения фоторезиста завершается запеканием подложки при 90 – 120 °С (выбор температуры зависит от применяемого фоторезиста и технологического процесса) в сушильном шкафу. Для получения фоторезистивной маски по форме последующего топологического слоя используется установка оптической УФ - фотолитографии и совмещения Karl Suss MA150 с разрешением 0.7 мкм, что позволяет получать переходы площадью менее 1 мкм² (рисунок 2.6).

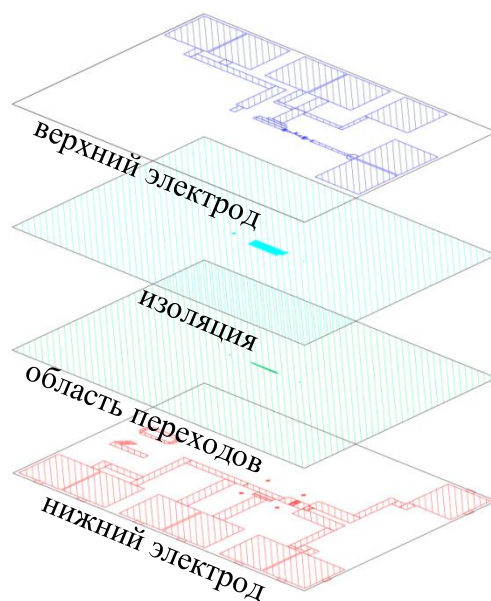


Рисунок 2.6. Фотография установки совмещения и экспонирования Karl Suss MA150 (слева). Рисунок, поясняющий последовательность основных технологических слоев для изготовления рабочих структур на примере чипа с одним слоем изоляции (справа).

Следующий по топологии рисунок на стеклянном фотошаблоне совмещается с рисунком на подложке при помощи высокоточной системы перемещения (по координатам X , Y , Θ) фотолитографа под ручным управлением оператора. Точность совмещения контролируется по специальным знакам на подложке и фотошаблоне - шкале-нониус.

2.2.2. Плазмохимическое травление

Геометрия текущего топологического слоя формируются методом плазмохимического травления на установке March Jupiter II (см. рисунок 2.7), вследствие химической реакции рабочего газа и материала травимой поверхности, что приводит к образованию летучих и легко откачиваемых соединений. Процесс плазмохимического травления происходит в вакуумной камере в среде смеси рабочих газов CF_4 и O_2 путем удаления слоя верхнего Nb рабочей структуры по маске из фоторезиста. В качестве стоп - слоя, предотвращающего дальнейшее травление структуры, выступает барьерный слой AlO_x или AlN .

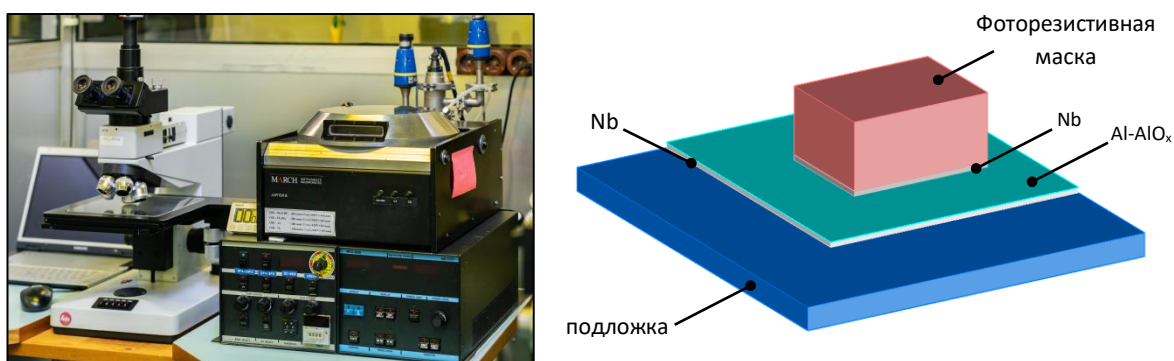


Рисунок 2.7. Фотография установки ионного/плазмохимического травления March Jupiter II (слева). Трехмерная модель слоистой структуры после процесса плазмохимического травления верхнего электрода по фоторезистивной маске.

2.2.3. Анодное окисление тонких пленок

Для изоляции торцевых областей туннельных переходов и областей перекрытия верхнего и нижнего электродов применяют процесс анодирования. Анодирование или анодное окисление – электрохимический процесс, при котором поверхность металла погруженная в электролит, окисляется под действием приложенного постоянного тока. В качестве электролита используется раствор пропиленгликоля и пентабората аммония в деионизированной воде. Процесс анодирования в используемом технологическом маршруте применяется после каждого плазмохимического травления ниобия, обеспечивая надежную изолирующую пленку окисла, в особенности, в торцах соединений Nb/Al-AlO_x. Для обеспечения контролируемого процесса анодного окисления пленок и процесса «сквозного» анодирования (применяемого в других используемых в лаборатории технологиях), автором была разработана и собрана установка, упрощенная схема которой изображена на рисунке 2.8. Установка анодного окисления состоит из электролитической ячейки, источника питания и контролирующего процесс роста анодного окисла – вольтметра. В качестве программируемого источника постоянного тока используется блок Keithley 224, а прецизионного вольтметра - блок мультиметра Keithley 196. Блоки соединены цифровой шиной GPIB с управляющим компьютером через GPIB – USB адаптер. Программное обеспечение создано в среде графического программирования LabVIEW фирмы National Instruments.

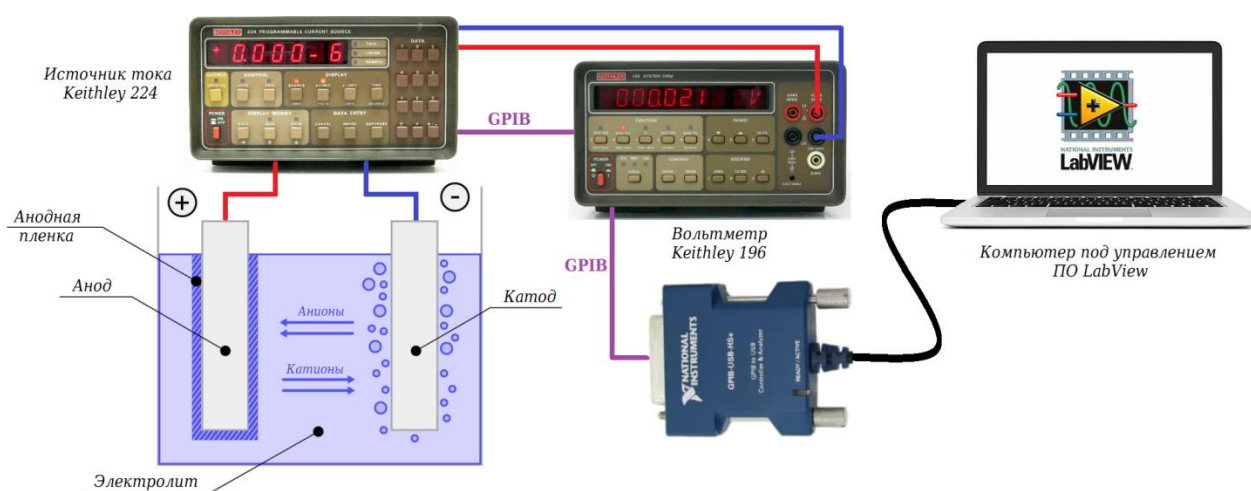


Рисунок 2.8. Схема установки анодного окисления тонких пленок

На рисунке 2.9 (слева) показана фотография установки анодного окисления тонких пленок в рабочем состоянии - в стеклянный стакан с электролитом погружены: образец с электрическим

соединением через общий электрод (анод) и металлическая пластина площадью 45 см^2 , выступающая в роли катода. Толщина выращенного окисла в таких боратных ваннах линейно зависит от приложенного напряжения и для выращенного оксида ниобия составляет $\sim 2.3 \text{ нм/V}$ (из 0.8 нм ниобия), а для оксида алюминия $\sim 1.3 \text{ нм/V}$ (из 0.9 нм алюминия) [43]. На рисунке 2.9 (справа) фотография тестового образца после процедуры анодирования – уровень на который погружалась в электролит подложка соответствует перепаду цвета из металлического серого (Al) в темно – коричневый ($\sim 100 \text{ нм AlO}_x$).

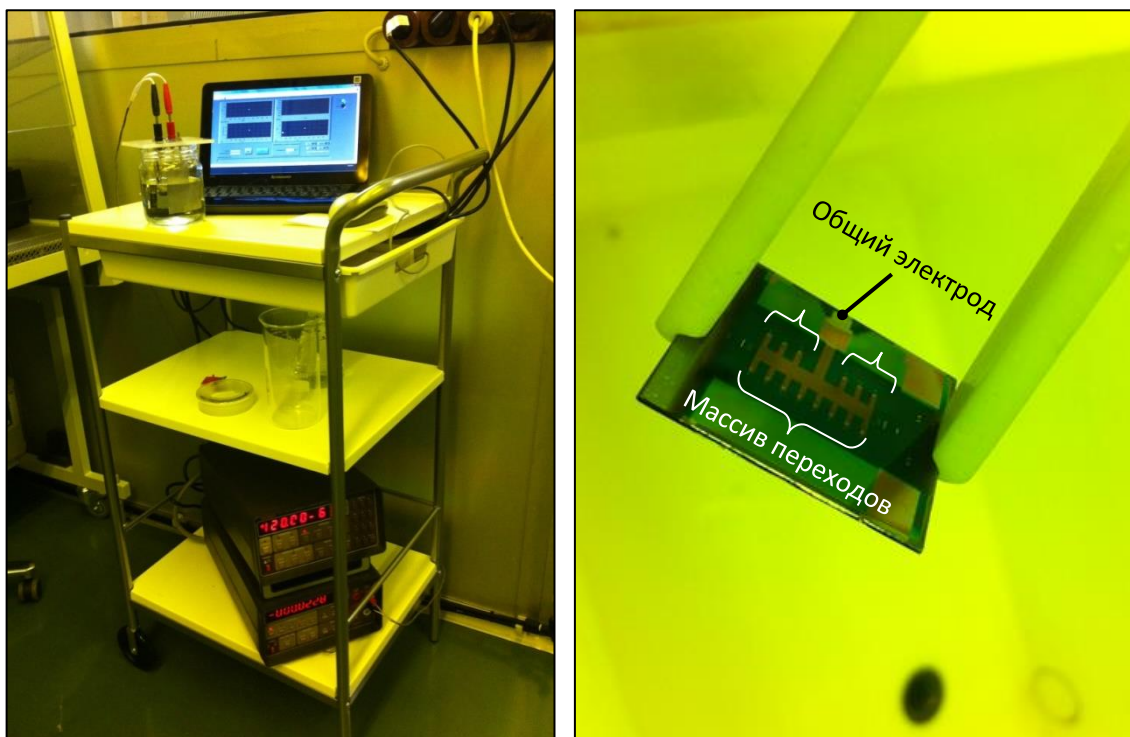


Рисунок 2.9. Фотография установки анодного окисления тонких пленок (слева). Фотография кремниевой подложки с тестовой структурой после процесса анодирования – коричневый цвет общего электрода соответствует 100 нм выращенного оксида алюминия

Для контроля и иллюстрации процесса анодирования была подготовлена трехслойная структура $\text{Nb}(200 \text{ нм})/\text{Al-AlO}_x(7 \text{ нм})/\text{Nb}(80 \text{ нм})$. Структура выращена на подложке из высокоомного кремния методом послойного магнетронного распыления без разрыва вакуума и проведено ее «сквозное» анодирование. Отметим, что данная операция является базовой для технологии SNAP - процесс селективного анодирования ниобия (на англ. **Selective Niobium Anodization Process**). На рисунке 2.10 показана зависимость изменения падения напряжения между анодом и катодом электролитической ячейки за все время процесса анодирования. Увеличение напряжения со временем очень близко к линейному закону, до тех пор, пока

процесс протекает в одном материале. На границах Nb/Al-AlO_x и Al-AlO_x/Nb происходит изменение наклона зависимости – это хорошо видно на зависимости производной напряжения от времени. По данным изменениям скорости окисления определяется момент окончания процесса анодирования.

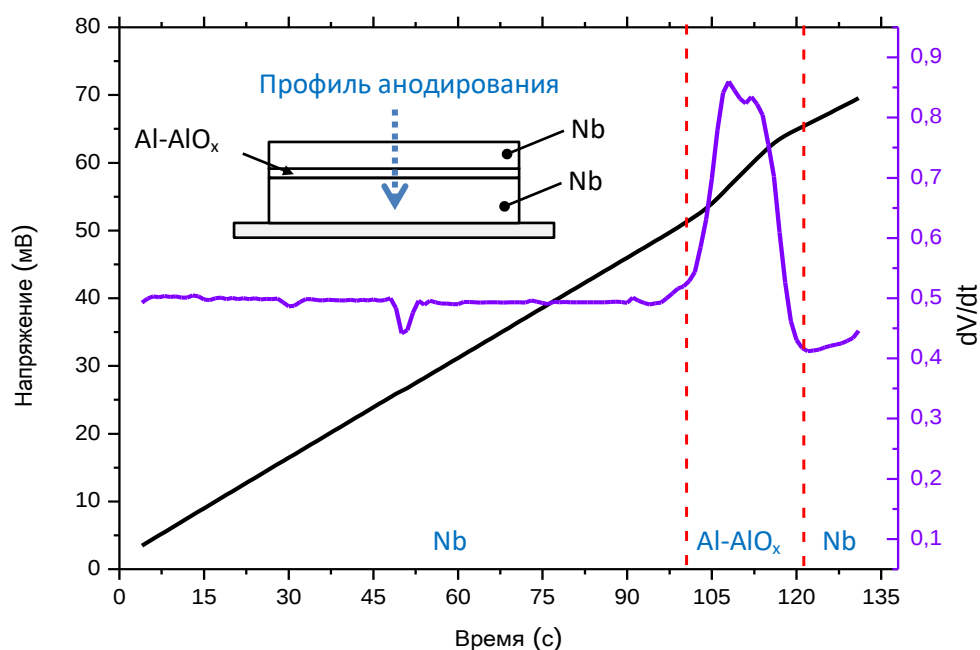


Рисунок 2.10. Графики зависимости напряжения от времени (левая ось) и производной dV/dt от времени (правая ось) на обкладках электролитической ячейки, полученный в процессе анодирования трехслойной структуры Nb/Al-AlO_x/Nb, модель которой показана на вставке сверху. Красными вертикальными штрихами ограничены примерные временные границы «перехода» к другому материалу.

На рисунке 2.11 показаны аналогичные зависимости $V(t)$ и $dV/dt(t)$ для двухслойной структуры NbTiN_x(200 нм)/Al(7 нм) также выращенной методом магнетронного распыления, но в разных вакуумных циклах для каждого слоя. Перед распылением слоя алюминия подложка с пленкой NbTiN_x несколько часов находилась вне вакуумной камеры под атмосферным давлением, вследствие чего на поверхности пленки образовался слой окисла. Также оксидная пленка образовалась на поверхности алюминия; тем самым процесс послойного анодирования состоял из четырех фаз. Эти граничные переходы хорошо видны на графике производной $dV/dt(t)$.

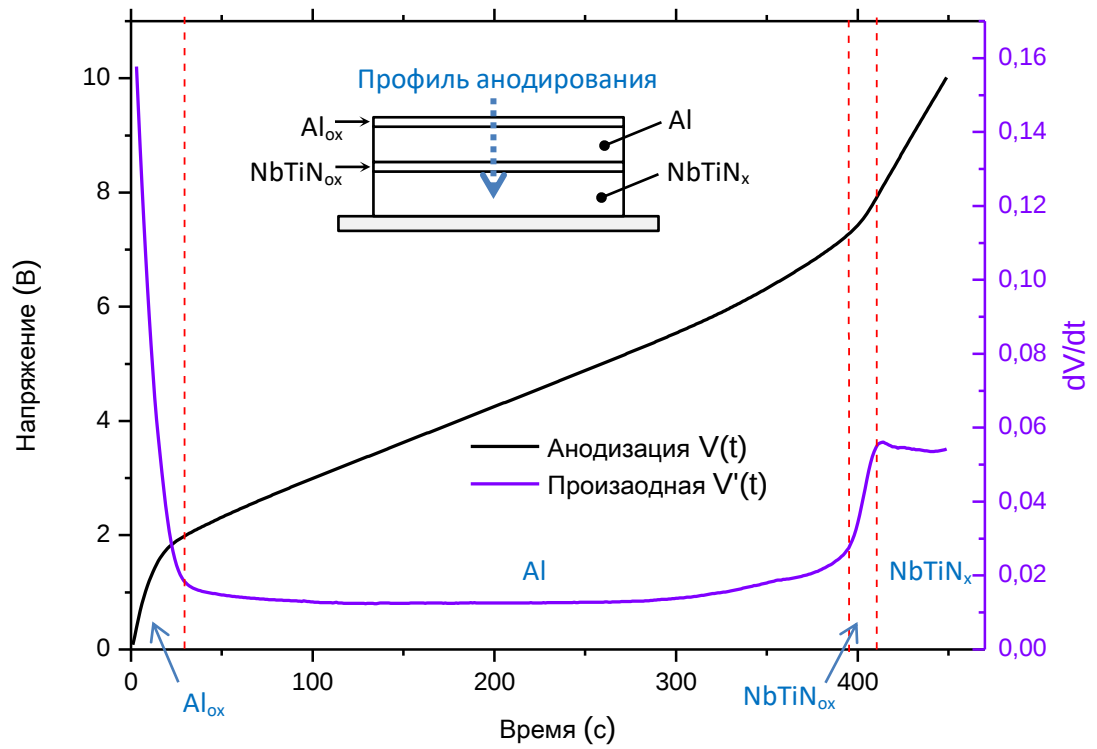


Рисунок 2.11. Графики зависимости напряжения от времени (левая ось) и производной от времени (правая ось) на обкладках электролитической ячейки, полученные в процессе анодирования двухслойной структуры $NbTiN_x/Al$, модель которой показана на вставке сверху. Красными вертикальными штрихами ограничены примерные временные границы «перехода» к другому материалу.

2.2.4. Формирования изоляционного слоя из диоксида кремния.

На подложки после процедуры анодирования, с сохраненной резистивной маской после травления, методом ВЧ - магнетронного распыления наносится изоляционный слой оксида кремния. Толщина такого слоя варьируется от 250 нм до 500 нм (для двухслойной изоляции) в зависимости от типа изготавливаемой схемы. Для тестовых схем с массивом переходов, как на правом рисунке 2.9, толщина SiO_2 около 300 нм, главная задача которой - наилучшая изоляция токонесущих шин туннельного барьера. Для СВЧ – схем данный технологический слой тоньше (порядка 250 нм) и играет двойную роль – помимо изоляции проводников, это неотъемлемая часть микрополосковых и копланарных линий связи между элементами схемы. После осаждения SiO_2 , подложки погружаются в раствор ДМФА для проведения процедуры взрывной литографии. В результате происходит вскрытие контактных областей туннельных переходов - окон в слое SiO_2 . На рисунке 2.12 показана фотография, сделанная с помощью сканирующего электронного микроскопа, области туннельного перехода после процедуры lift - off. На фотографии хорошо видна структура пленки SiO_2 , также видно, что размер кристаллитов уменьшается при приближении к краю изолятора на границе перехода.

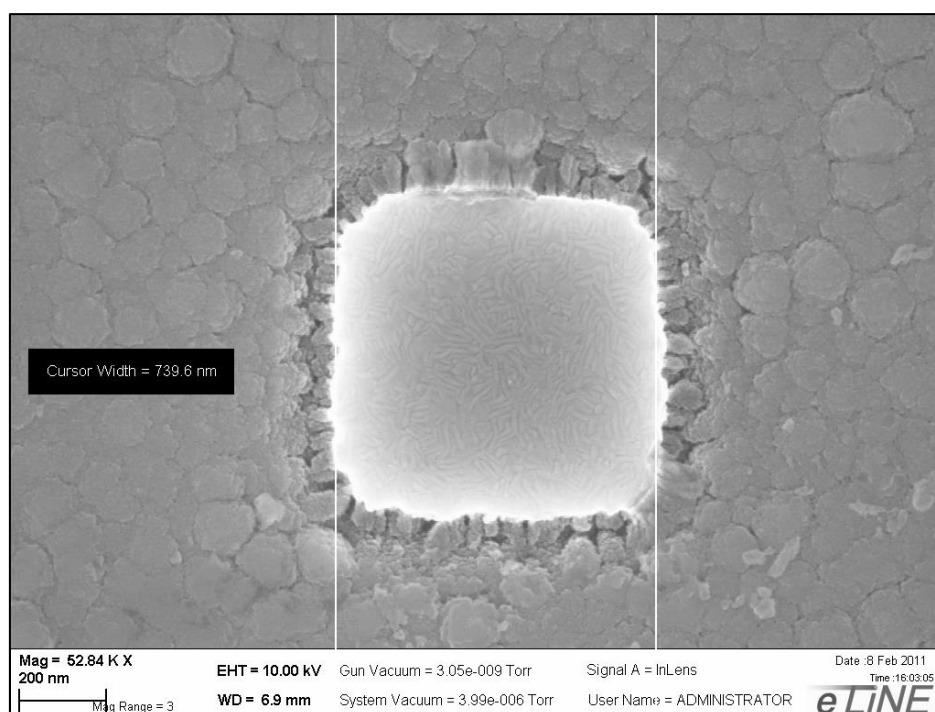


Рисунок 2.12. Фотография, полученная методом сканирующей электронной микроскопии, области вскрытого окна туннельного перехода после lift – off. Фотография использована с разрешения Фоминского М.Ю.

2.2.5. Формирование верхнего электрода и контактных площадок, разрезание

Верхний подводящий электрод формируется описанными методами фотолитографии и магнетронного осаждения. Толщина такого слоя из Nb составляет 300 - 500 нм.



Рисунок 2.13. Фотография столика – держателя образцов с двумя кремниевыми пластинами перед процедурой магнетронного распыления верхнего подводящего Nb – электрода.

Финальными операциями изготовления серии рабочих микросхем являются: формирование контактных площадок (фотолитография, магнетронное распыление, lift - off), удаление технологических перемычек (фотолитография, плазмохимическое травление) и разрезание кремниевой пластины на отдельные чипы высокоскоростной алмазной пилой.

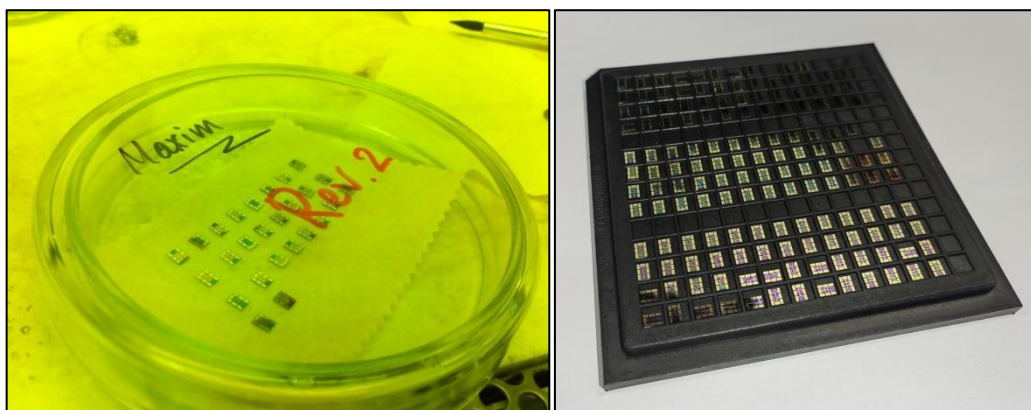


Рисунок 2.14. Фотографии изготовленных микрочипов. В чашке Петри после разрезания (слева). В антистатической ячейистой коробке (справа).

§2.3. Методики и оборудование для проведения низкотемпературного эксперимента.

Измерения по постоянному току

Для получения: транспортных, магнитолевых, фазочувствительных и температурных зависимостей по СВЧ и постоянному току автором работы использовался уникальный комплекс измерительного оборудования, разработанный сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Измерения по постоянному току для получения вольт - амперных, магнитолевых и температурных характеристик, производились при помощи прецизионной криогенной системы измерения. Данная система состоит: из зонда – вставки для гелиевого сосуда Дьюара (для измерений по постоянному току) или заливного криостата (СВЧ - измерения), криогенной головки в защитном экране, обеспечивающей электрический и термический контакт с исследуемым чипом, экранированного многожильного кабеля, соединяющего зонд с электронным блоком смещения, компьютером, оснащенный картой высокоразрешающего преобразователя АЦП/ЦАП.



Рисунок 2.15. Фотография экспериментально стенда для измерения по постоянному току. Криозонд с измеряемым образцом погружается на дно гелиевого сосуда Дьюара; к внешней стороне зонда подходят электрические кабели, соединенные с блоками смещения.

Для каждого активного элемента на сверхпроводящем чипе используется четырехпроводная (реже 5 - проводная) измерительная схема. Поскольку точки подключения системы задания смещающего тока (напряжения) располагается на значительном отдалении от измеряемого элемента, сопротивление подводящих проводников может существенно повышать сопротивление исследуемой структуры. Четырехпроводная схема обеспечивает корректное измерение падения напряжения на подключенном устройстве, так как сопротивление подводящих проводников не добавляется к сопротивлению исследуемой структуры (см. рисунок 2.16).

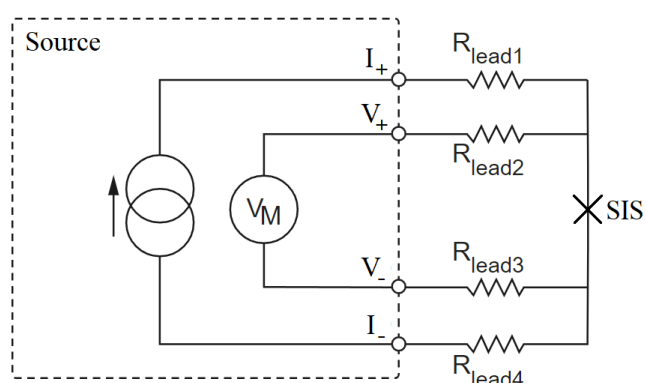


Рисунок 2.16. Схематичный рисунок подключения исследуемого образца (СИС – перехода) к источнику задания тока смещения по четырехпроводной схеме.

Для обеспечения рабочего состояния многоэлементной сверхпроводящей схемы используется комбинация приборов (источников тока и напряжения), собранных в единую коммутирующую систему, с общим стабилизированным сетевым питанием или питанием от литий ионных батарей для чувствительных к шумам экспериментов. Состав данной сборки включает в себя (см. рисунок 2.17 слева направо): источник задания и измерения напряжения СИС – смесителя (SIS Bias Supply), источник задания тока линии управления магнитным полем СИС – смесителя (SIS Control Line), источник задания тока смещения и измерения напряжения РДП – генератора (FFO Bias Supply), источник задания тока линии управления магнитным полем РДП - генератора (FFO Control Line).



Рисунок 2.17. Фотография комбинации задающих и измерительных блоков

На рисунке 2.18 показана принципиальная схема питания основных элементов и электрических соединений сверхпроводящей схемы расположенной на чипе. РДП – генератор (FFO) и СИС – смеситель (SIS) изображены как нелинейные сопротивления, разделенные гальванической развязкой по постоянному току (DC - block). Источником магнитного поля (FFO CL) конструктивно выступает участок нижнего электрода РДП – генератора. Желтыми стрелками указаны точки подключения измерительных приборов к контактным площадкам кремниевого чипа по четырехпроводной схеме.

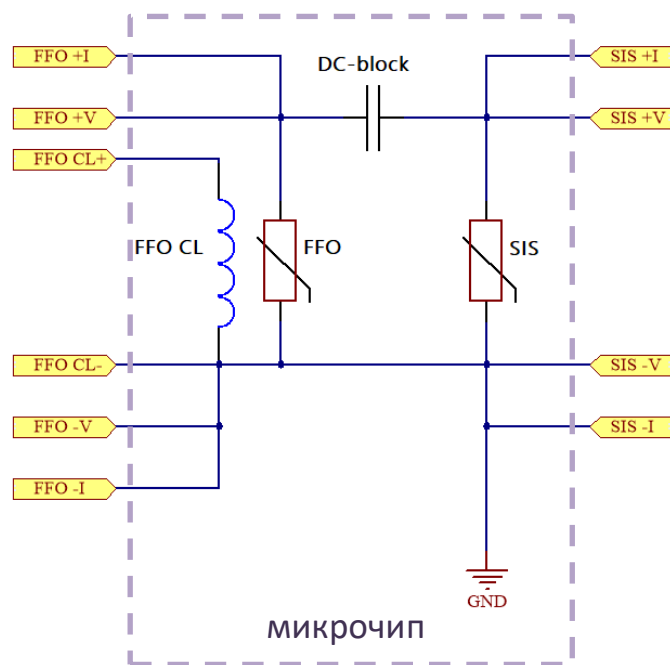


Рисунок 2.18. Принципиальная схема электрических соединений основных элементов сверхпроводящего чипа

Электрический контакт между измерительными линиями блоков смещения и контактными площадками кремниевого чипа осуществляется с помощью специально разработанной криоголовки, изображенной на рисунке 2.19. В рабочем состоянии она поддерживает надежный электрический пружинный контакт при температуре жидкого гелия благодаря пластичным свойствам материала из которого изготавливаются прижимные иглы. Криоголовка в защитном ниобиевом экране опускается на дно гелиевого сосуда Дьюара при помощи специального зонда вставки. Внутренние проводники зонда изготавливаются из специального материала с низкой теплопроводностью для минимизации передачи тепла к кремниевому чипу.

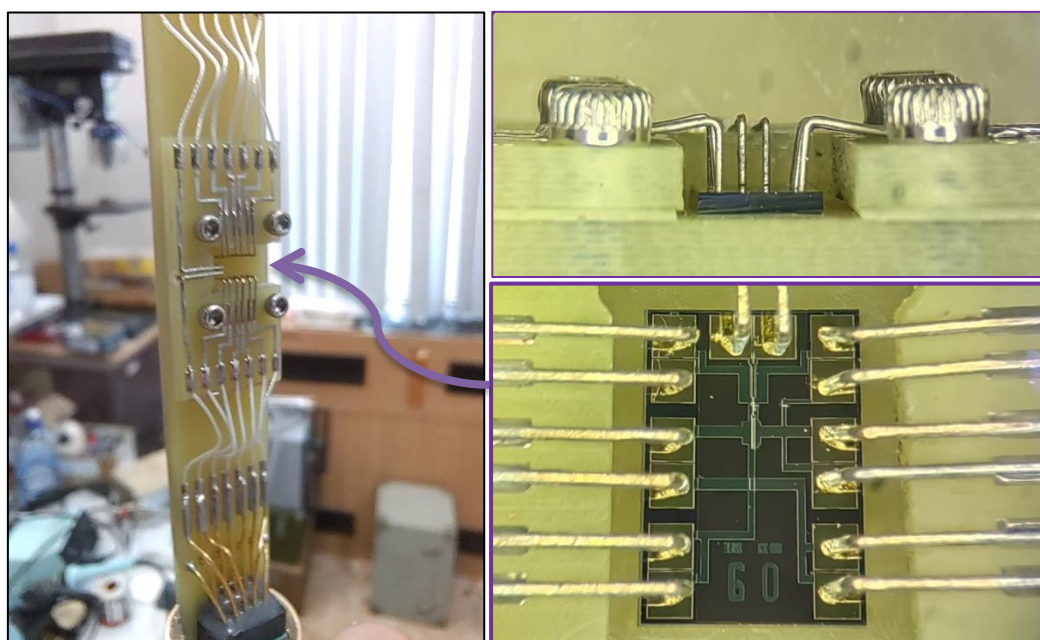


Рисунок 2.19. Фотографии криогенной головки без защитного экрана для осуществления электрического соединения с кремниевым чипом методом пружинного игольчатого контакта (слева) Фотографии загруженного микрочипа вид сверху и сбоку, полученные при помощи оптического микроскопа (справа).

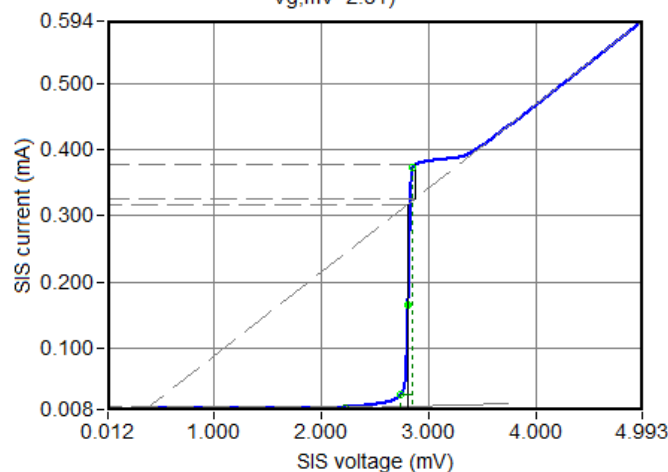
Управление задающими/измерительными приборами осуществляется при помощи программного комплекса IRTECON (**I**ntegrated **R**eciever **T**est and **C**ontrol) под управлением ОС Windows, разработанного сотрудником ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН с.н.с. Ермаковым А.Б. [44]. Программа предоставляет пользователю доступ к виртуальным задающим и измерительным каналам, которые соответствуют линиям аналоговых блоков смещения (рисунок 2.17). Задание развертки по току и напряжению на данных блоках обеспечивается посредством установленной в компьютер 16 – битной платы ЦАП, измерение напряжения, соответственно, производится 16 – битной картой АЦП. В визуальной программной среде

также реализована одновременная поддержка множества современных измерительных и генерирующих приборов, соединенных по общим цифровым шинам (в том числе GPIB), последовательным портам RS232 и USB. Измерительный комплекс имеет частоту дискретизации до 1000 точек в секунду по каждому каналу, используя внутренний буфер АЦП - карты. Это обеспечивает высокую скорость измерений и даже позволяет применять потоковое дискретное преобразование Фурье для анализа спектра низкочастотных шумов и наводок в цепях питания. Любые каналы, задаваемые и измеряемые, могут быть источником массива данных для автоматического построения экспериментальных графиков (вплоть до трехмерных); организация логических условий, циклов, задание дополнительных параметров между графиками позволяют проводить сложные многопоточные измерения. Также встроенными средствами реализована математическая обработка полученных данных. Так, например, на рисунке 2.20 показана измеренная ВАХ туннельного СИС – перехода, где в качестве задаваемого параметра использовался канал SIS Voltage блока SIS Bias Supply (ось X), а в качестве измеряемого – канал SIS Current того же блока (ось Y). Встроенными средствами первичной обработки, система производит расчет параметров ВАХ туннельного СИС – перехода.

DAQ System IRTECON SE, ver. 2.415 (IREE(UG)-IR & HM (default).ini)

Read: U:_Exp_Data\Dip_Stick\SIS_TEST\Lyudmila\LT_16.03#13\LT_16.03#13_j08#01.grd

(LT_16.03#13_j08#01,30-Mar-2016) (Rn=7.93 Rj/Rn=26.1
Vg,mV=2.81)



Sample = LT_16.03#13_j08#01 Points = 283

Area,one[sq.um] = 14.60	Q-ty in array = 1
Cs[fF/sq.um] = 65.00	Type of array = serial
Rn,arr [Ohm] = 7.93	Rn,one [Ohm] = 7.9
Rj [Ohm] = 206.7	RnA = 115.7
R2 [Ohm] = 206.7	Rj/Rn = 26.08
Ig [uA] = 304	Vm=R2Ic [mV] = 1.71
Ic [uA] = 8	R2[.7Ig] [mV] = 43.94
Ik [uA] = 51	Vo=RnIc [mV] = 0.07
Vg [mV] = 2.81	Ic/Ig = 0.03
dVg [mV] = 0.113	Ik/Ig = 0.17
DVg [mV] = 0.626	Jg [A/sq.cm] = 2080
Fres [GHz] = 0.0	Jc [A/sq.cm] = 57
R serial = 0.0	R parallel = 1.0e+09

Рисунок 2.20. Отчет системы IRTECON с выводом основных параметров об измеренной ВАХ СИС – перехода структуры Nb/Al – AlO_x/Nb в режиме задания напряжения (критический ток перехода подавлен): сопротивление перехода в нормальном состоянии R_n составило примерно 8Ω , параметр качества $R_j/R_n = 26.1$, напряжение появления целевой особенности V_g составило 2.8 мВ и другие параметры.

§2.4. Криоголовка для измерений двухсторонних кремниевых микрочипов

Для реализации научного проекта исследования генерации и приема неравновесных квазичастиц (фононов) джозефсоновским туннельным переходом (исследовалось баллистическое прохождение квазичастицы через кремниевую подложку) была разработана и апробирована технология изготовления джозефсоновских переходов $\text{Nb}/\text{Al}-\text{AlO}_x/\text{Nb}$ на противоположных сторонах кремниевого чипа размером 3×4.2 мм методами тонкоплёночных технологий. Низкотемпературные измерения подобных микрочипов предусматривают одновременное электрическое соединение обеих сторон чипа с соответствующими блоками смещения. В связи с этим, автором была разработана двухсторонняя измерительная головка для криогенного зонда - вставки в сосуд Дьюара, одновременно поддерживающая 32 электрических контакта между измерительной системой и исследуемым чипом (см. рисунок 2.21). Данная головка обеспечивает комбинированный тип электрического контакта с кремниевым чипом: методом перевернутого кристалла “flip chip” (тыльная сторона чипа), который является одним из промышленных стандартов корпусирования интегральных схем и методом пружинного игольчатого контакта (лицевая сторона чипа). Особенность используемой измерительной головки заключается в обеспечении надежного электрического контакта при низких (гелиевых) температурах (4.2 К). Это достигается использованием в качестве материала нижней и верхней контактных групп фосфористой меди, которая сохраняет пластичные свойства при криогенных температурах. Контактная плата (деталь 3) изготавливалась методом селективного травления по фоторезистивной маске на стеклотекстолитовой плате FR-4 толщиной 0.5 мм., покрытой слоем фосфористой меди толщиной 80 мкм. с последующим осаждением гальванического золота толщиной 5 мкм. Для точной установки кремниевого чипа на контактные площадки измерительной головки применяется специальная рамка - спейсер (деталь 2), окно которой выполнено с допуском 50 мкм, и имеет соответствующую чипу толщину. Верхняя прижимная пластина (деталь 6) обеспечивает равномерное давление на всю площадь чипа. Игольчатая контактная группа расположена на стеклотекстолитовой плате (деталь 1) совмещена с верхней частью сборного 32 – контактного разъема – при монтаже чипа вынимается из пазов основания (деталь 5). Измерительная головка имеет винтовое крепление и представляет целостную жесткую конструкцию после загрузки кремниевого чипа. Схемы разводок контактных плат головки представлены на рисунках 2.22 и 2.23. Также для данной измерительной головки был модернизирован криогенный зонд (см. рисунок 2.24), в частности был собран новый блок коммутации для измерения двухсторонних кремниевых микрочипов.

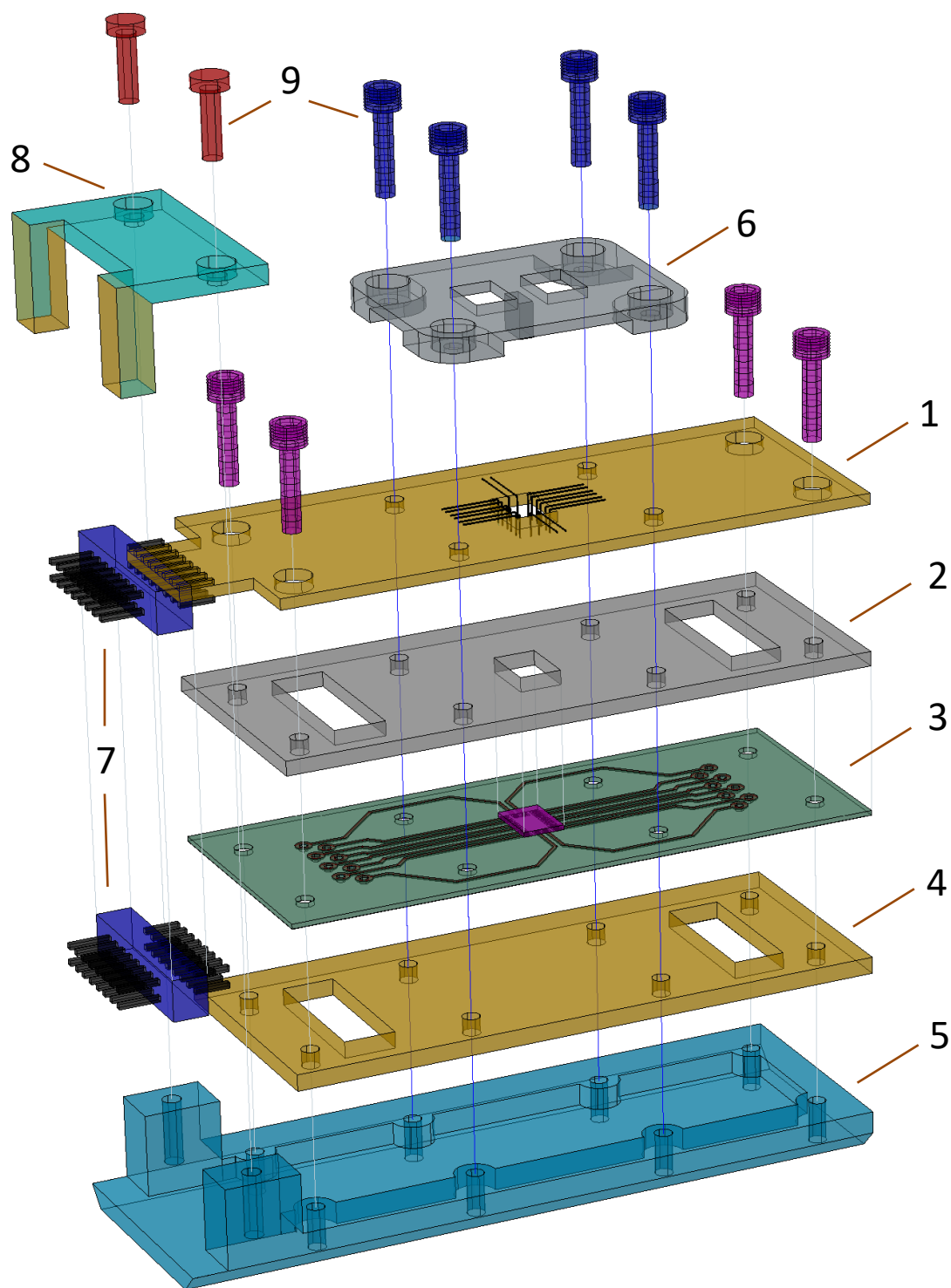


Рисунок 2.21. Трехмерная модель головки криогенного зонда - вставки для измерения двухсторонних образцов. На рисунке цифрами обозначены: 1 – плата с верхней контактной группой (игольчатый прижимной механизм); 2 - вставка центрующая образец; 3 – плата с нижней контактной группой; 4 - крышка основания; 5 - основание с каналом для проводников; 6 – крышка, обеспечивающая прижим образца к нижней контактной группе; 7 – 32 - контактный комбинированный разъём; 8 – фиксатор комбинированного разъема; 9 – крепежные винты.

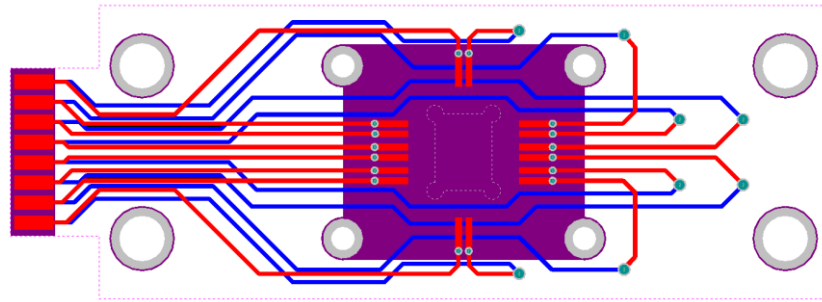


Рисунок 2.22. Двухслойная схема разводки платы с верхней контактной группой (игольчатый контакт) выполненная в среде САПР Altium Designer

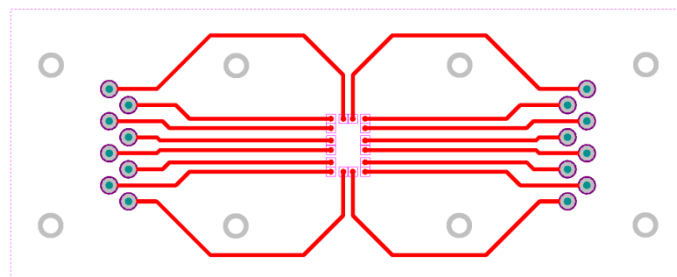


Рисунок 2.23. Схема разводки платы с нижней контактной группой (прижимной контакт) выполненная в среде САПР Altium Designer

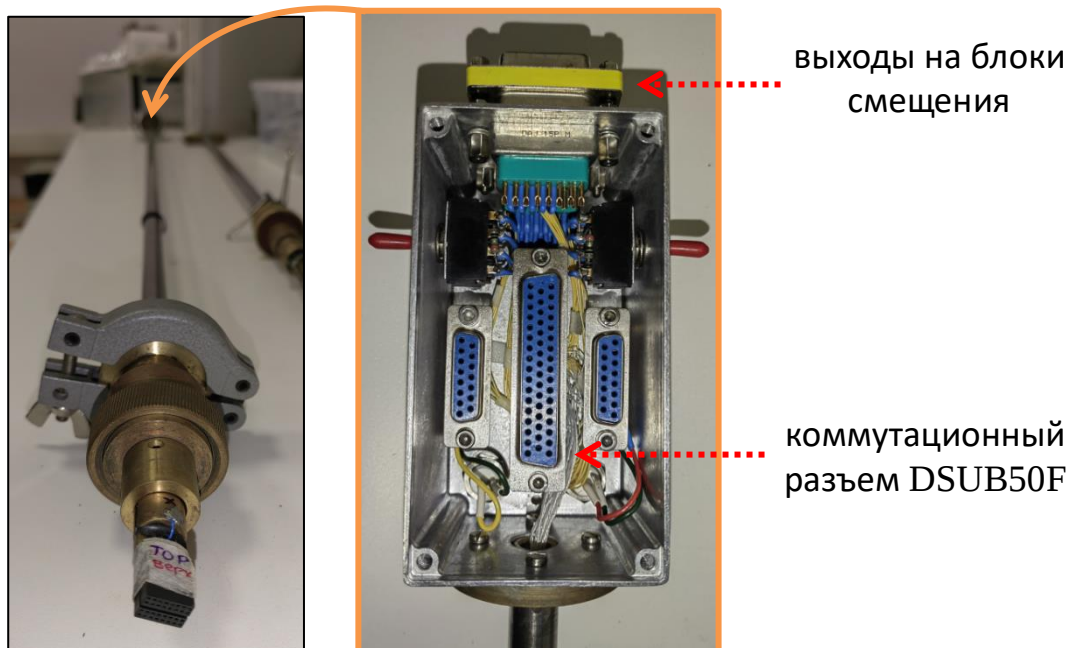
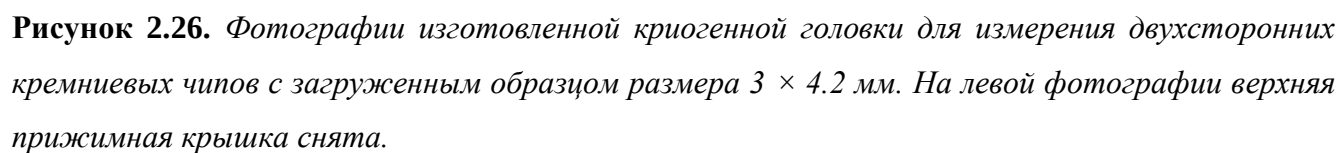
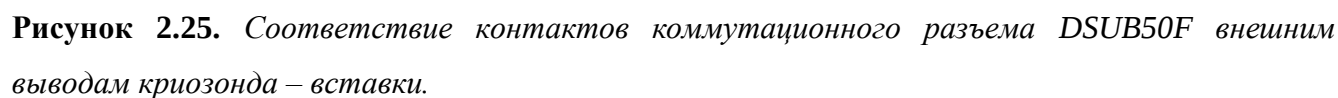


Рисунок 2.24. Фотография модернизированного кризонда – вставки в сосуд Дьюара для проведения измерений двухсторонних кремниевых чипов (слева). На фотографии справа показан блок коммутации со снятой крышкой.



Для проверки работы измерительной головки были проведены измерения ВАХ туннельных СИС – переходов расположенных с обеих сторон кремниевой подложки в едином цикле охлаждения. Результаты измерения, представленные на рисунке 2.27, показывают применимость данного технического решения для качественных измерений двухсторонних кремниевых чипов. Также, туннельные переходы, изготовленные на обеих стороны подложки, имеют высокое качество изготовления и низкие токи утечки, что подтверждается значением параметра $R_j/R_n > 30$. Таким образом, получено экспериментальное подтверждение возможности изготовления джозефсоновских контактов (генераторов или детекторов) на обеих сторонах кремниевой подложки и их измерений при температуре жидкого гелия.

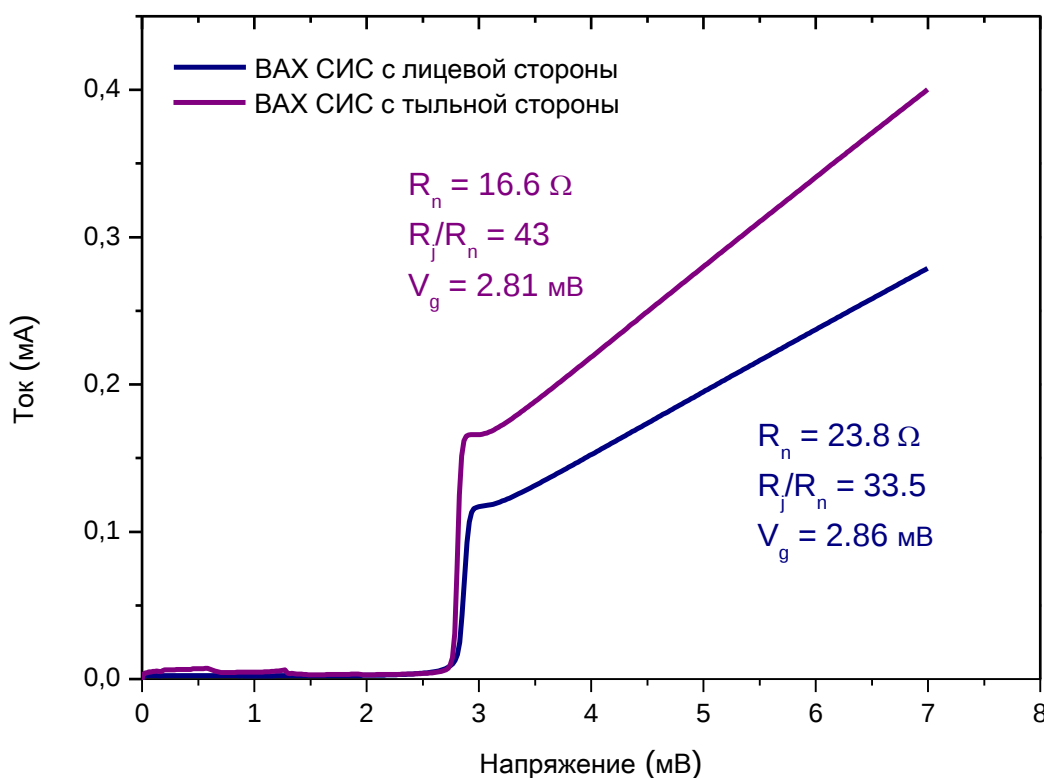


Рисунок 2.27. Графики ВАХ двух туннельных СИС – переходов структурой Nb/Al – AlO_x/Nb, каждый из которых изготавливался на одной из сторон кремниевого чипа.

§2.5. СВЧ – измерения. Схема гармонического СИС – смесителя. Измерительная аппаратура

Для проведения спектральных измерений используется специальная СВЧ - схема преобразователя частоты включающая в себя схему гармонического СИС – смесителя, расположенную на кремниевом чипе, опорный синтезатор частот, петлю обратной связи частотной и фазовой стабилизации сигнала гетеродина (см. рисунок 2.28). В ее основе лежит СВЧ - схема гармонического СИС - смесителя, успешно применяемая в сверхпроводящем интегральном приемнике (СИП), разработанном в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

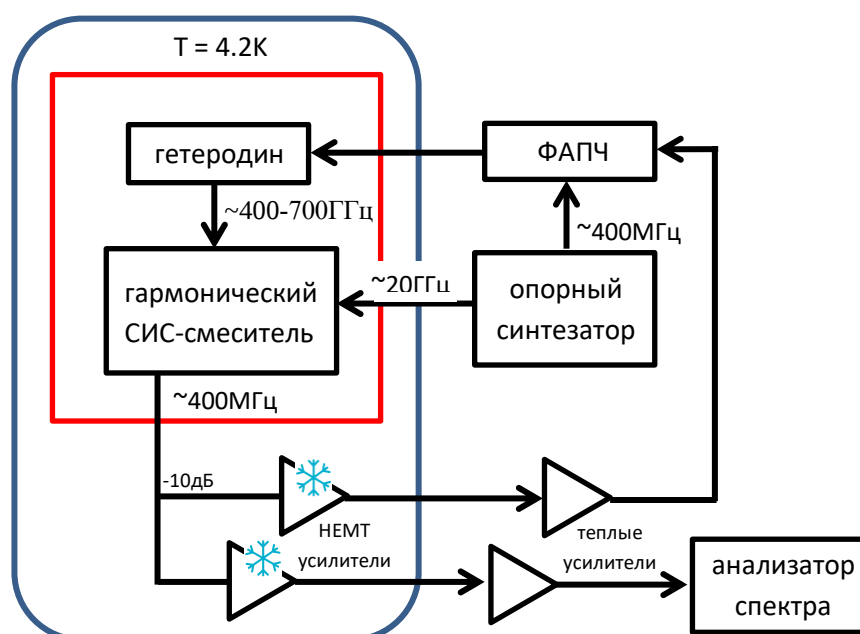


Рисунок 2.28. Схема установки для СВЧ - измерений характеристик различных модификаций РДП – генератора гетеродина, включенного в схему СИС – смесителя. Красным прямоугольником ограничены элементы, расположенные на сверхпроводящем кремниевом чипе; синим – элементы помещенные в гелиевый криостат при температуре 4.2K

Подробнее остановимся на описании схемы гармонического СИС – смесителя выполненной на кремниевой пластине (область, ограниченная красным квадратом на рисунке 2.28). Важнейшим условием для работы такой схемы является обеспечение хорошей передачи сигнала между ее элементами в выбранном диапазоне частот. Это обеспечивается специально

разработанной интегральной согласующей структурой, каждый элемент, которой рассчитывается для заранее определенной полосы частот с оптимизированным (для проводимых измерений) набором параметров – геометрических размеров. Блок - схема согласующего СВЧ - тракта между гармоническим СИС - смесителем и сверхпроводящим генератором гетеродина показана на рисунке 2.29. Высокочастотный сигнал генератора проходит через ряд согласующих структур, в том числе разрыв по постоянному току, и поступает на гармонический СИС - смеситель, на котором он перемножается с одной из гармоник сигнала опорного синтезатора. В результате на выходе смесителя регистрируется преобразованный вниз по частоте сигнал исследуемого генератора.

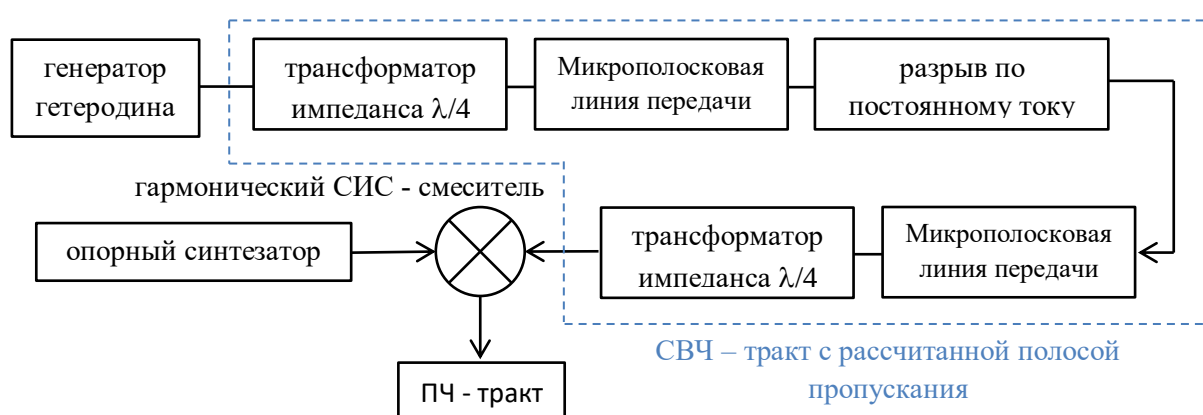
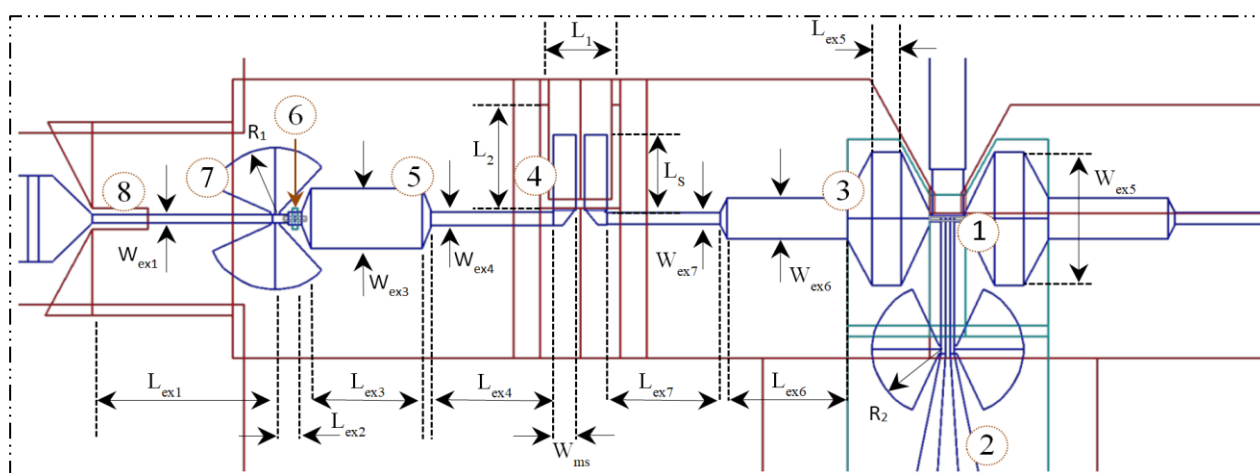


Рисунок 2.29 Блок – схема согласующего СВЧ - тракта между гармоническим СИС - смесителем и сверхпроводящим генератором гетеродина.

Для примера, приводится рассчитанная типичная схема линии связи между РДП - генератором с дополнительными инжекторами для управления фазой и смесителем (из главы 5 «Полуфлаксоновый генератор» данной работы). Данная схема имеет полосу пропускания 80 ГГц в диапазоне 120 – 200 ГГц. Фрагмент проекта фотошаблона тестовой микросхемы с обозначениями элементов и их размеров представлен на рисунке 2.30.

Микросхема содержит в себе два ключевых устройства: генератор с инжекторами на основе РДП размером 16×2 мкм. (на рисунке 2.30 элемент отмечен цифрой 1), и гармонический СИС – смеситель - туннельный переход площадью около 1 мкм^2 (на рисунке 2.30 элемент отмечен цифрой 6) соединенные между собой микрополосковой линией передачи. Для независимого задания токов питания и измерений, между элементами реализована развязка по постоянному току (англ. DC - block). Это участок микрополосковой линии с разрывом в верхнем электроде, который можно считать свернутой щелевой антенной - свернутый микрополосок с разрывом, смещенным на четверть длины волны, что соответствует закоротке на землю по ВЧ (на рисунке 2.30 элемент отмечен цифрой 4). Отметим, что при относительно

простой конфигурации развязки по постоянному току, данное устройство обладает импедансом близким к 50Ω на частотах $\sim 100 - 500$ ГГц и является достаточно широкополосным. Для его хорошего согласования с генератором ($0.4 - 1.5 \Omega$) и смесителем ($14 - 60 \Omega$) используются четвертьволновые трансформаторы импеданса - трехсекционные элементы из уширенных участков микрополосковой линии (на рисунке 2.30 элементы отмечены цифрами 3 и 5). Такие согласующие трансформаторы расположены с обеих сторон генератора для минимизации внутренних отражений. Гармонический СИС – смеситель, в силу своей конструкции, обладает достаточно большой емкостью, поэтому необходима его отстройка включением в цепь



L_{ex1}	=	$82\mu\text{m}$	W_{ex1}	=	$4\mu\text{m}$	L_{ex2}	=	$9\mu\text{m}$
R_1	=	$31\mu\text{m}$	L_{ex3}	=	$50\mu\text{m}$	W_{ex3}	=	$28\mu\text{m}$
L_{ex4}	=	$55\mu\text{m}$	W_{ex4}	=	$6.4\mu\text{m}$	W_{ms}	=	$10\mu\text{m}$
L_s	=	$36\mu\text{m}$	L_1	=	$32\mu\text{m}$	L_2	=	$48\mu\text{m}$
L_{ex5}	=	$13\mu\text{m}$	W_{ex5}	=	$62\mu\text{m}$	R_2	=	$31\mu\text{m}$
L_{ex6}	=	$54\mu\text{m}$	W_{ex6}	=	$19\mu\text{m}$			
L_{ex7}	=	$51\mu\text{m}$	W_{ex7}	=	$5.4\mu\text{m}$			

Рисунок 2.30 Фрагмент проекта фотошаблона сверхпроводящей СВЧ-схемы преобразователя частоты для проведения экспериментов с полуфлаксоным генератором гетеродина с обозначением элементов и их геометрических размеров.

индуктивности. Если не сделать этого, гармонический СИС – смеситель будет шунтироваться на ВЧ своей собственной емкостью. В роли индуктивности выступает участок микрополосковой линии длиной $5 - 7$ мкм ($\ll \lambda/4$), вблизи СИС, индуктивность которого компенсирует емкость перехода. Отстроечная индуктивность включается в СВЧ – цепь вместе с

дополнительной ёмкостью – микроволновым радиальным замыкателем (англ. Radial stub). Радиальный замыкатель – устройство в котором реализуются микрополосковые линии различной длины, вследствие чего, он способен работать как закортка на землю по ВЧ в широкой полосе частот позволяя протеканию ВЧ - тока через отстроечную индуктивность (на рисунке 2.30 элемент отмечен цифрой 7). В результате введения в схему вспомогательных элементов для гармонического СИС – смесителя, импеданс последнего на ВЧ становится очень низким $\sim 1 \Omega$. Для согласования смесителя с высокоомной развязкой по постоянному току используется двухсекционный трансформатор импеданса. На проекте микросхемы (рисунок 2.30) также можно увидеть радиальные замыкатели расположенные на инжекторных линиях (на рисунке 2.30 элемент отмечен цифрой 2) для препятствия ухода мощности через центр РДП. Трансформатор импеданса, расположенный справа от генератора на рисунке 2.30 оканчивается открытой микрополосковой линией и используется для уменьшения отражения СВЧ сигнала от неиспользуемого края. Тракт промежуточной частоты на кремниевой пластине представляет из себя копланарную линию передачи с 50Ω волновым сопротивлением. Она соединяет контактные площадки микрочипа и гармонический СИС – смеситель через копланарно – микрополосковый переход (на рисунке 2.30 элемент отмечен цифрой 8). Эта же линия используется для подачи СВЧ - сигнала от опорного синтезатора.

Описанная измерительная схема является очень чувствительной к шумам по питанию и внешним наводкам, поэтому она реализована в охлаждаемом заливном криостате, оснащённом защитным экраном из криопермаллоя, фильтрами по питающим линиям, СВЧ – вводами и выводами. Внутреннее устройство используемого криостата фирмы Infrared Laboratory показано на рисунке 2.31.

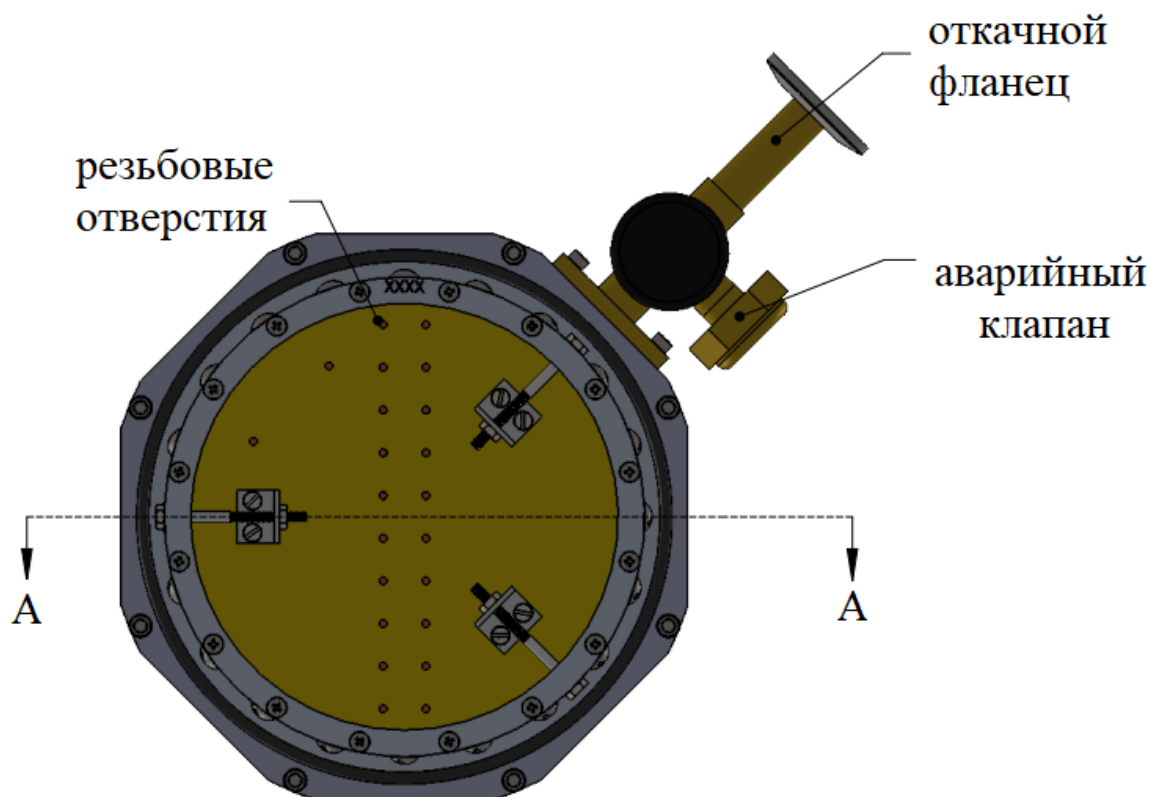
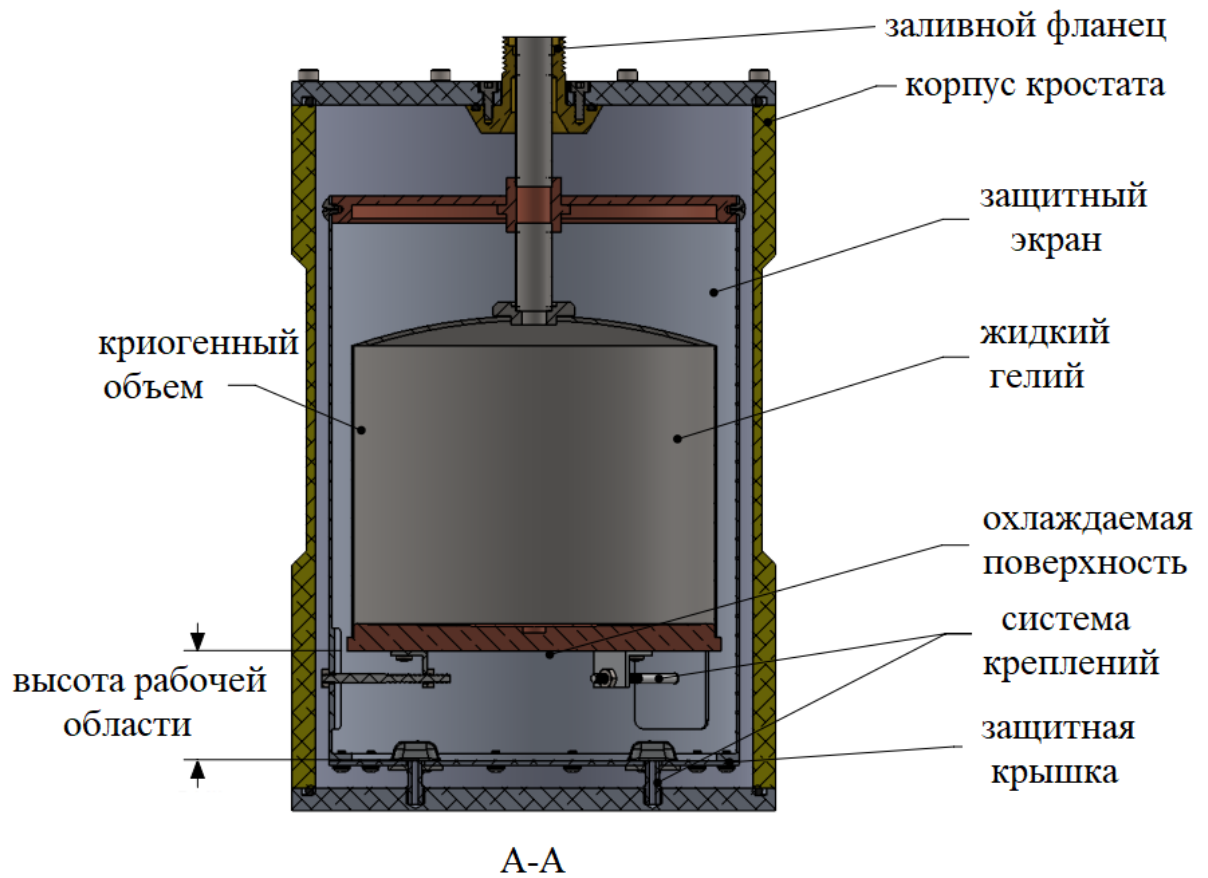


Рисунок 2.31. Устройство заливного гелиевого криостата фирмы Infrared laboratories

Монтаж элементов СВЧ – схемы (см. рисунок 2.32), включающих в себя: криогенный смесительный модуль с кремниевым чипом (отдельно показан на рисунке 2.33), направленный ответвитель для отвода части сигнала на ПЧ в петлю обратной связи стабилизации гетеродина и подачи сигнала от лабораторного синтезатора частот, криогенные НЕМТ – усилители, модуль фильтрующий линии питания, производится на охлаждаемую поверхность криостата. Рабочая зона имеет тепловой контакт с криогенным объемом заполняемым жидким гелием.

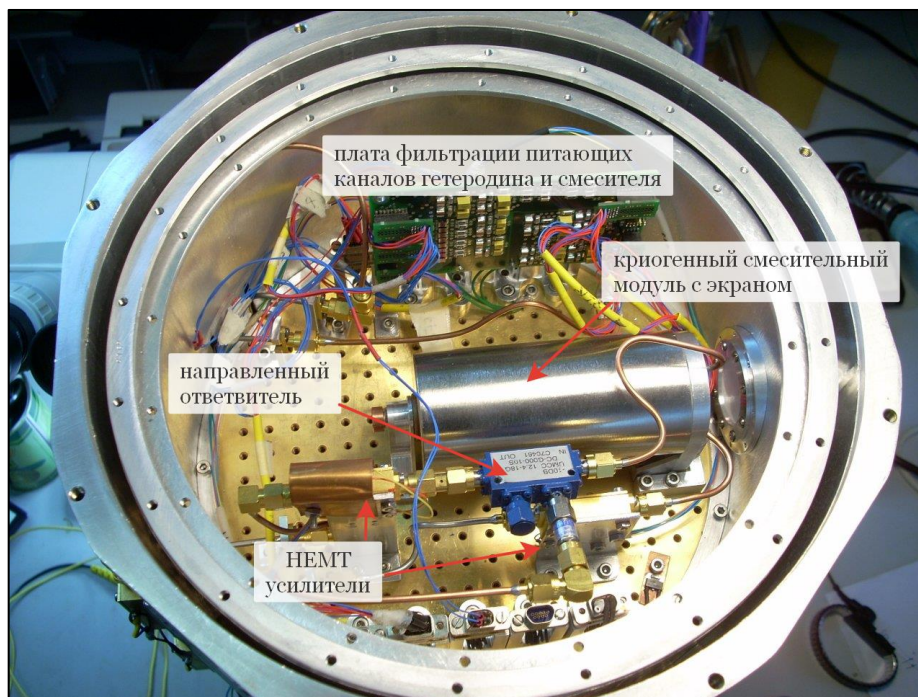


Рисунок 2.32. Фотография внутреннего оснащения гелиевого криостата для спектральных измерений на этапе монтажа смесительного модуля

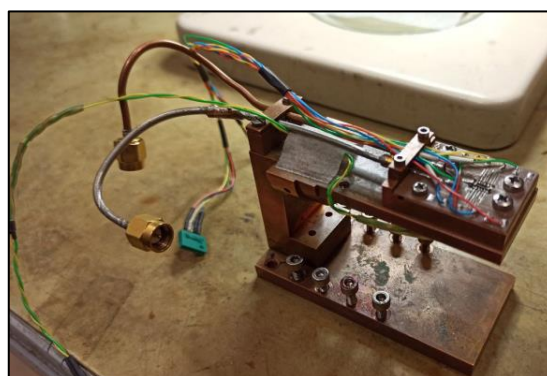


Рисунок 2.33. Криогенный смесительный модуль на этапе монтажа кремниевого чипа.

Криогенный смесительный модуль оснащен коаксиальными выводами, которые служат для ввода сигнала от лабораторного синтезатора частот, вывода преобразованного сигнала со смесителя на ПЧ и ввода сигнала обратной связи в генератор гетеродина. Сигнал на ПЧ подается на криогенный НЕМТ – усилитель и снаружи криостата через теплый (работающий при комнатной температуре) усилитель поступает на вход модуля ФАПЧ. Часть сигнала (внутри модуля ФАПЧ) ответвляется и поступает на вход спектроанализатора (см. рисунок 2.34).

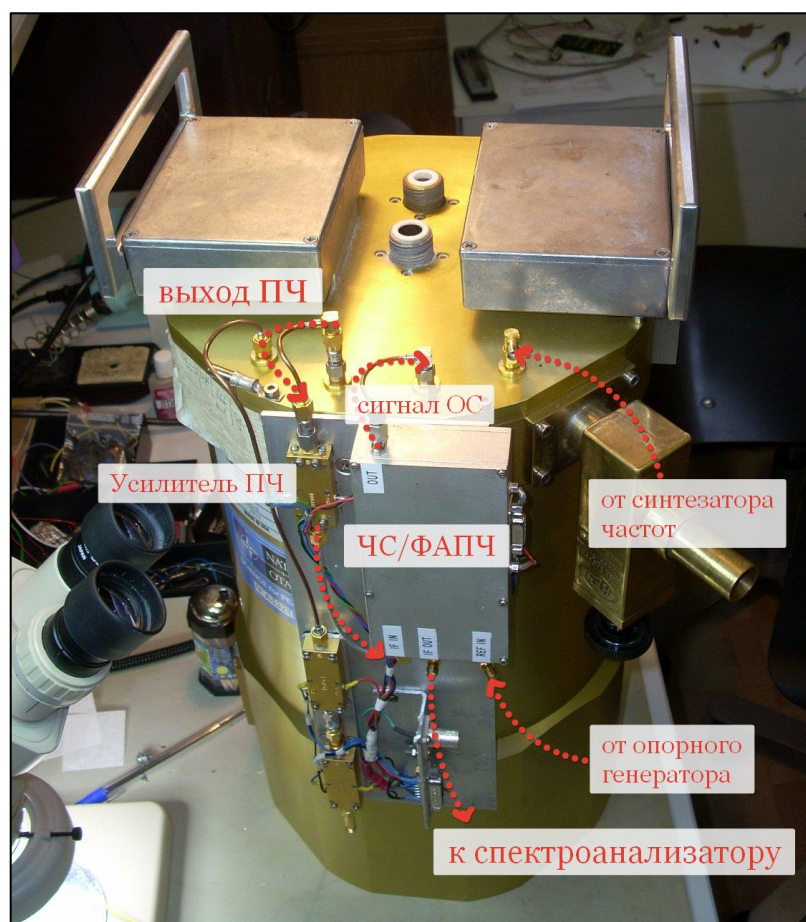


Рисунок 2.34. Фотография охлажденного криостата с видом на внешние приборы

Для частотной и фазовой стабилизации РДП - генератора при анализе его спектральных свойств использовался специальный модуль, разработанный в Институте физики микроструктур РАН в Нижнем Новгороде. Данный модуль включает системы частотной стабилизации и фазовой автоподстройки частоты с настраиваемым коэффициентом усиления и полосой 15 МГц. Он оснащён логическим интерфейсом управления и позволяет изучать как автономную ширину линии генерации без внешних воздействий (с использованием ЧС), так и

спектральное качество РДП - генератора при фазовой стабилизации относительно опорного генератора. Общая схема модуля ФАПЧ с петлей обратной связи для фазовой и частотной синхронизации сигнала СГГ с опорным сигналом от синтезатора частоты представлена на рисунке 2.35. С выхода гармонического СИС - смесителя, сигнал на промежуточной частоте (100 - 700 МГц) поступает на вход модуля ФАПЧ и ЧС. Также на модуль поступает опорный сигнал от синтезатора частотой 400 МГц. Выходной сигнал модуля через нагрузочное 50 Ω сопротивление подключается к линии задания магнитного поля СГГ.

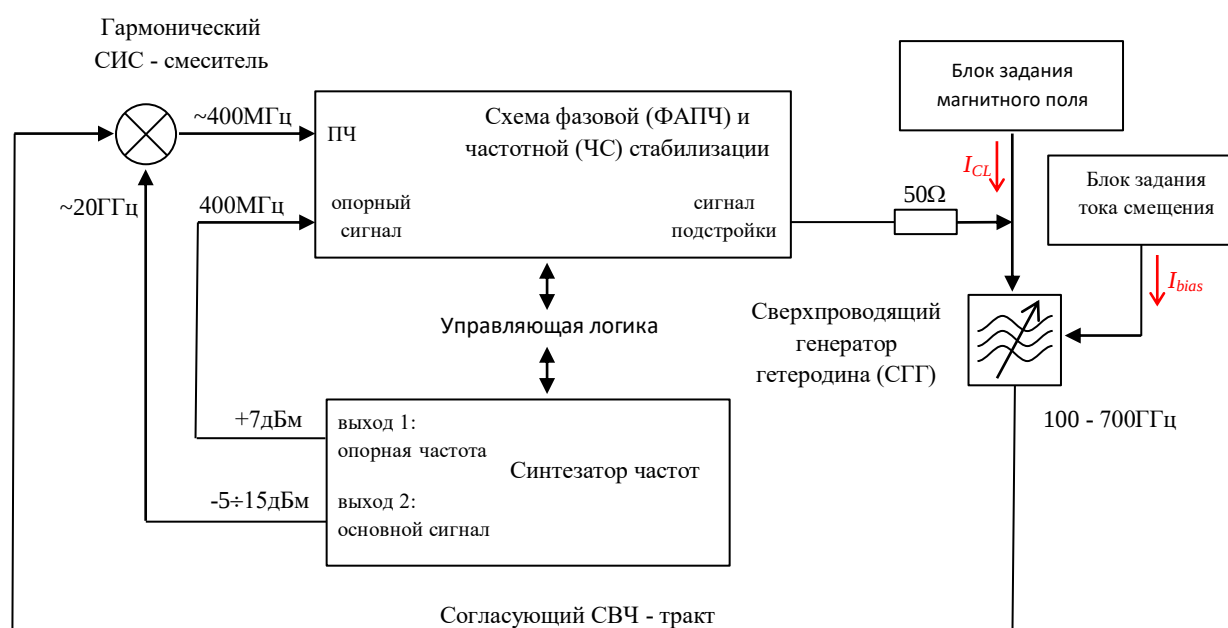


Рисунок 2.35. Структурная схема фазовой и частотной стабилизации сверхпроводящего генератора гетеродина с петлей обратной связи. На вход гармонического СИС – смесителя, охлажденного до температуры жидкого гелия, поступает сигнал от сверхпроводящего генератора на выбранной оператором частоте при помощи настройки токов I_{bias} и I_{CL} . На второй вход гармонического смесителя поступает сигнал от опорного синтезатора, n -кратная гармоника которого смешивается с сигналом сверхпроводящего генератора. На выходе гармонического смесителя формируется сигнал на ПЧ (100-700 МГц), который через усилители (не показаны на схеме) подключен ко входу модуля фазовой и частотной стабилизации. Стабилизирующая схема сравнивает сигнал на входе ПЧ с опорным сигналом и формирует на выходе, подключенном к линии управления СГГ, сигнал для компенсации расстройки.

Функциональная схема комбинированного модуля частотной и фазовой стабилизации представлена на рисунке 2.36. Основными частями данной схемы являются: схема фазового детектора, частотного детектора и элементы контроля и управления ФАПЧ. Схема фазового детектора выполнена на основе пары двойных балансных смесителей ADE – 4 (фирмы Mini-Circuits). Нижний по схеме двойной балансный смеситель используется для идентификации захвата в кольце ФАПЧ. Опорный сигнал на этот смеситель поступает через четвертьволновую линию задержки, что обеспечивает появление на его выходе сигнала смещения при наличии захвата. В схеме частотного детектора (ЧД) также используется фазовый детектор на двойном балансном смесителе, на один из входов которого поступает сигнал с задержкой (относительно сигнала на втором входе) на $3\lambda/4$. Дискриминационная характеристика ЧД имеет линейную частотную зависимость в области 400 ± 20 МГц и обеспечивает необходимое для захвата смещение выходного напряжения в области частот 400 ± 200 МГц.

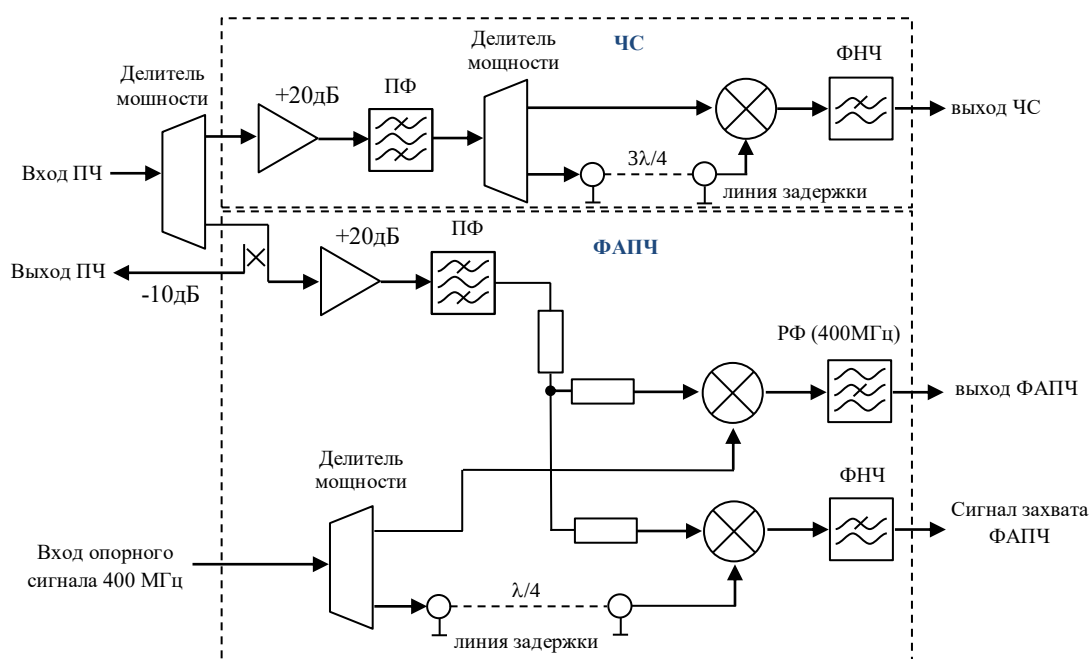


Рисунок 2.36. Функциональная схема комбинированного модуля частотной и фазовой стабилизации

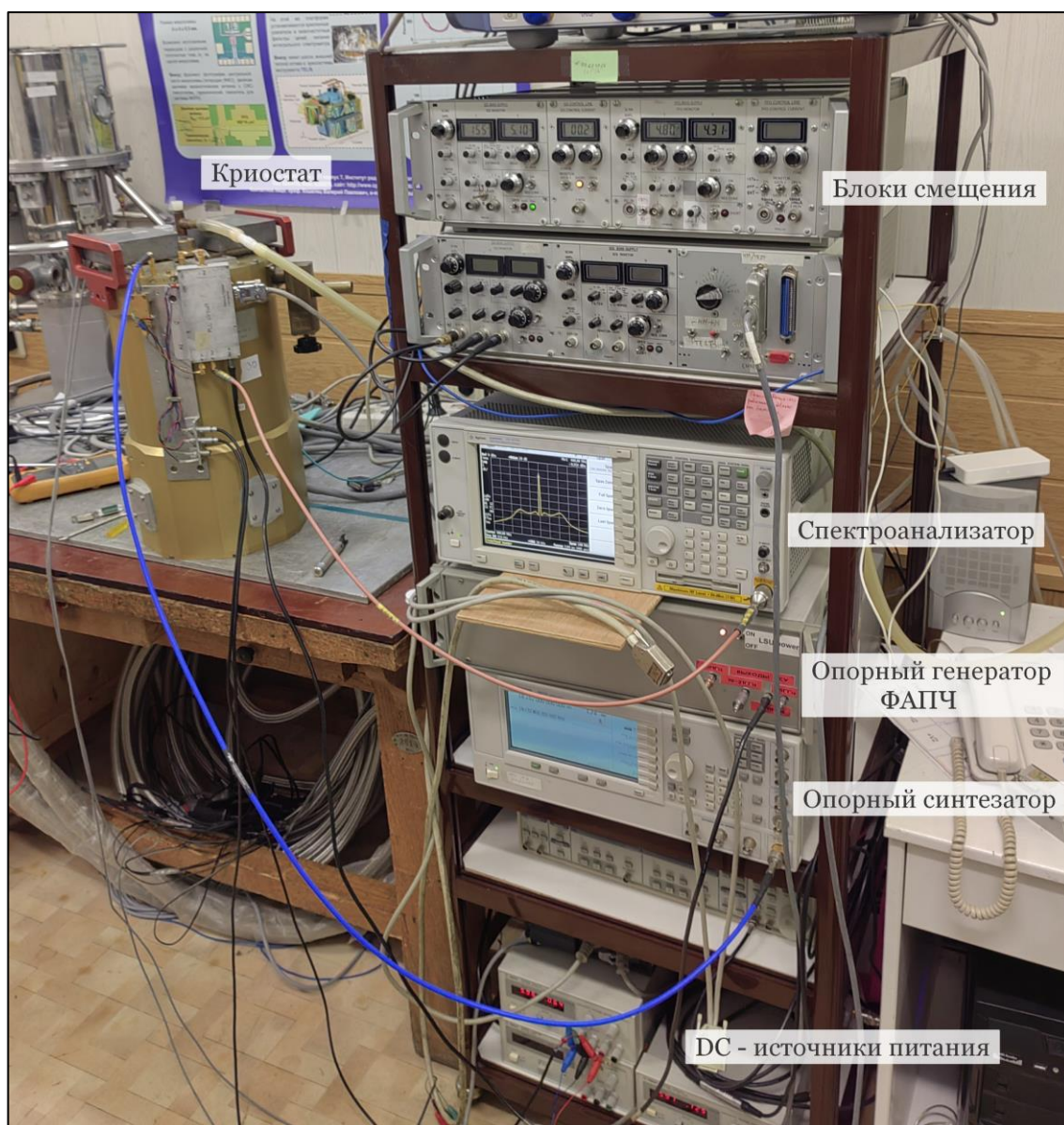


Рисунок 2.37. Фотография экспериментальной установки для получения спектральных характеристик сверхпроводящего генератора гетеродина. На фотографии указаны: гелиевый криостат и основные используемые приборы

ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУННЕЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ

§3.1. Туннельные переходы на основе структур Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb(N)

Для повышения рабочей частоты СИС - приемных систем ТГц - диапазона, необходимы переходы с высокой плотностью туннельного тока J . Для СИС - переходов на основе окиси алюминия существует ограничение повышения плотности туннельного тока (прозрачности барьера), при котором качество перехода, характеризуемое параметром R_j/R_n , резко падает. Это ограничение составляет величину порядка 10 - 15 кА/см², а при дальнейшем увеличении плотности тока наступает резкая деградация качества переходов (см. рисунок 3.1). Возрастающие в этом случае токи утечки туннельного перехода оказывают непосредственное влияние на качество преобразования принимаемого сигнала и являются причиной увеличения шумовой температуры приемника. Для преодоления данного ограничения была разработана

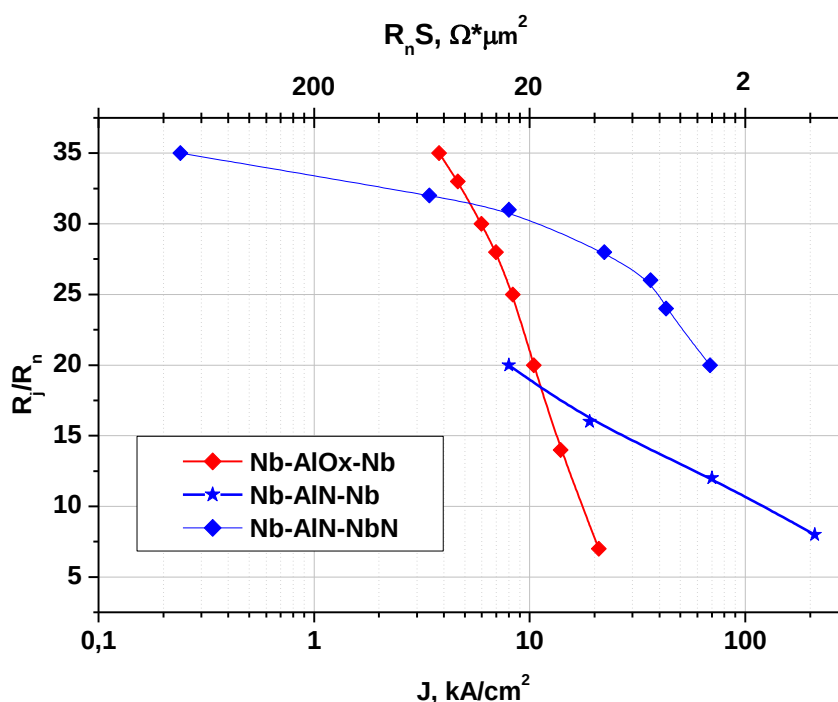


Рисунок 3.1. Зависимости отношения параметра качества R_j/R_n от значения плотности туннельного тока СИС – перехода J из работы [45]. Значение J для данных переходов рассчитано из ВАХ (величина целевого напряжения V_g и нормального сопротивления R_n). Более универсальной величиной является параметр прозрачности перехода $R_n S$, выраженная в единицах $\Omega \cdot \text{мкм}^2$; поэтому в дальнейшем будет использоваться именно величина $R_n S$.

технология изготовления туннельных СИС – переходов с барьером из AlN, который формировался путем нитридации поверхности Al в плазменном ВЧ - разряде в среде чистого N₂ [46 – 50]. Полученный изоляционный слой обладает близким с AlO_x значением диэлектрической постоянной $\varepsilon \approx 8.5$, что позволило использовать данный тип барьера совместно с СВЧ – цепями разработанными для структур на AlO_x. Новый тип переходов позволил получить значения плотностей тока более 15 кА/см² для реализации широкополосных приемников и генераторов ТГц - диапазона. Важным преимуществом барьера AlN является возможность использования NbN в качестве материала верхнего электрода туннельного контакта. Это позволяет увеличить щелевое напряжение перехода с 2.8 мВ для структур Nb/Al - AlN/Nb до 3.7 мВ для Nb/Al-AlN/NbN переходов. Это связано с тем, что значение энергетической щели для ниобия составляет $\Delta_{Nb} = 1.4$ мВ, в то время как для нитрида ниобия $\Delta_{NbN} = 2.3$ мВ при температуре 4.2 К. Следовательно, возможно значительно увеличить верхний предел частоты работы сверхвысокочастотных устройств, основанных на данных переходах. Использование NbN в качестве верхнего электрода для барьеров Al - AlO_x может привести к ухудшению сверхпроводниковых характеристик в приграничной зоне с барьером.

Поскольку СИС – переходы, в силу своей конструкции, обладают ощутимой емкостью, чувствительные детекторы построенные на их основе, должны быть сконструированы так, чтобы ток полезного сигнала, подводимый к СИС переходу не закорачивался через его собственную ёмкость С, а полностью преобразовывался в ток квазичастиц. Для компенсации влияния емкости в СВЧ - цепь включается индуктивный элемент, представляющий из себя отрезок микрополосковой линии. Таким образом, точная оценка емкости СИС – контакта на этапе проектирования СВЧ - схемы с учетом технологии изготовления, является приоритетной задачей для достижения высоких параметров будущего устройства. Оценка емкости возможна путем получения зависимостей высоты потенциального барьера и его ширины (реальной толщины изоляционного слоя) от величины его удельного сопротивления барьера ($R_n S$), поскольку именно $R_n S$ является основной характеристикой базовой трехслойной структуры на этапе ее изготовления.

§3.2. Методика оценки основных параметров туннельного барьера

В работе Дж. Симмонса была выведена формула туннельного тока для системы металл – изолятор – металл (МИМ) в квазиклассическом приближении, которая затем была обобщена Дж. Роуэлом в работе [51].

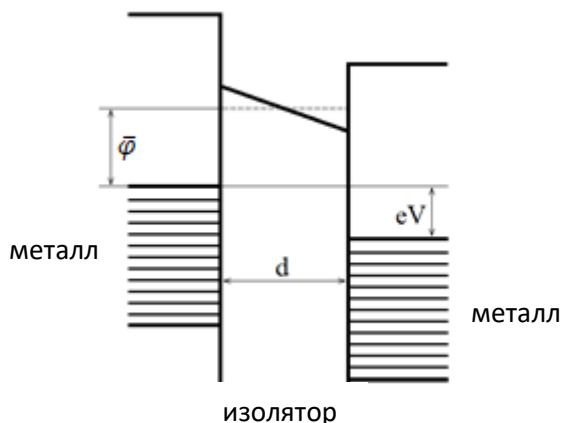


Рисунок 3.2. Схематическое изображение симметричного потенциального барьера в туннельном переходе под действием смещающего напряжения. $\bar{\varphi}$ – среднее значение высоты барьера, d – ширина барьера, eV – величина приложенного напряжения к электродам.

В предложенной модели, структура туннельного барьера (с меняющимся значением высоты φ) приводится к прямоугольной форме и вводится понятие средней высоты туннельного барьера $\bar{\varphi}$ и его ширины (толщины) d . Выражение для полного туннельного тока в системе МИМ:

$$J = J_0 \left(\bar{\varphi} \cdot \exp(-A \sqrt{\bar{\varphi}}) - (\bar{\varphi} + eV) \exp(-A \sqrt{\bar{\varphi} + eV}) \right), \quad (3.1)$$

в котором приняты обозначения:

$$J_0 = \frac{e}{2\pi h} (\beta \cdot d)^2, \quad (3.2)$$

$$A = \frac{4\pi d}{h\sqrt{2m_e}}, \quad (3.3)$$

β – форм-фактор, h – постоянная Планка, m_e – масса электрона, $\bar{\varphi}$ – среднее значение высоты барьера, d – толщина барьера. V – постоянное напряжение на переходе, e – заряд электрона. В работах [52, 53] сделана поправка на величину массы электрона в барьере и введено понятие эффективной массы электрона, примерно равной половине массы электрона в металле:

$$m_{eff} = m_e/2 \quad (3.4)$$

Частным случаем (3.1) для очень низких напряжений по сравнению с величиной средней высоты барьера ($eV \ll \bar{\varphi}$) является уравнение:

$$J = \frac{e^2 V}{h^2 d} \left(\bar{\varphi} + \frac{eV}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-A \left(\bar{\varphi} + \frac{eV}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{3e(2m_{eff})^{\frac{1}{2}}}{h^2 d A} \left\{ \left(\bar{\varphi} - \frac{eV}{2} \right) \exp \left[-A \left(\bar{\varphi} - \frac{eV}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] - \left(\bar{\varphi} + \frac{eV}{2} \right) \exp \left[-A \left(\bar{\varphi} + \frac{eV}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}. \quad (3.5)$$

После математических преобразований, уравнение приобретает простой вид:

$$J = \alpha(V + \gamma V^3), \quad (3.6)$$

где приняты обозначения:

$$\alpha = 3.16 \cdot 10^{10} \frac{\sqrt{\bar{\varphi}}}{d} \cdot \exp(-1.025d\sqrt{\bar{\varphi}}), \quad (3.7)$$

$$\gamma = 0.0115 \frac{d^2}{\bar{\varphi}} - 0.0315 \frac{d}{\bar{\varphi}^{\frac{3}{2}}}. \quad (3.8)$$

В равнениях (3.7) и (3.8) средняя высота барьера $\bar{\varphi}$ измеряется в электронвольтах (эВ), а его ширина d в ангстремах $\text{\AA}$. Полученное уравнение записано пренебрегая слагаемыми, имеющими степени V^4 и выше, которые были получены при разложении степенных функций из (3.5) в ряд Тейлора.

Производная по напряжению для выражения (3.6) выглядит следующим образом:

$$G(V) = dJ/dV = \alpha(1 + 3\gamma V^2), \quad (3.9)$$

где слагаемое α является проводимостью перехода при нулевом смещении [54], а график функции $G(V)$ представляет из себя параболическую зависимость, симметричную относительно нуля. Для несимметричных переходов, когда сверхпроводящие электроды контакта сделаны из различных материалов, некоторые авторы [51, 55, 56] обращали внимание на то, что минимум зависимости $G(V)$ никогда точно не соответствует нулевому смещению по напряжению и сдвинут в сторону смещения, соответствующего более высокому потенциалу металла в переходе. В работе [57] проводятся обсуждения асимметрии туннельных характеристик. По предположению Роуэла [58], сдвиг возникает в результате асимметрии барьера.

Как уже отмечалось, график функции $G(V)$ из (3.9) (см. также рисунок 3.3б) является параболой, или полиномом 2 - ой степени, уравнение которого выглядит следующим образом:

$$P_2(x) = Ax^2 + Bx + C, \quad (3.10)$$

где коэффициенты: $A = 3\alpha\gamma, B = 0, C = \alpha$.

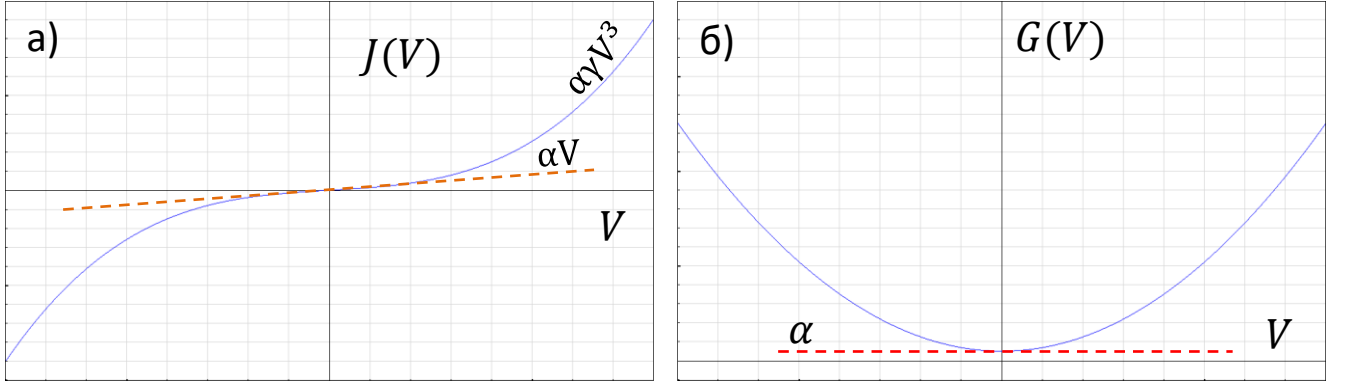


Рисунок 3.3. Графики функций: а) $J(V) = \alpha(V + \gamma V^3)$; б) $G(V) = \alpha(1 + 3\gamma V^2)$.

В уравнении для проводимости $G(V)$ коэффициенты α и γ выражаются в (3.7) и (3.8) соответственно через параметры d и $\bar{\varphi}$. Для получения оценочных параметров барьера, пренебрежем вторым слагаемым в выражении (3.8):

$$\gamma = 0.0115 \frac{d^2}{\bar{\varphi}} - 0.0315 \frac{d}{\bar{\varphi}^{\frac{3}{2}}} \approx 0.0115 \frac{d^2}{\bar{\varphi}}, \quad (3.11)$$

и подставив выражение для d в (3.7) получим оценочные выражения d и $\bar{\varphi}$:

$$d' = \frac{\sqrt{\gamma \bar{\varphi}}}{0.107}, \quad (3.12)$$

$$\bar{\varphi}' = \frac{-\ln\left(\frac{\alpha \sqrt{\gamma}}{0.34 \cdot 10^{10}}\right)}{9.56 \sqrt{\gamma}}. \quad (3.13)$$

Отметим, что для туннельного перехода с шириной барьера $d = 1.3$ нм и средней высотой $\bar{\varphi} = 1$ еВ, величина второго слагаемого в (6) отличается от величины первого чуть больше чем на 20%, что имеет достаточную точность для итерационного поиска решений (3.9) в окрестности d' и $\bar{\varphi}'$.

§3.3. Экспериментальные туннельные переходы Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/AlN/Nb(N).

Аппроксимация экспериментальных данных

Экспериментальные измерения тонкопленочных туннельных структур в начале проводят при небольших смещающих напряжениях в пределах сверхпроводящей щелевой особенности (см. рисунок 3.4 и 3.5) для получения характеристик перехода, таких как: сопротивление в нормальном состоянии - R_n , напряжение щелевой особенности - V_g , параметр качества перехода - R_j/R_n . По этим характеристикам, в частности, рассчитывается параметр $R_n S$, который, как уже говорилось, определяет степень прозрачности туннельного барьера и его соответствие заложенным технологическим параметрам на этапе формирования перехода.

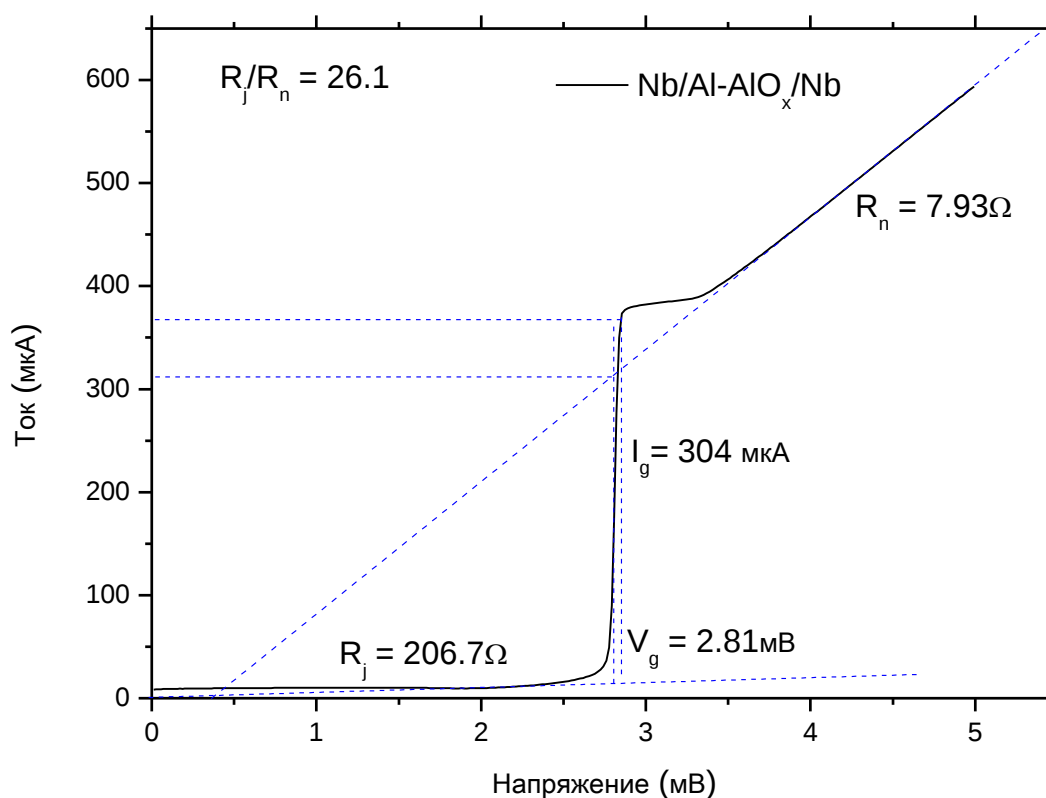


Рисунок 3.4. Вольт-амперная характеристика туннельного перехода Nb/Al-AlO_x/Nb измеренные в системе задания напряжения в диапазоне 0 – 5 мВ. Критический ток перехода подавлен магнитным полем; щелевая особенность возникает при напряжении 2.8 мВ, что соответствует величине энергетической щели для структуры Nb/Al - AlO_x/Nb. Параметр R_j/R_n для данного перехода >20 , что показывает его высокое качество.

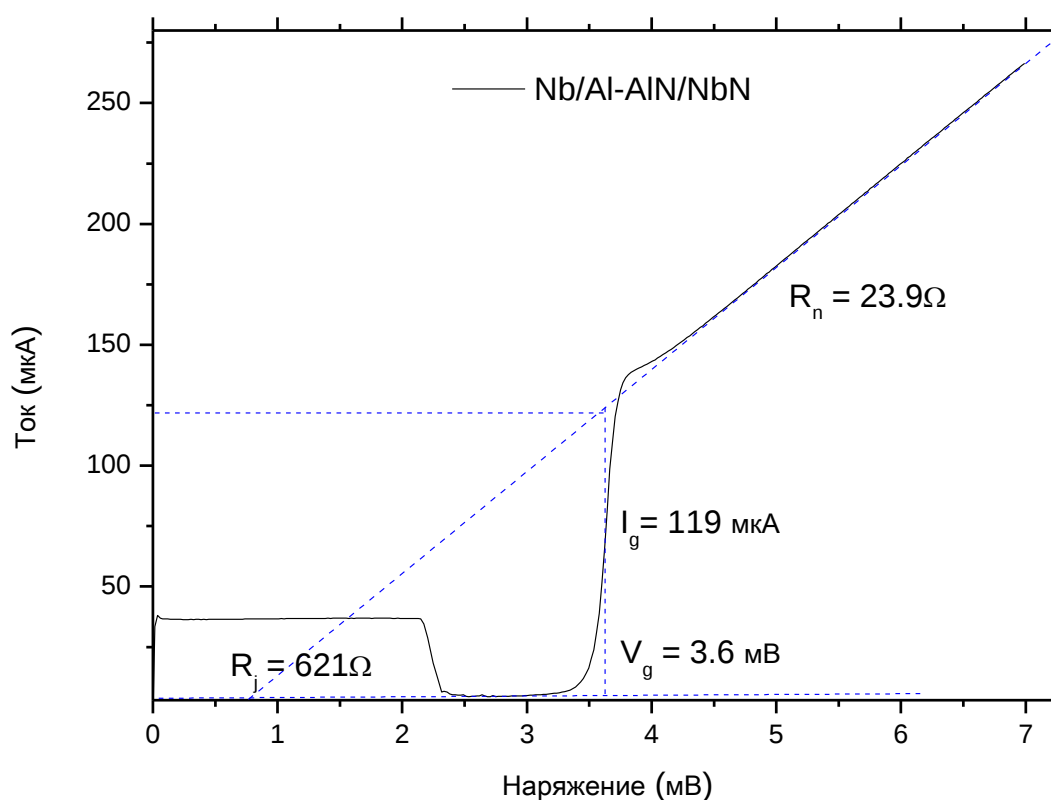


Рисунок 3.5. Вольт-амперная характеристика туннельного перехода Nb/Al-AlN/NbN измеренная в системе задания напряжения в диапазоне 0 – 7 мВ. Критический ток перехода не подавлен, а наличие области с экспериментальными точками от 0 до 2.5 мВ связано с особенностями работы системы задания напряжения; щелевая особенность возникает при напряжении 3.6 мВ, что соответствует величине энергетической щели для структуры Nb/AlN/NbN.

Для измерений на больших напряжениях (как правило, предел напряжений лежал в диапазоне ± 0.8 В, однако, для некоторых переходов, прикладываемое напряжение могло достигать 1.5 В) использовалась система задания тока с низким уровнем шумов по задающему каналу. Как и следует из теории, с ростом напряжения, к омическому характеру кривой, который описывается членом αV в (3.6), добавлялся кубический, связанный со слагаемым $\alpha \gamma V^3$. Для экспериментальных образцов, измеренных в рамках данной работы, типичное напряжение, при котором кривая ВАХ отклонялась от омической зависимости, составляло примерно 150 - 200 мВ. В связи с этим ВАХ заметно изгибалась в сторону уменьшения сопротивления (см. рисунок 3.6, а также теоретическую кривую $J(V)$ на рисунке 3.3а).

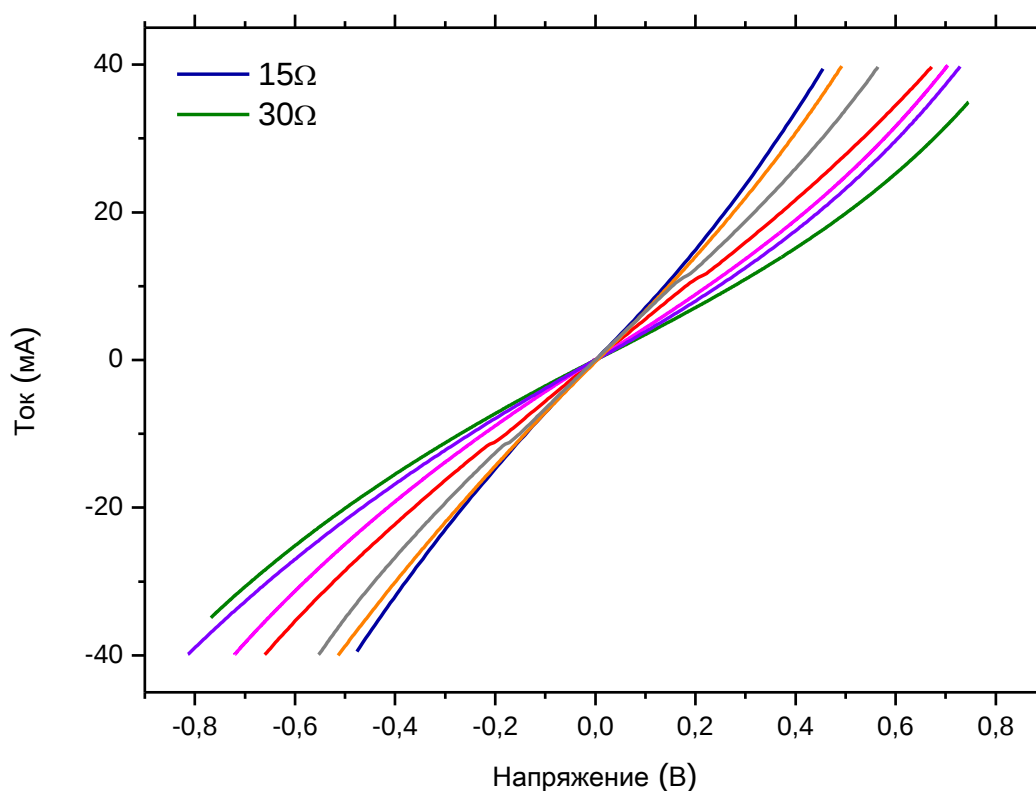


Рисунок 3.6. Типичные вольт-амперные характеристики туннельных СИС-переходов с сопротивлениями от 15 до 30 Ω , измеренных в широком диапазоне напряжений

Это свидетельствует о росте дифференциальной проводимости перехода, что хорошо видно на графике зависимости $\frac{d}{dV}J(V)$ на рисунке 3.7.

На рисунке 3.7 красная кривая (график квадратичного полинома) хорошо повторяет характер экспериментальных данных только в пределе низких напряжений ± 250 мВ. Предварительная оценка параметров барьера дает следующие, достаточно адекватные результаты: $\bar{\phi} = 1.1$ эВ, $d = 1.3$ нм. В своей работе [54] Дж. Роуэл указывает, что в процессе обработки экспериментальных данных, в частности, аппроксимации зависимости $G(V)$, снятой в широких диапазонах напряжений, повышается значимость высоких степеней по V в полученном после преобразований уравнении (3.6). Таким образом, в расширенном виде общее уравнение для проводимости туннельного контакта (3.9) имеет следующий вид:

$$G(V) = \alpha + 2\beta V + 3\gamma V^2 + 4\delta V^3 + \dots,$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты теоретической модели, описывающие аппроксимационную кривую. Обратимся снова к рисунку 3.7, на нем фиолетовая кривая (график кубического

полинома) хорошо совпадает с экспериментальными данными во всем диапазоне напряжений. Параметры барьера для данной аппроксимации следующие: $\bar{\varphi} = 1.2$ эВ, $d = 1.2$ нм. Таким образом, основные параметры туннельного барьера для обеих аппроксимаций имеют близкие значения. Варьирование коэффициента при старшем члене в уравнении кубического полинома приводит к увеличению изгиба левой ветви, который частично компенсирует «перекося зависимости» и слабо влияет на точность оценки параметров барьера.

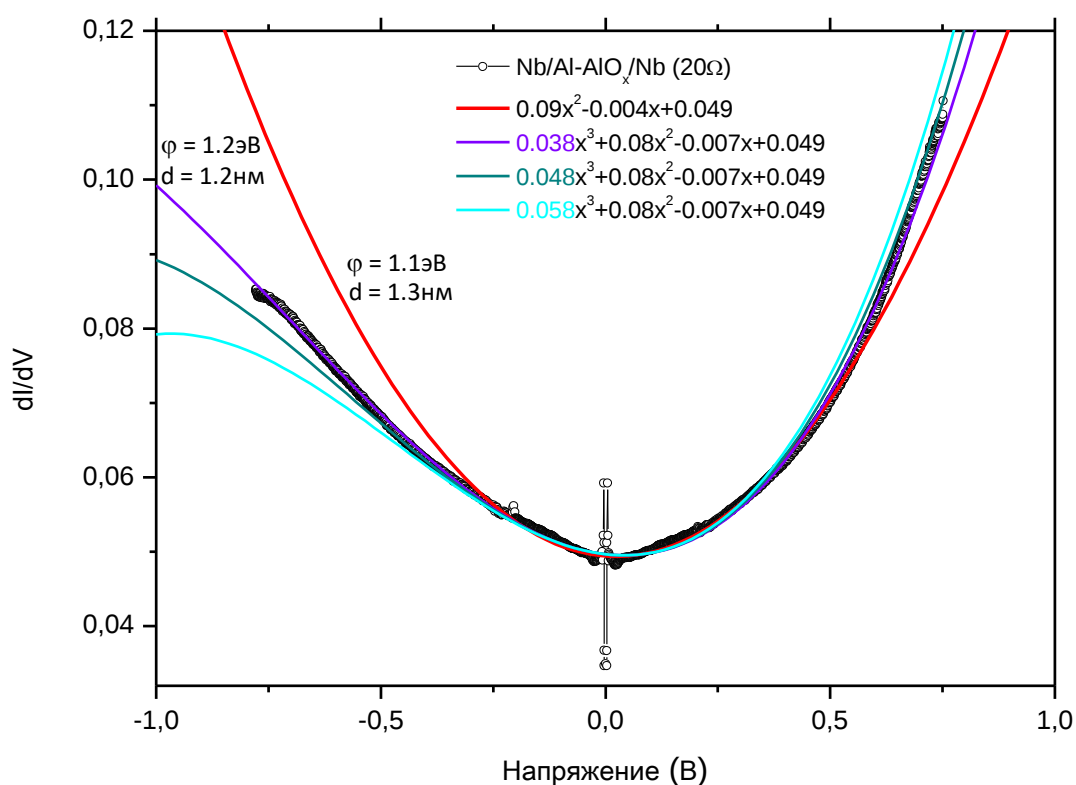


Рисунок 3.7. Зависимость дифференциальной проводимости туннельного перехода Nb/Al - AlO_x/Nb от напряжения (черные кружки), полученная в результате дифференцирования по напряжению экспериментальной ВАХ, вид которой представлен на рисунке 3.6. Теоретическая аппроксимация квадратичным полиномом (красная кривая). Теоретические аппроксимации кубическим полиномом с вариацией коэффициента при старшем члене (фиолетовая, зеленая и бирюзовая кривые).

Варьирование коэффициента при линейном члене в уравнении квадратичного полинома вызывает “скольжение” вниз всей зависимости вдоль одной из ветвей, в соответствии со знаком этого коэффициента (см. рисунок 3.8). Сохранение наклона ветвей графика квадратичного полинома с ростом независимой переменной не позволяет скомпенсировать степенную

тенденцию бóльшего порядка одной из ветвей в экспериментальных данных. Стоит отметить, что зануление линейного члена в уравнении соответствует симметризации характеристики относительно оси абсцисс, что в реальности соответствует нулевому коэффициенту при V в теоретическом уравнении (3.9). Это видно на увеличенной области графика, изображенного на

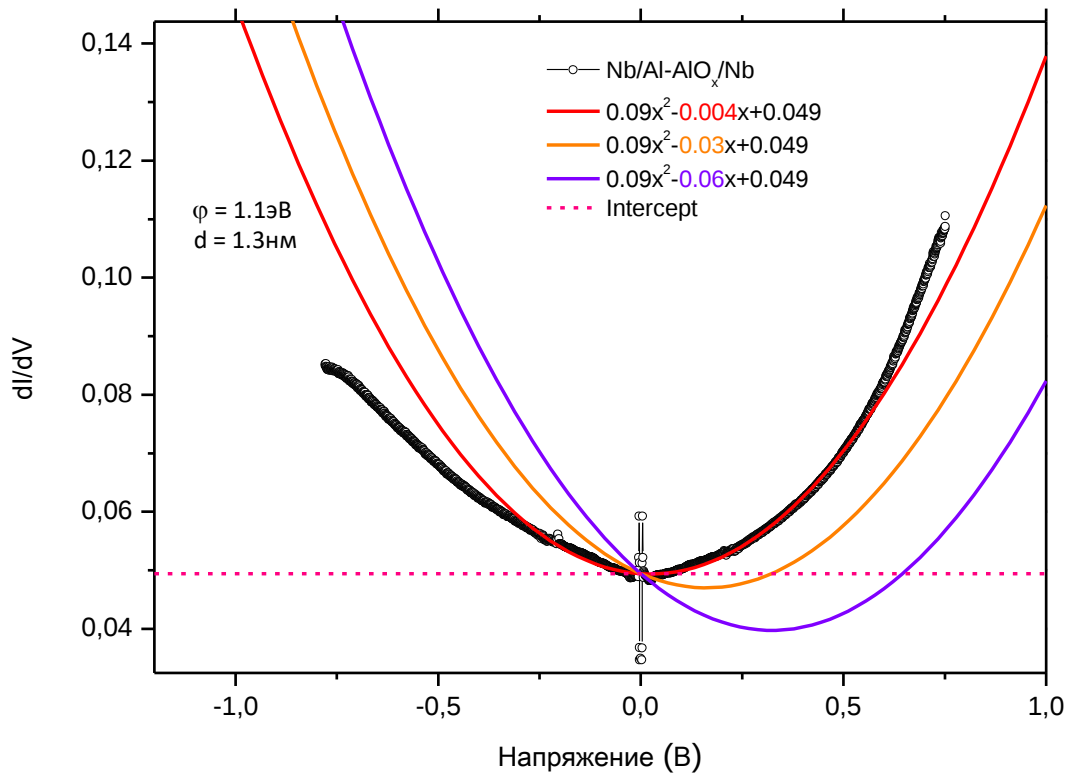


Рисунок 3.8. Зависимость дифференциальной проводимости туннельного перехода $Nb/Al - AlO_x/Nb$ от напряжения (черные кружки); теоретическая аппроксимация квадратичным полиномом (красная); теоретическая аппроксимация квадратичным полиномом с вариацией коэффициента при линейном члене (оранжевая и фиолетовая кривые); значение проводимости туннельного перехода при нулевом напряжении $G(0)$ – отмечено пунктиром. Основные параметры барьера для всех кривых на графике идентичны.

рисунке 3.8 в области напряжений до $\pm 0.3 \text{ В}$ (см. рисунок 3.9). Горизонтальная пунктирная линия проведена для наглядности симметрии синей кривой. На таком масштабе хорошо видна особенность, связанная со сверхпроводящей щелью ниобия, с двумя характерными всплесками проводимости, на прямом и инверсном протекании тока через переход на напряжениях $\pm 2.8 \text{ мВ}$.

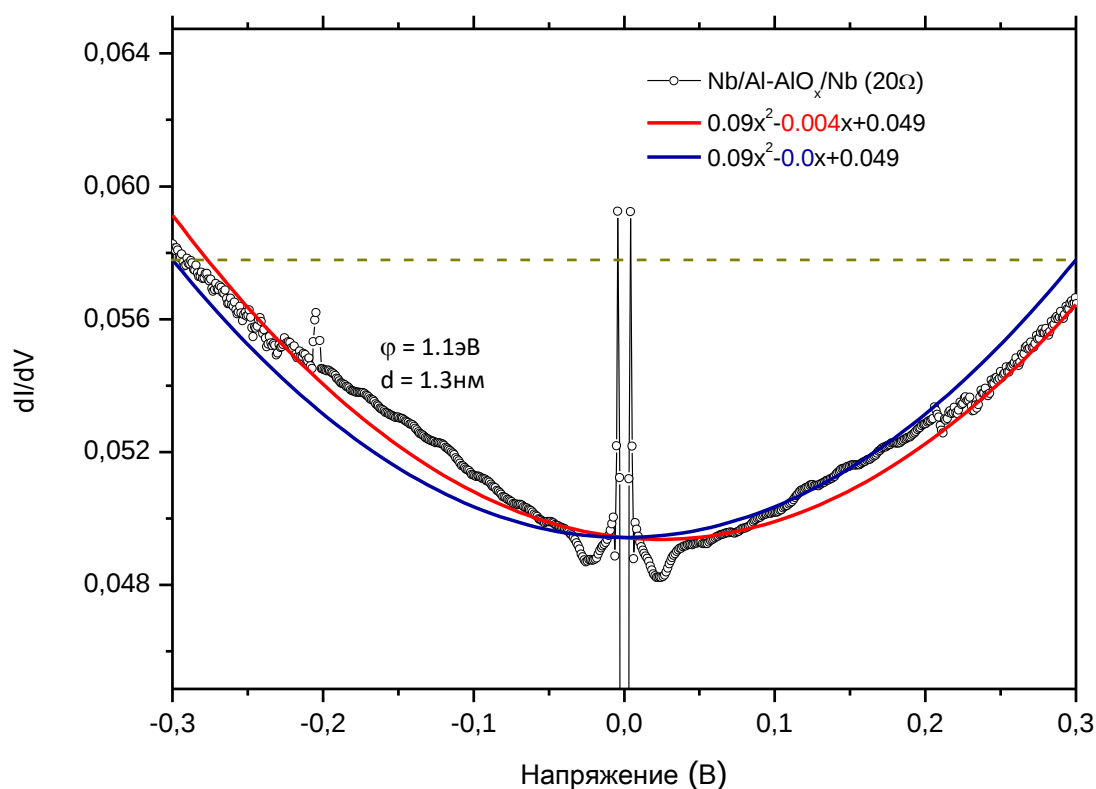


Рисунок 3.9. Зависимость дифференциальной проводимости туннельного перехода Nb/Al-AlO_x/Nb (черные кружки); теоретическая аппроксимация квадратичным полиномом с ненулевым коэффициентом при линейном члене (красная кривая); симметризованная теоретическая аппроксимация квадратичным полиномом (синяя кривая). Пунктирная линия проведена для наглядности.

Также следует обратить внимание на появления незначительных флуктуаций и всплесков проводимости при напряжениях, превышающих 200 мВ. Подобное поведение проводимости в основном наблюдалось у низкоомных переходов с любым типом барьера, подробнее этот эффект будет описан ниже. У относительно высокоомных переходов ($R > 10 \Omega$) подобные особенности на зависимости не влияли на аппроксимацию, так как не приводили к искажениям кривой. Для барьера Nb/Al-AlN/NbN зависимость дифференциальной проводимости от напряжения, с сопротивлением 21Ω , выглядит аналогично, для сравнения она показана на рисунке 3.10.

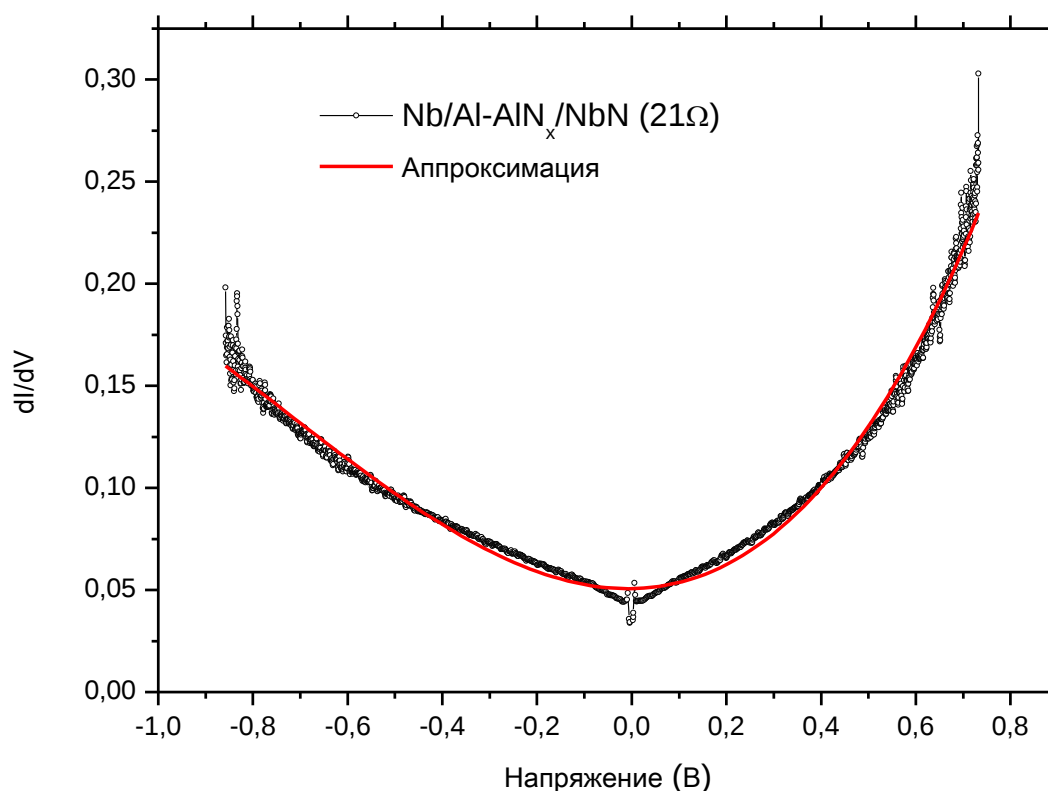


Рисунок 3.10. Зависимость дифференциальной проводимости туннельного перехода $Nb/Al-AlN_x/Nb$ (черные кружки); теоретическая аппроксимация кубическим полиномом (красная кривая).

Для аппроксимации всех экспериментальных данных использовалась функция кубического полинома (с нулевыми коэффициентами при кубическом и линейном члене), график которой имеет наилучшее соответствие измеренной характеристике.

Для подавляющего большинства измеренных образцов с сопротивлением $7\ \Omega$ и ниже на зависимости $G(V)$ были видны резкие провалы проводимости на одинаковых напряжениях разной полярности. Для примера, на рисунке 3.11 показана кривая $G(V)$ для переходов а) $Nb/Al-AlO_x/Nb$ с $R_n = 3\ \Omega$, б) $Nb/Al-AlN/Nb$ с $R_n = 2.1\ \Omega$. Подобные особенности сильно искажали параболический характер кривой и делали невозможным дальнейшую оценку параметров. Это явление можно объяснить эффектом проскальзывания фазы, либо формированием цепочки движущихся абрикосовских вихрей, образованных в результате частичного разрушения сверхпроводимости в пленках сверхпроводящих электродов, поскольку низкоомные переходы требуют большие токи для достижения необходимого напряжения.

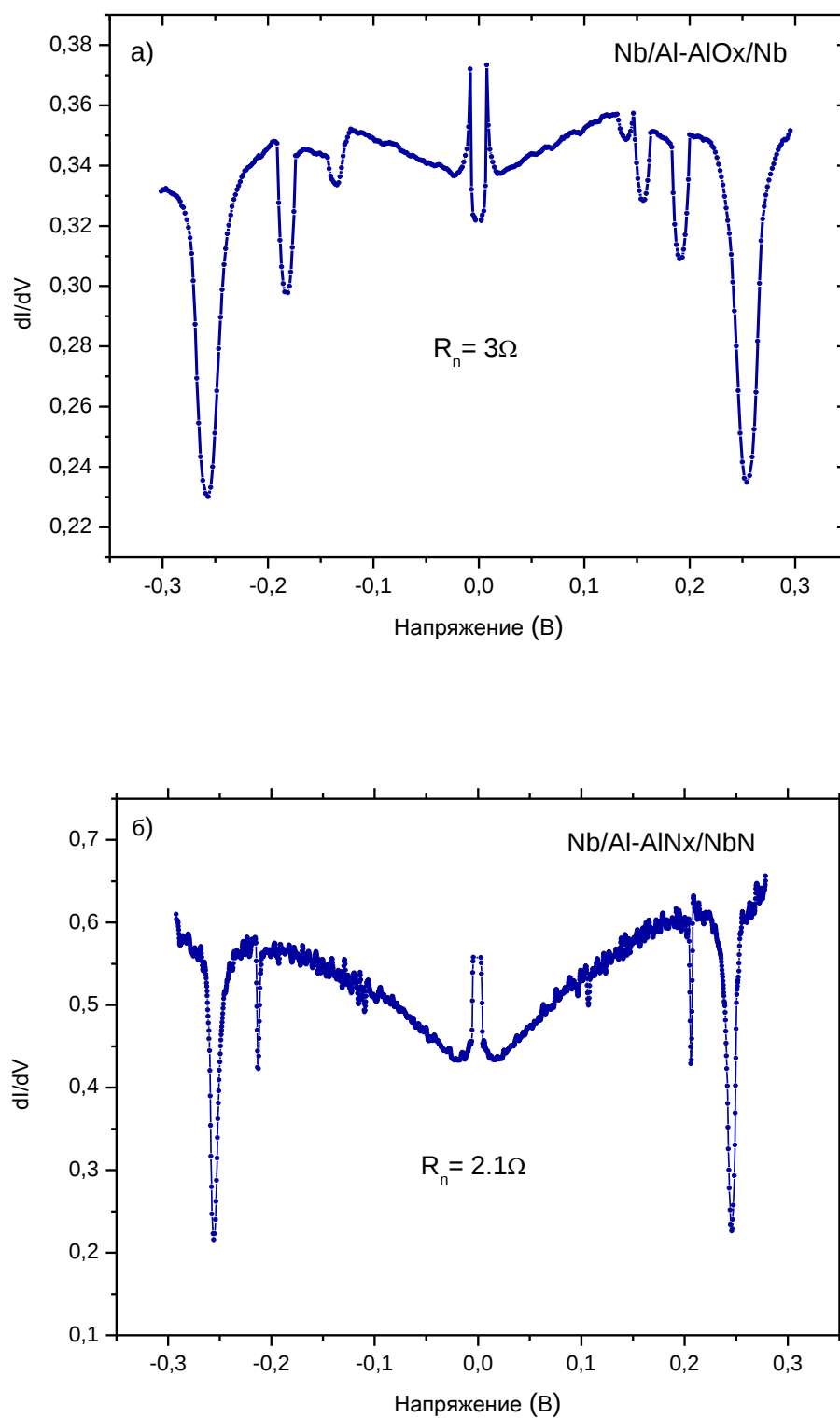


Рисунок 3.11. Зависимости дифференциальной проводимости от напряжения для низкоомных туннельных переходов с особенностями в области 100 - 300 мВ, связанные с эффектом проскальзывания фазы или формированием цепочки движущихся абрикосовских вихрей в пленках сверхпроводящих электродов. а) $\text{Nb/Al-AlO}_x/\text{Nb}$, б) $\text{Nb/Al-AlN}_x/\text{NbN}$

§3.4. Результаты оценки основных параметров туннельного барьера

По результатам расчетов были получены зависимости средней высоты и ширины туннельного барьера от значения $R_n S$ для барьеров Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/Al-AlN/Nb(N), которые представлены на рисунках 3.12 и 3.13. Эти графики включают вертикальные линии, указывающие на диапазоны ошибок, связанных с аппроксимацией зависимости дифференциальной проводимости перехода $G(V)$ от приложенного напряжения. Также была выполнена линейная аппроксимация всей выборки образцов для каждого типа барьера, демонстрирующая тенденцию увеличения средней высоты и ширины барьера с увеличением $R_n S$. Графики зависимостей средней высоты и ширины барьера от $R_n S$ в полулогарифмическом масштабе показывают четкую линейную зависимость, что позволяет путем ее интерполяции, в пределах линейности, сделать оценку параметров туннельных структур, применяемых для проектирования приемных субмиллиметровых систем.

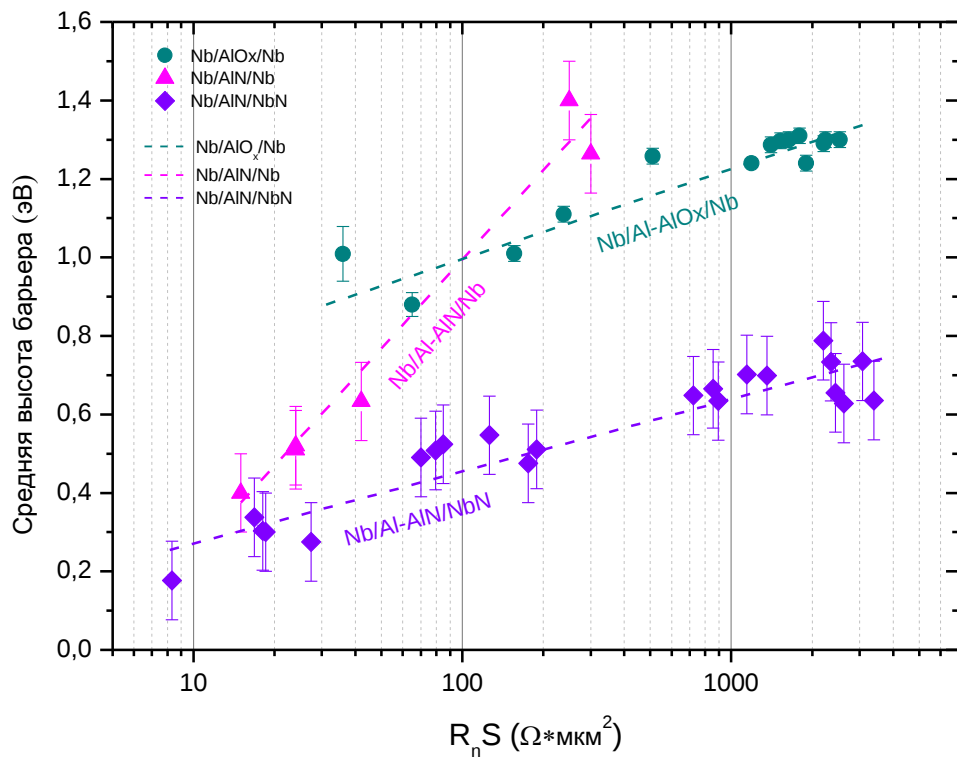


Рисунок 3.12. Зависимости средней высоты туннельного барьера от значения удельного сопротивления барьера $R_n S$, кружки - туннельные переходы Nb/Al-AlO_x/Nb, треугольники - туннельные переходы Nb/Al-AlN/Nb, ромбики - туннельные переходы Nb/Al-AlN/NbN, штриховые линии соответствующих цветов - линейные аппроксимации зависимостей.

Следует отметить, что для области с более высокой плотностью туннельного тока ($R_n S < 20 \text{ } \Omega \cdot \text{мкм}^2$) характер зависимости меняется, как продемонстрировано в следующих работах [59, 60].

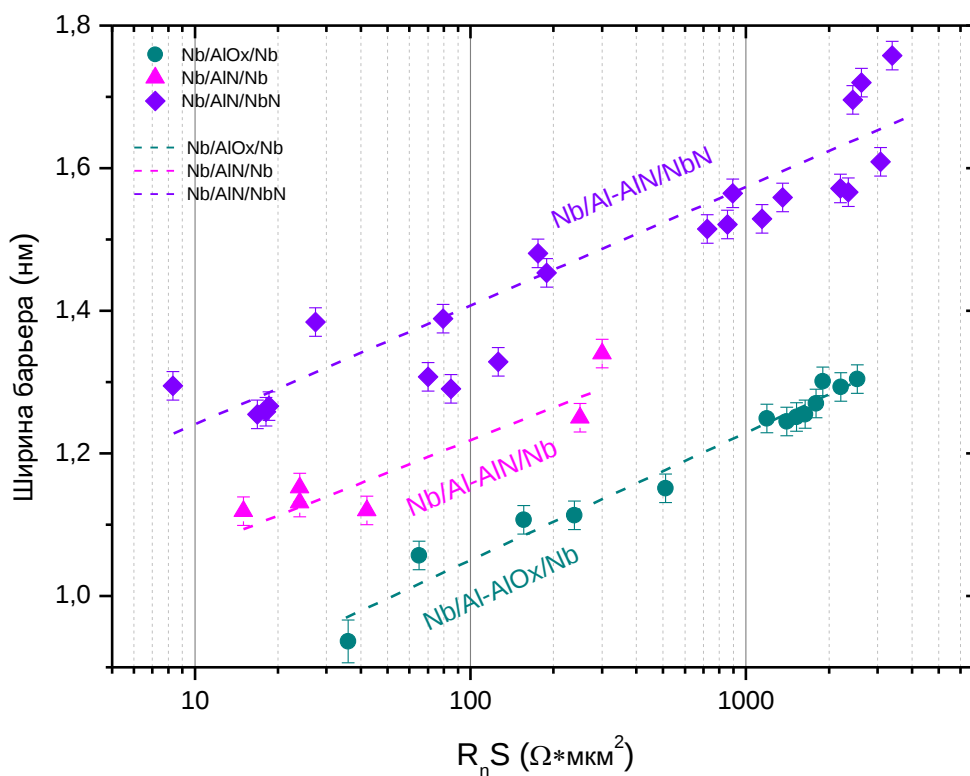


Рисунок 3.13. Зависимости ширины туннельного барьера от значения удельного сопротивления барьера $R_n S$, кружки - туннельные переходы Nb/Al-AlO_x/Nb, треугольники - туннельные переходы Nb/Al-AlN/Nb, ромбики - туннельные переходы Nb/Al-AlN/NbN, штриховые линии соответствующих цветов - линейные аппроксимации зависимостей

Для барьеров Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/Al-AlN/NbN зависимости $\bar{\varphi}(R_n S)$ и $d(R_n S)$ демонстрируют тенденцию роста с увеличением удельного сопротивления барьера по линейным законам со схожим углом наклона. Характеристика $\bar{\varphi}(R_n S)$ для барьеров Nb/Al-AlN/Nb отличаются от указанных выше, более широким диапазоном изменения высот потенциального барьера в пределах исследованных значений удельных сопротивлений барьера. По-видимому, отсутствие содержания азота в верхнем по топологии слое туннельной структуры Nb/Al-AlN/Nb вызывает заметное проявление эффекта диффузии барьерного азота в

слой Nb. Вследствие этого, происходит значительное понижение высоты потенциального барьера. Напротив, в структурах Nb/Al-AlN/NbN не происходит заметной диффузии азота, вследствие чего, характер зависимостей $\bar{\varphi}(R_n S)$ и $d(R_n S)$ схож со структурами Nb/Al-AlO_x/Nb, не имеющими N₂ в своем составе. Стоит также отметить, что толщина барьера Nb/Al-AlN/Nb изменяется по аналогичному закону, что и другие исследованные барьеры. Вероятно, в процессе оттока азота, его концентрация в барьерном слое не переходит некоторый критический уровень, когда барьер теряет свои изоляционные свойства.

Таким образом, в работе были проведены исследования транспортных характеристик основных типов сверхпроводящих туннельных переходов Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/Al-AlN/Nb(N) при высоких (сравнимых со средней высотой потенциального барьера) напряжениях. Для каждого из них была проведена аппроксимация зависимости дифференциальной проводимости туннельного перехода от напряжения, что позволило сделать оценку основных параметров барьеров и получить линейные зависимости (в полулогарифмическом масштабе) средней высоты и толщины барьера от параметра $R_n S$.

Использование точных данных о толщине туннельного слоя для расчёта емкости перехода способствовало созданию оптимизированных приемных систем с улучшенным согласованием. Например, в интегральном приемнике диапазона 211 – 275 ГГц (центральная частота 240 ГГц) был применен СИС - переход площадью 0.73 мкм² с параметром прозрачности туннельного барьера $R_n S = 27.9 \text{ } \Omega \cdot \text{мкм}^2$, выполняющий роль смесителя. Расчетная удельная емкость перехода составила 88 фФ/мкм². Для достижения минимальной шумовой температуры потребовалось скомпенсировать емкость перехода в рабочем диапазоне частот и согласовать низкий импеданс перехода $\sim 30 \text{ } \Omega$ с высоким импедансом волновода $\sim 400 \text{ } \Omega$). Решение заключалось во встраивании СИС-перехода в планарную структуру на основе копланарных и микрополосковых линий Nb/SiO₂/Nb. Такая конфигурация обеспечила компенсацию емкостного сопротивления и эффективное согласование импедансов. В результате шумовая температура приемника в двухполосном режиме достигла 25 К на частоте 265 ГГц, что всего в 2 раза превышает квантовый предел: $hf/k_B T$, где h – постоянная Планка, k_B – постоянная Больцмана.

§3.5. Выводы по главе

- Впервые были проведены количественные оценки параметров барьеров для трех основных типов сверхпроводящих туннельных структур, изготовленных на одном технологическом оборудовании.
- Были измерены зависимости основных параметров барьера от величины удельного сопротивления барьера $R_n S$ для переходов Nb/Al-AlO_x/Nb, Nb/Al-AlN/Nb, Nb/Al-AlN/NbN. Показано, что низкие значения средней высоты нитридных барьеров AlN при высокой плотности тока (по сравнению с барьерами с AlO_x), позволяет реализовывать структуры с более толстыми барьерными слоями, это, в свою очередь, дает возможность изготовления переходов с малой утечкой при напряжениях ниже целевого.
- Значительное понижение средней высоты потенциального барьера (по сравнению с аналогичными барьерами Nb/Al-AlO_x/Nb и Nb/Al-AlN/NbN) в структурах Nb/Al-AlN/Nb с ростом плотности туннельного тока, по – видимому, обусловлена процессом диффузии азота из барьерного слоя AlN в приграничные слои верхнего, по топологии, ниобия.
- Линейность характеристик $\bar{\varphi}(R_n S)$ и $d(R_n S)$ позволяет методом интерполяции, в пределах полученной зависимости, сделать оценку параметров туннельных структур с плотностями тока 10 – 20000 А/см², а также методом экстраполяции в область выше 20 кА/см² применяемых для построения приемных субмиллиметровых систем.

Основные результаты исследований, описанные в данной главе опубликованы в работах автора: [A5], [A6], [A7], [A9], [A13].

ГЛАВА 4. СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР ГЕТЕРОДИНА

Сверхпроводящий интегральный генератор гетеродина является одним из ключевых устройств в СИП, где совместно с СИС – смесителем он образует сверхпроводящий преобразователь частоты, основной функцией которого является прием исследуемого ТГц сигнала и перенос его спектра вниз по частоте без искажения формы. К таким гетеродинам предъявляются высокие требования по стабильности частоты генерации, непрерывной перестройке в рабочей полосе частот, а также к спектральному качеству выходного сигнала. Для обеспечения этих требований применяются различные методы расширения диапазона непрерывной перестройки сверхпроводящего генератора на основе РДП, а также стабилизации его спектральной линии излучения при помощи систем автоматической подстройки частоты и фазы. Один из методов расширения диапазона перестройки РДП – генератора с поддержанием достаточно узкополосного излучения для реализации режима ФАПЧ будет описан в данной главе.

§4.1. РДП - генераторы основе структур Nb/Al-AlO_x/Nb

Сверхпроводниковые генераторы на основе РДП Nb/Al-AlO_x/Nb были успешно испытаны в качестве интегрального источника гетеродина в диапазоне частот от 100 до 700 ГГц, обеспечивая достаточную мощность для накачки СИС - смесителя. Мощность излучения такого генератора составляет порядка 1 мкВт на частоте 500 ГГц. Как частота, так и мощность сверхпроводникового РДП - генератора могут меняться в широких пределах без каких-либо механических перестроек. Как уже отмечалось во введении, в силу соотношения Джозефсона напряжению генератора V однозначно соответствует частота: $f = (2e/h) \cdot V$. Однако существует одна важная проблема, осложняющая его работу в области частот 300 - 500 ГГц (0.6 – 1 мВ на ВАХ), – это наличие ступеней Фiske на вольт - амперной характеристике РДП в резонансном режиме работы генератора; в отличие от режима вязкого течения вихрей, в области частот 500 – 700 ГГц (1 – 1.6 мВ на ВАХ), где кривые имеют гладкую структуру (см. рисунки 1.11 и 1.13 на стр. 25 и 29). Этот эффект затрудняет получение генерации во всем частотном диапазоне из-за невозможности плавной перестройки. Для большинства практических приложений необходима непрерывная перестройка частоты сверхпроводникового гетеродина при произвольном токе смещения. Это требование естественным образом выполняется в режиме вязкого течения вихрей, в то время как при

работе в режиме ступеней Фиске стабильная генерация возможна только на ступенях Фиске, расстояние между которыми по частоте составляет десятки ГГц. Следует отметить, что для проведения спектральных измерений требуется не только непрерывная перестройка частоты гетеродина приемника, но и реализация режима фазовой автоподстройки частоты генератора [61]. Учитывая задержку в петле ФАПЧ между сверхпроводниковой микросхемой, находящейся в криостате при гелиевой температуре, и работающей при комнатной температуре системой ФАПЧ, для реализации синхронизации с достаточно высоким спектральным качеством ширина автономной линии генерации не должна превышать 10 - 15 МГц. Ширина линии генерации пропорциональна квадрату дифференциального сопротивления R_d генератора в рабочей точке [62 - 64]; это, в свою очередь, также накладывает ограничения на величину R_d , необходимую для реализации режима ФАПЧ.

§4.2. Резонансный режим работы РДП - генератора

На рисунке 4.1 представлено семейство ВАХ РДП генератора в резонансной области ($V < V_g/3$), полученное при разных значениях приложенного магнитного поля. На рисунке 4.2 показана единичная ВАХ генератора при токе через линию управления магнитным полем $I_{CL} = 29$ мА в резонансной области. На данном графике хорошо видны «разрывы» с отсутствием рабочих точек по напряжению и, соответственно, по частоте. График производной по напряжению - $R_d(V)$ (см. рисунок 4.3) демонстрирует структуру Фиске ступеней в резонансном режиме работы: области между ступенями не содержащие рабочих точек отмечены красным цветом; отметим, что на краях ступеней происходит резкое увеличение дифференциального сопротивления, соответствующего уширению линии. Для «сглаживания» данной зависимости предложено добиться увеличения параметра затухания α . Это способствует диссипации отраженной электромагнитной волны внутри перехода. Тем самым ухудшаются условия образования стоячей волны, моды которой, как уже отмечалось во введении, взаимодействуя с джозефсоновским током, порождают ступени на ВАХ.

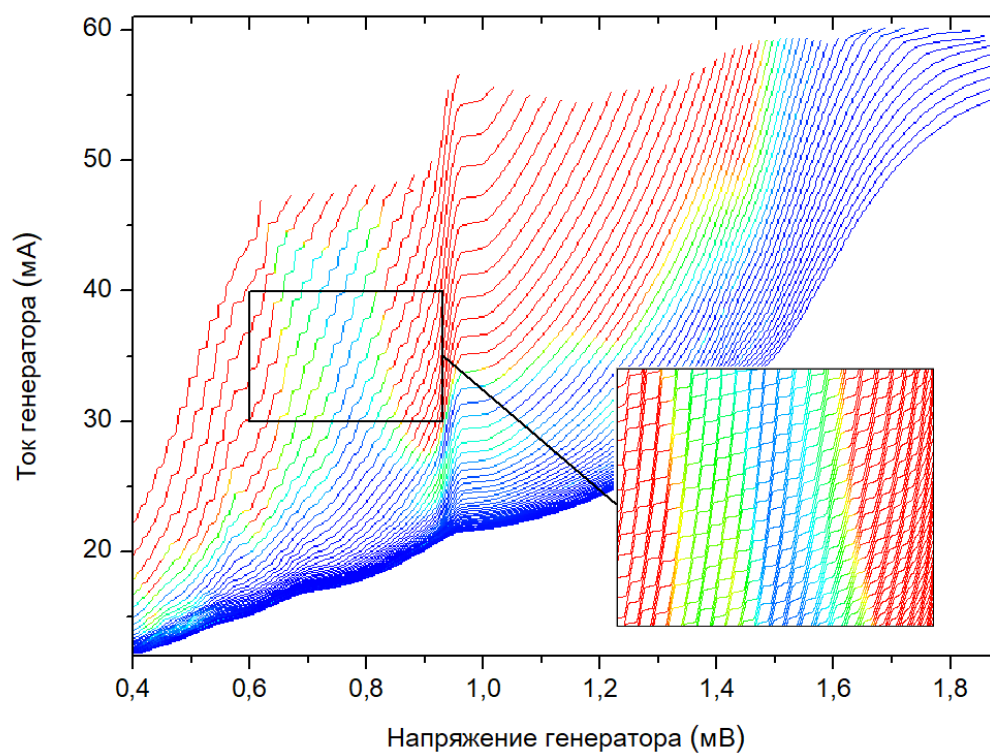


Рисунок 4.1. Семейство ВАХ генератора на основе структуры $Nb/Al-AlO_x/Nb$ измеренное при различных значениях магнитного поля. На увеличенной области показана структура резонансных Фиске ступеней измеренная с меньшим шагом по току I_{bias} и току I_{CL} .

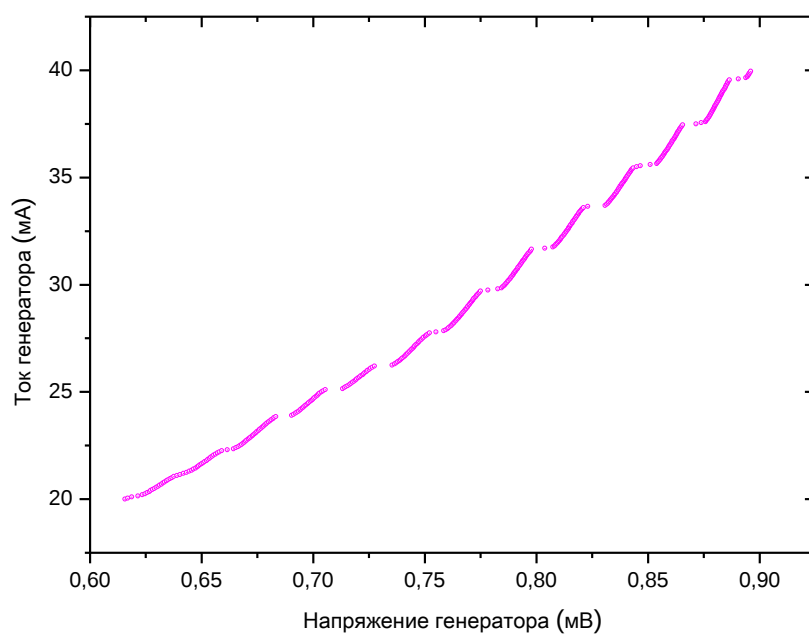


Рисунок 4.2. ВАХ РДП - генератора в резонансной области при $I_{CL} = 29$ мА.

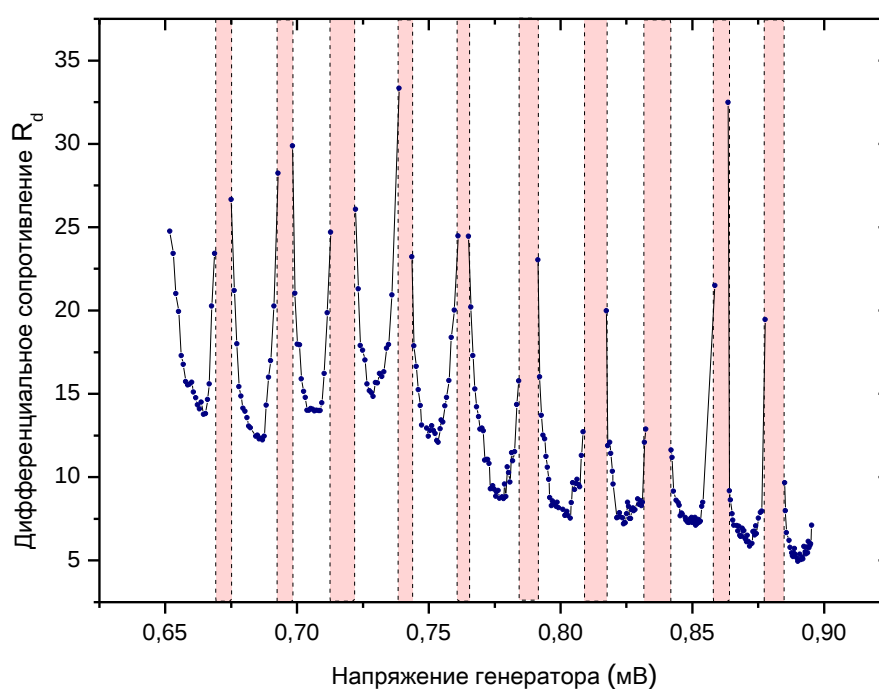


Рисунок 4.3. График зависимости дифференциального сопротивления R_d от напряжения на РДП – генераторе полученный путем дифференцирования кривой на рисунке 4.2. Красным цветом отмечены области между ступенями не содержащие рабочих точек.

Увеличение затухания было реализовано введением дополнительного поглощающего резистивного слоя в конструкцию РДП. Для экспериментального исследования эффекта подавления резонансов было изготовлено несколько версий тестовых генераторов (включенных в СВЧ – схему с СИС – смесителем) со слоем поглотителя из молибдена, имеющего толщину порядка 100 нм, вдоль краев РДП, расположенным по периметру всего перехода (вдоль краев и концов), либо только на одном из его концов. На рисунке 4.4 представлены структурные (совмещенные технологические слои проекта из САПР AutoCAD) изображения модифицированных РДП – генераторов с различным расположением поглощающих слоев. Для сравнения работы генераторов в резонансном режиме, выполненных в стандартном и модифицированном технологическом процессе, была изготовлена микросхема с аналогичным генератором, но без дополнительных слоев поглотителя, которая также позволяла измерять уровень накачки смесителя. Модифицированный технологический процесс изготовления РДП – генератора включает в себя дополнительные этапы контактной фотолитографии с получением фоторезистивной маски с окнами под ВЧ – магнетронное распыления молибдена.

Сверхпроводящие микросхемы, оснащенные различными модификациями РДП – генератора, были измерены по постоянному току при температуре жидкого гелия в транспортном сосуде Дьюара. Поскольку каждый микрочип представлял из себя СВЧ – схему сверхпроводящего смесителя (подробнее данная измерительная схема описана в главе 2 «Технология изготовления образцов и методика проведения эксперимента»). Напомним, что измерения ВАХ генератора проводились с учетом дополнительного параметра накачки, отображаемого на характеристике в виде цветовой шкалы. ВАХ генератора, оснащенного резисторами - поглотителями, расположенными вдоль генератора (модификация «А» на рисунке 4.4) представлена на рисунке 4.5. Видно, что в резонансной области реализуется неполное подавление геометрических резонансов – в областях тока смещения $I_{bias} > 20$ мА все ещё имеются слабо выраженные характерные ступенчатые структуры.

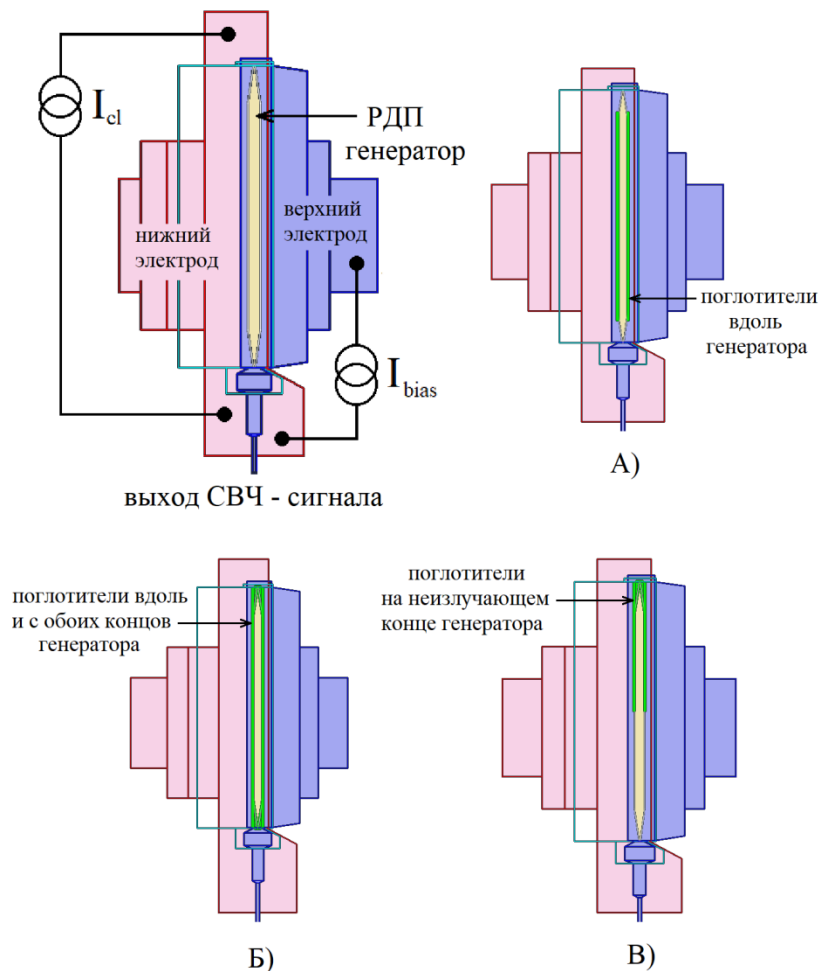


Рисунок 4.4. Структурные схемы сверхпроводящих РДП – генераторов с различным расположением поглощающих слоев. В левом верхнем углу показана стандартная схема РДП – генератора со схемой подключения управляющих токов. Модификации РДП – генератора с расположением поглощающих слоев: А) вдоль генератора; Б) по всему периметру генератора; В) со стороны неизлучающего конца.

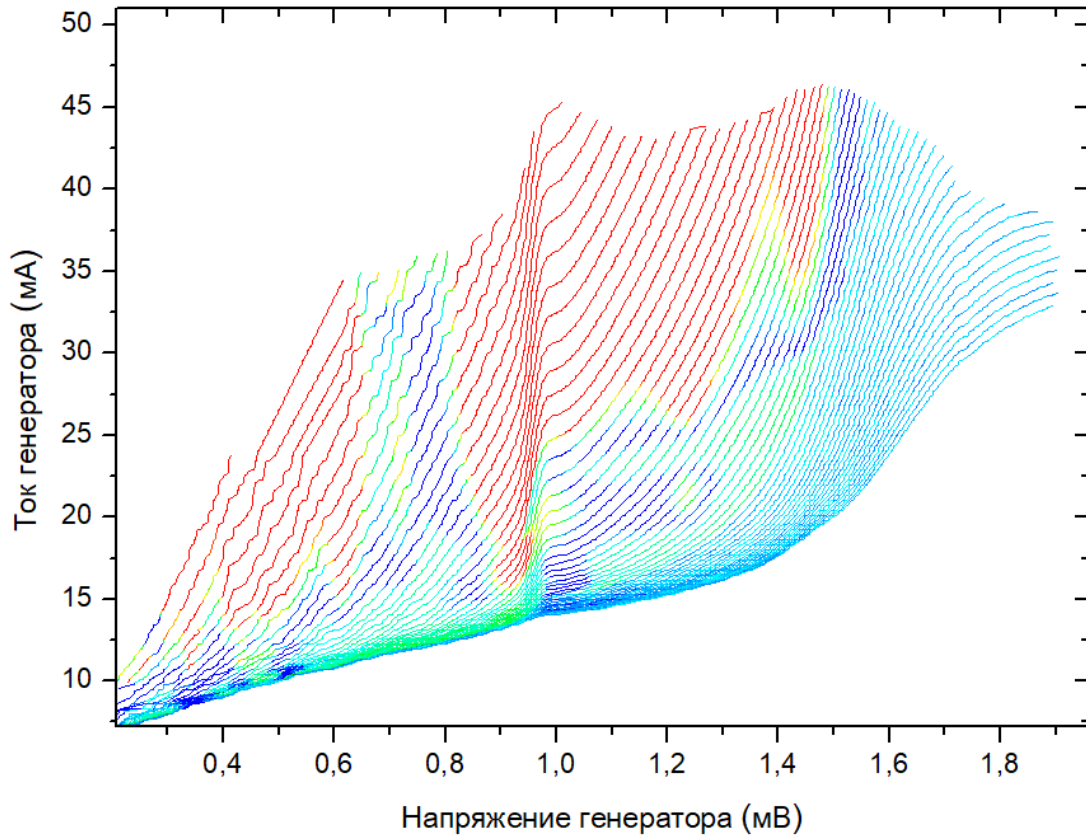


Рисунок 4.5. Семейство *VAX* генератора на основе структуры *Nb/Al - AlOx/Nb* измеренное при различных значениях магнитного поля для модификации «А» (см. рисунок 4.4).

Включение дополнительных поглощающих резисторов по всему периметру генератора (модификация «Б» на рисунке 4.4) позволяет почти полностью подавить резонансы в области напряжений от 700 мкВ вплоть до $V_g/3$, но приводит к сильным потерям мощности (как в области накачки от 500 мкВ до $V_g/3$, так и в области высоких частот, где потери сказываются особенно сильно) см. рисунок 4.6.

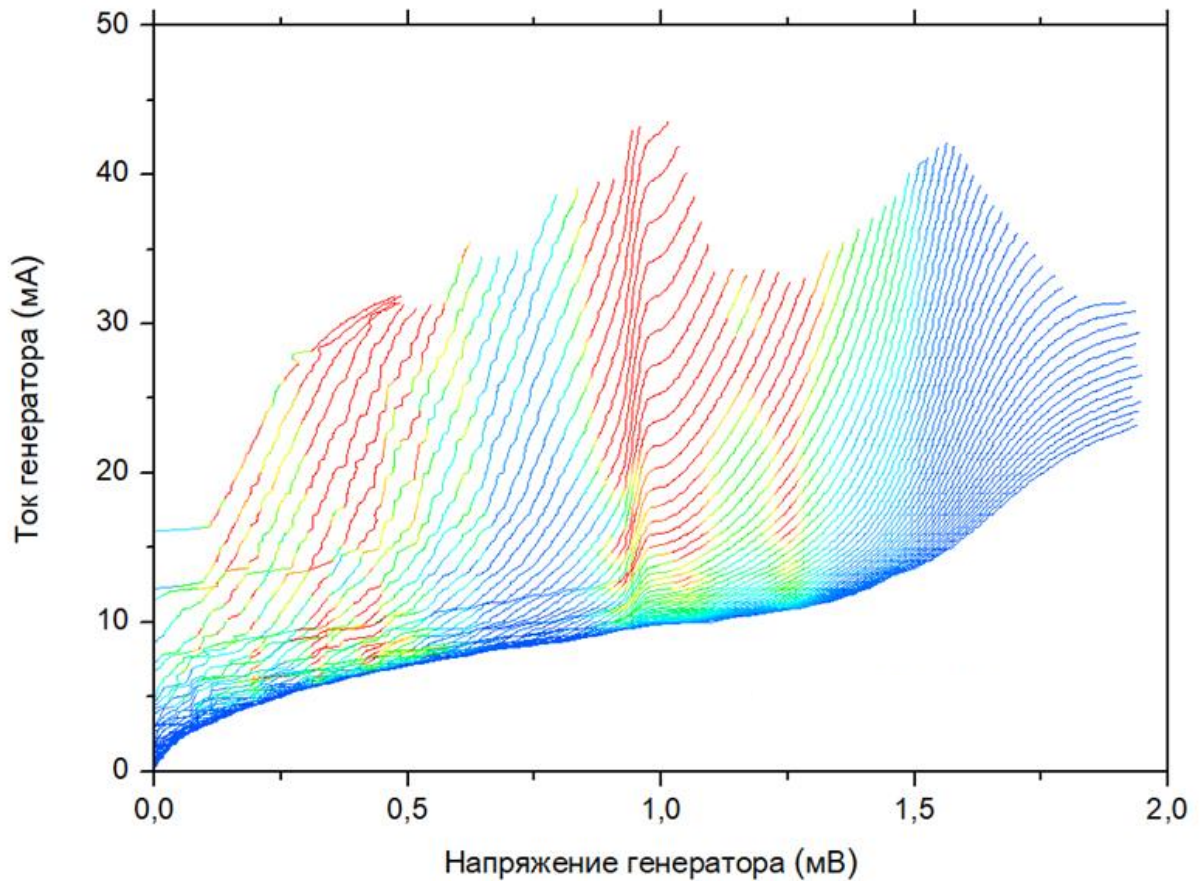


Рисунок 4.6. Семейство *VAX* генератора на основе структуры $Nb/Al - AlOx/Nb$ измеренное при различных значениях магнитного поля для модификации «Б» (см. рисунок 4.4).

Расположение поглощающих резисторов только на неизлучающем конце (место вхождения флаксонов) способствуют хорошему подавлению резонансов и не ухудшают накачку по сравнению с тестовым генератором без поглотителя. На рисунке 4.7 показано семейство *VAX* генератора, оснащенного поглощающими резисторами со стороны неизлучающего края с дополнительной цветовой шкалой накачки СИС - смесителя.

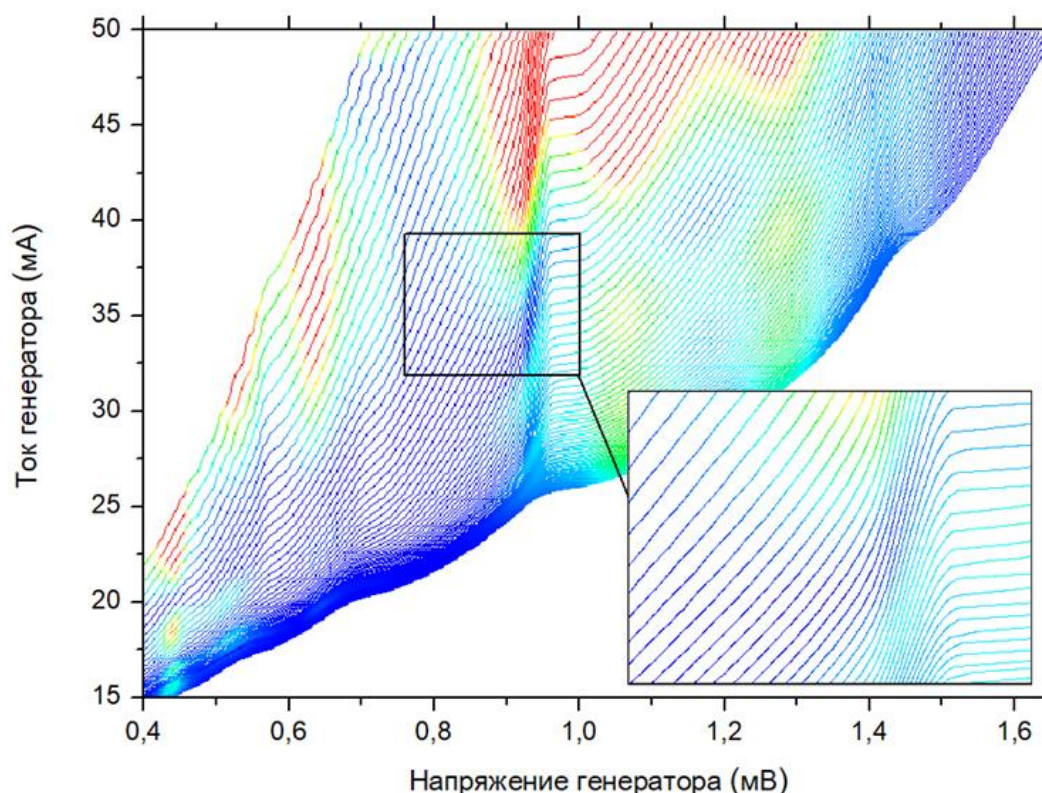


Рисунок 4.7. Семейство ВАХ генератора на основе структуры $Nb/Al-AlO_x/Nb$ измеренное при различных значениях магнитного поля для модификации «В» (см. рисунок 4.4).

Видно, что в резонансном режиме работы на примере единичной ВАХ РДП - генератора (рисунок 4.8) зависимость стала гладкой с большим наклоном. График зависимости дифференциального сопротивления R_d от напряжения V для этой кривой представлен на рисунке 4.9 (см. также рисунок 4.3). Прямое сравнение зависимостей $R_d(V)$ для двух конструкций генераторов (с поглощающими слоями и без них) показано на рисунке 4.10. Хорошо видно, что график $R_d(V)$ для РДП с поглощающими резисторами стал более гладким без резких скачков и пустых областей. Величина R_d в области напряжений 0.6 – 0.9 мВ изменяется не более чем на 10 мΩ, что примерно соответствует 10 МГц изменению ширины линии спектра излучения генератора в резонансном режиме. Таким образом, реализована возможность плавной перестройки частоты РДП генератора со слабо меняющейся шириной линии. В подтверждение этого, в следующем параграфе представлены результаты прямого измерения ширины линии излучения РДП – генератора, оснащенного поглощающими резисторами, при перестройке частоты в резонансной области.

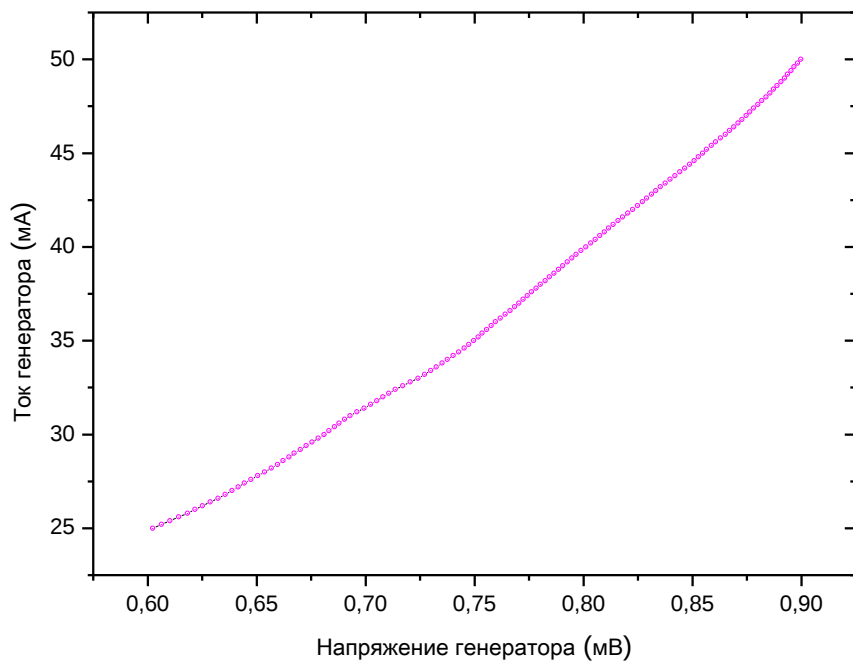


Рисунок 4.8. ВАХ РДП - генератора в резонансной области при $I_{CL} = 27.2$ мА.

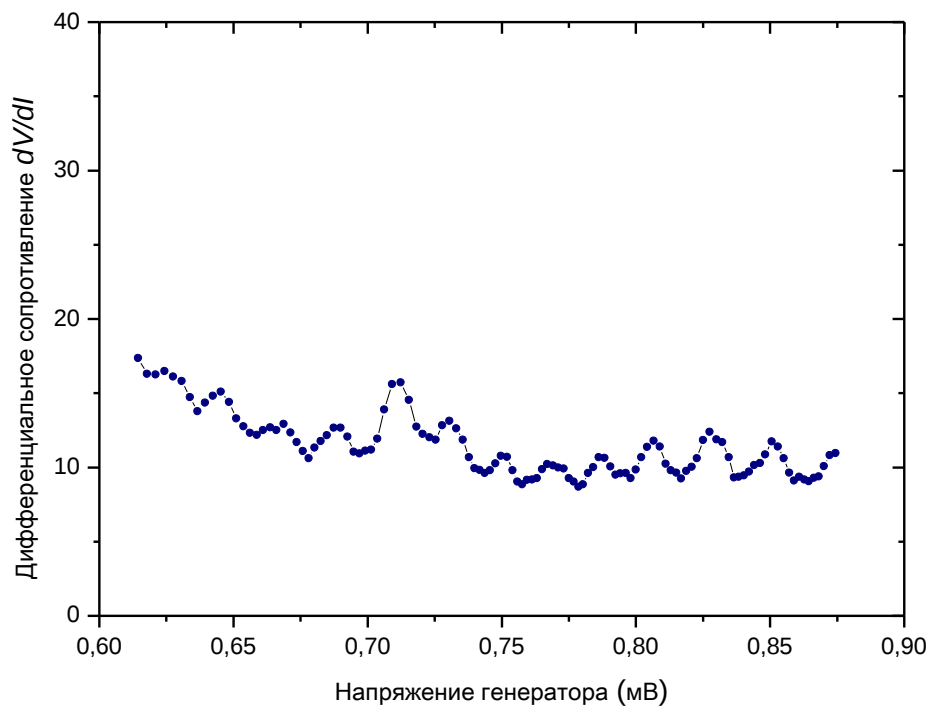


Рисунок 4.9. График зависимости дифференциального сопротивления R_d от напряжения на РДП – генераторе полученный путем дифференцирования кривой на рисунке 4.8.

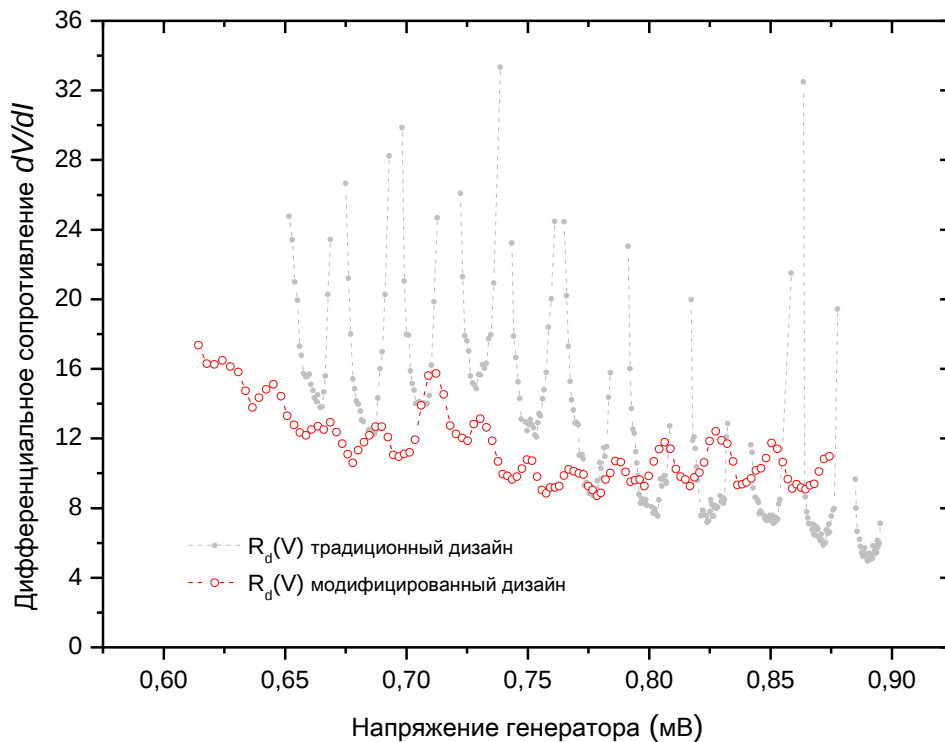


Рисунок 4.10. Графики зависимостей дифференциального сопротивления для традиционного РДП – генератора (показаны серым цветом) и генератора с поглощающими резисторами.

Для подтверждения физических принципов подавления резонансных мод, определения факторов способствующих подавлению и оптимизации геометрии поглотителей Ф.В. Ханом были проведены расчеты различных дизайнов РДП - генератора в системе Ansys HFSS. Проведенный расчет подробно описан в работе [65], поэтому дальше по тексту будут приведены основные выводы. Для всех предложенных геометрий наблюдается тенденция усиления затухания с ростом частоты. Это объясняется двумя факторами: во-первых, волновое число и параметр затухания линейно зависят от частоты [66]. Во-вторых, в результате увеличения сопротивления пленок (изготовленных из сверхпроводника или нормального металла) [67, 68] с ростом частоты происходит усиление поглощения энергии электромагнитных волн в самой структуре генератора. Включение слоя нормального металла в область перекрытия верхнего и нижнего электрода приводит к уменьшению величины отраженной волны, по оценкам, примерно в 4 раза. Дополнительный слой нормального металла на неизлучающем конце РДП - генератора улучшает предыдущий результат более чем на порядок во всем частотном диапазоне: 200 – 500 ГГц. Следует отметить, что наличие

поглощающих слоев значительно снижают мощность излучения генератора. Таким образом, важным условием является проектирование геометрии генератора с низким коэффициентом отражения от концов и низким уровнем потерь. Подавление резонансов может быть улучшено либо за счет введения поглощающих слоев в непосредственной близости от линии передачи (вдоль РДП), либо только на неизлучающем конце.

§4.3. Спектры излучения генератора с поглощающими слоями

На практике, наиболее точные измерения R_d производятся при помощи спектральных измерений линии излучения РДП. Измерительная методика описана в работах [69 – 71]. Исследуемый генератор в составе микросхемы СИС - смесителя монтируется внутри заливного гелиевого криостата с необходимой электроникой для измерений по постоянному току и СВЧ. Данная методика подробно изложена в главе 2; далее по тексту кратко об указанном механизме измерений. На гармонический смеситель (площадью около 1.5 мкм^2), находящийся на том же чипе с исследуемым генератором, через микрополосковую линию приходит исследуемый сигнал и сигнал от опорного синтезатора (находящегося при комнатной температуре). На выходе смесителя в результате процесса преобразования частоты вниз появляется сигнал на ПЧ. Далее полученный сигнал поступает на криогенный НЕМТ–усилитель, затем на усилители ПЧ, работающие при комнатной температуре. Таким образом формируется преобразованный вниз по частоте сигнал от сверхпроводящего генератора, регистрируемый спектроанализатором. Поскольку частота РДП - генератора может быть измерена спектроанализатором с точностью около 1 МГц, что соответствует погрешности для напряжения примерно 2 нВ; это позволяет проводить измерения дифференциального сопротивления с очень высокой точностью. Измеряя ток смещения генератора для двух точек с определенным сдвигом по частоте (например, 500 МГц, что соответствует сдвигу по напряжению примерно на 1 мкВ), можно определить значение R_d . Результаты измерений для двух диапазонов частот в виде графиков представлены на рисунках 4.11 и 4.12.

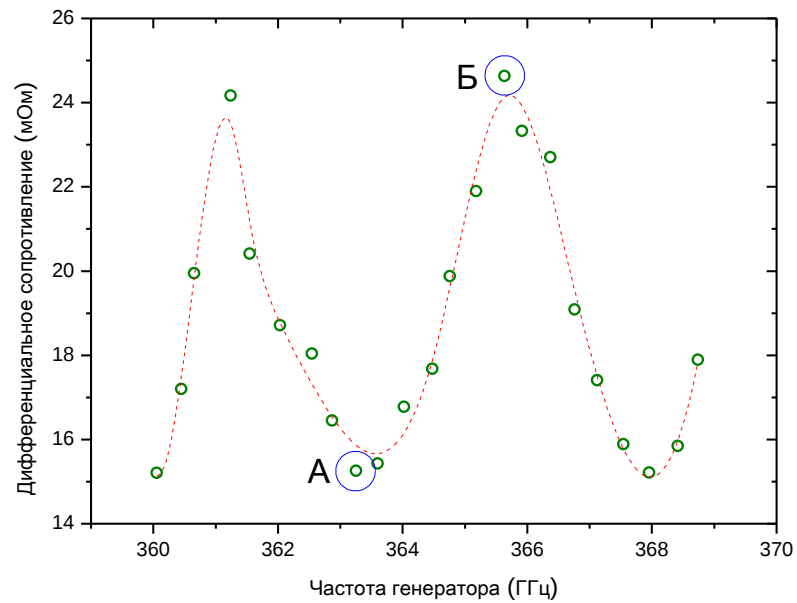


Рисунок 4.11. Зависимость дифференциального сопротивления генератора R_d от частоты, построенная для диапазона частот: 360 - 369 ГГц. Экспериментальные точки объединены кривой сплайна для наглядности.

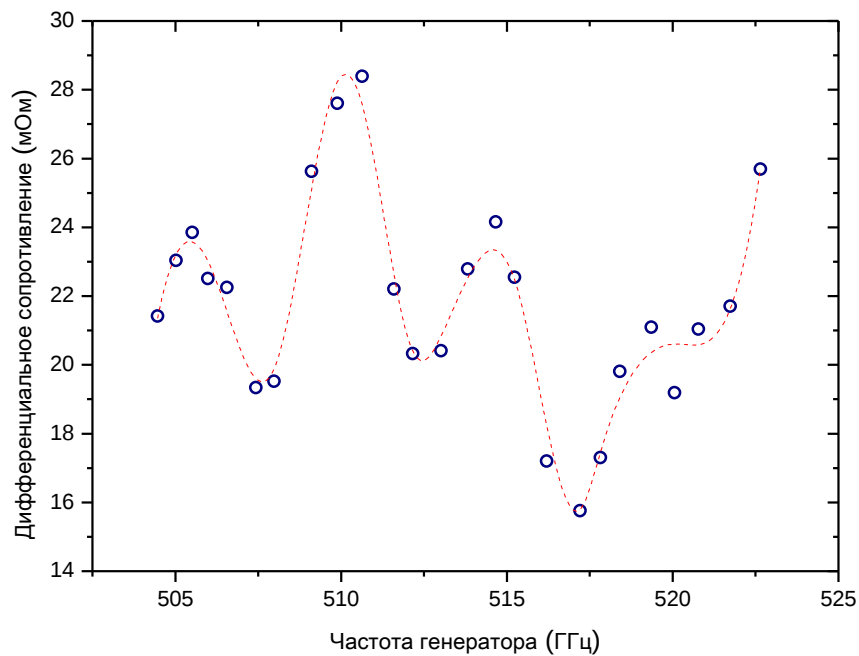


Рисунок 4.12. Зависимость дифференциального сопротивления генератора R_d от частоты, построенная для диапазона частот: 504 - 522 ГГц. Экспериментальные точки объединены кривой сплайна для наглядности.

При помощи кратко описанной выше методики преобразования частоты на гармоническом смесителе стало возможным измерить ширину линии излучения генератора в любой рабочей точке. Для этого обеспечивалась частотная стабилизация сигнала для компенсации низкочастотных колебаний шумовой температуры. Преобразованные вниз по частоте спектры излучения РДП - генератора, измеренные в двух точках (метки «А» и «Б»), представлены на рисунках 4.13 и 4.14.

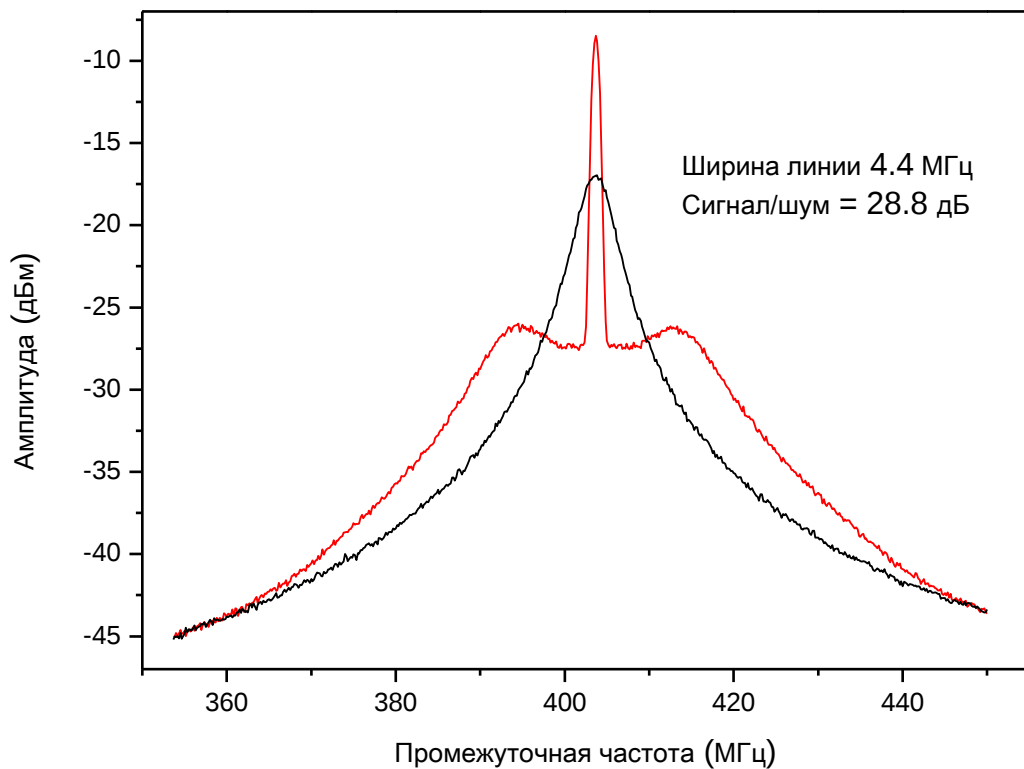


Рисунок 4.13. Спектр излучения РДП – генератора с поглощающими резисторами на ПЧ для точки «А» на рисунок 4.11 (черная кривая). Частота генератора составляла 363 ГГц. Спектр излучения в режиме ФАПЧ (красная кривая).

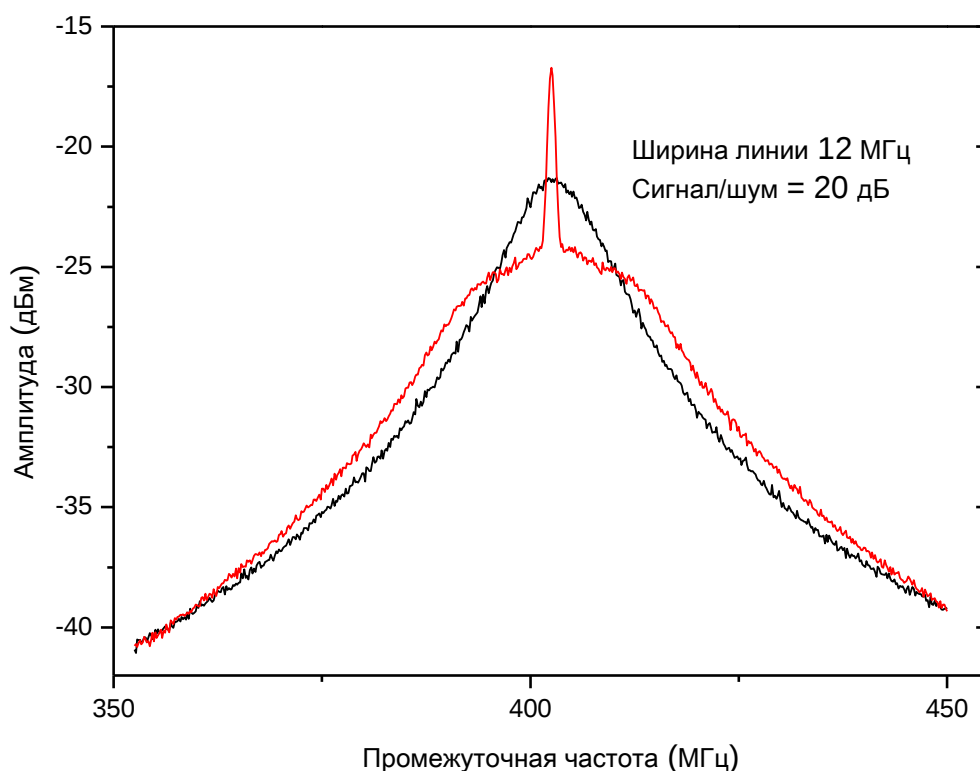


Рисунок 4.14. Спектр излучения РДП – генератора с поглощающими резисторами на ПЧ для точки «Б» на рисунке 4.11 (черная кривая). Частота генератора составляла 363 ГГц. Спектр излучения в режиме ФАПЧ (красная кривая).

От точки «А» к точке «Б» ширина линии изменяется от 4 до 12 МГц, что соответствует изменению R_d (см. рисунок 4.11). Ширина линии не превышает 12 МГц во всех рабочих точках, что дает возможность фазовой синхронизации при помощи системы ФАПЧ. Зависимость ширины линии РДП - генератора от частоты показана на рисунках 4.15 и 4.16. Таким образом, предложенная технология с введением в конструкцию РДП - генератора поглощающих слоев из нормального металла, способна обеспечить плавную перестройку частоты и возможность фазовой синхронизации во всем рабочем частотном диапазоне при произвольном токе смещения.

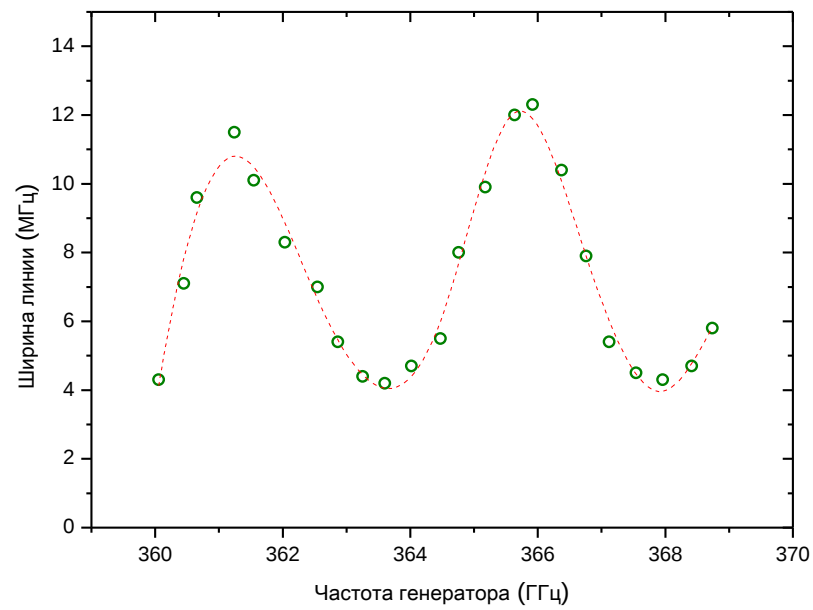


Рисунок 4.15. Зависимость ширины линии излучения РДП – генератора с поглощающими резисторами от частоты перестройки в резонансном режиме работы (диапазон 360 - 369 ГГц). Экспериментальные точки объединены кривой сплайна для наглядности.

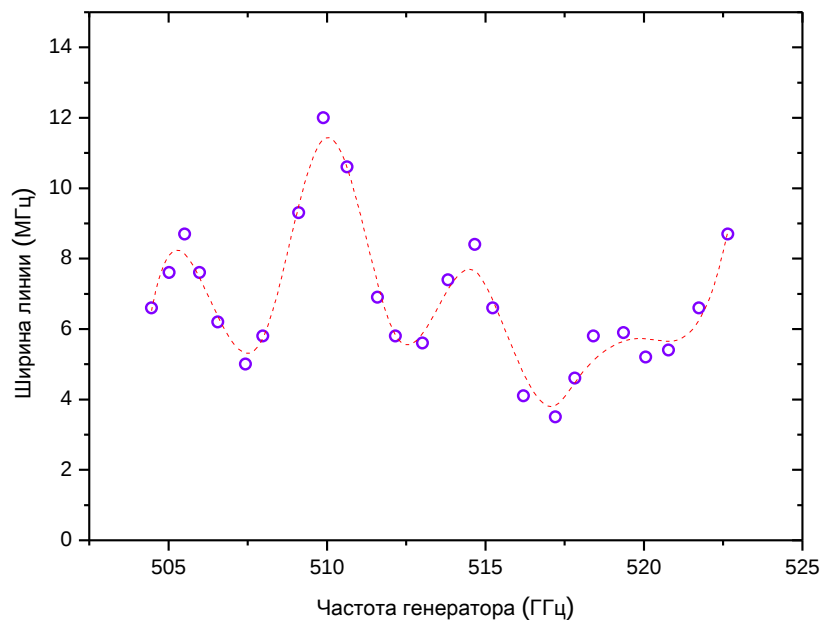


Рисунок 4.16. Зависимость ширины линии излучения РДП – генератора с поглощающими резисторами от частоты перестройки в резонансном режиме работы (диапазон 504 - 522 ГГц). Экспериментальные точки объединены кривой сплайна для наглядности.

§4.4. Выводы по главе

Был предложен и реализован метод подавления резонансов в субтерагерцовом сверхпроводящем генераторе гетеродина на основе РДП. Метод основан на введении поглощающих слоев из нормального металла в области перекрытия электродов (idle region) и на концах РДП. Проведено моделирование распространения электромагнитных волн для различных геометрий генератора (расположения поглощающих слоев). Были изготовлены и испытаны экспериментальные образцы. Продемонстрировано полное подавление резонансов при напряжениях $V < V_g/3$ и, как следствие, возможность непрерывной перестройки частоты сверхпроводящего генератора гетеродина в диапазоне частот 200 – 700 ГГц при произвольном токе смещения. Была измерена ширина линии излучения генератора: она составила 4 – 12 МГц, что позволило реализовать фазовую синхронизацию РДП - генератора во всем диапазоне частот перестройки. Новая конструкция РДП - генератора позволяет эффективно подавлять резонансные особенности без существенного влияния на выходную мощность.

Основные результаты исследований, описанные в данной главе опубликованы в работах автора: [A8], [A16], [A17].

ГЛАВА 5. ПОЛУФЛАКСОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ГЕТЕРОДИНА

§5.1. Сверхпроводящие генераторы для цифровых схем

Для эффективного управления сверхпроводящими кубитами и считывания их состояний требуется разработка совместимых по энерговыделению устройств, включая сверхпроводящие микроволновые генераторы. Для этих целей обычно используют полупроводниковые генераторы (синтезаторы частот), в совокупности с усилительными каскадами для комнатной и криогенной температур. Каждый прибор, помимо полезного сигнала, также приносит значительную шумовую компоненту, а также тепловое излучение, что в итоге негативно сказывается на стабильности всей цифровой схемы. Кроме того, вся измерительная система требует большого количества питающих и сигнальных кабельных линий. Использование микроволновых сверхпроводящих генераторов, расположенных на той же температурной ступени со сверхпроводящей цифровой схемой, позволяет преодолеть большинство проблем связанных с использованием «внешних» генераторов. Сверхпроводниковые устройства способны работать на ГГц частотах с минимальным тепловыделением [72 – 74]. Однако, «классическим» сверхпроводящим генераторам, построенным на основе распределённого джозефсоновского перехода (см. главу 4 “Сверхпроводниковый перестраиваемый генератор гетеродина”), для работы требуется магнитное поле, создаваемое при помощи тока, пропускаемого по нижнему слою РДП. Наличие источника магнитного поля в непосредственной близости к чувствительным элементам может привести к нежелательным последствиям. Решением может послужить использование сверхпроводящего генератора с искусственным разрывом джозефсоновской фазы, имеющего малые размеры и низкое энерговыделение.

В данной главе приведены результаты первого прямого измерения линии излучения нового типа генератора без использования магнитного поля, для которого реализован режим ФАПЧ.

§5.2. Разрыв джозефсоновской фазы в РДП, полуфлаксон

Еще в начале 80-х годов прошлого века была предложена концепция, при которой классическое ток - фазовое соотношения для слабосвязных джозефсоновских переходов $I = I_c \sin(\varphi)$ становилось инверсным, вследствие появления осцилляций сверхпроводящего параметра порядка в структурах сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник [75]. Это явление изменения фазы сверхтока при переходе с одного сверхпроводящего берега контакта на другой было подтверждено экспериментально в научной группе В.В. Рязанова [76]. В частности, такие джозефсоновские π - контакты стали использовать в качестве «фазовых батареек» для применения в различных классических [77] и квантовых [78] схемах, что позволило значительно сократить внешние линии смещения и уменьшить декогеренцию. Известны, также, работы с успешной реализацией переходов, объединяющих себе 0- и π -состояния [79]. Возможность искусственного разрыва джозефсоновской фазы в РДП была теоретически предсказана и экспериментально подтверждена в работах [80, 81]. Было показано, что при определенных условиях в РДП можно создать области с 0 и π – состояниями, на стыке которых спонтанно образуется полуцелый квант магнитного потока – так называемый полуфлаксон (полуфлаксон противоположной полярности называется антиполуфлаксоном). Полуфлаксоны (рисунок 5.1), вне зависимости от их полярности, являются основным состоянием системы, а не её возбуждением. Также полуфлаксоны, в отличие от подвижных флаксонов, не являются солитонами и закреплены на месте 0 – π границы.

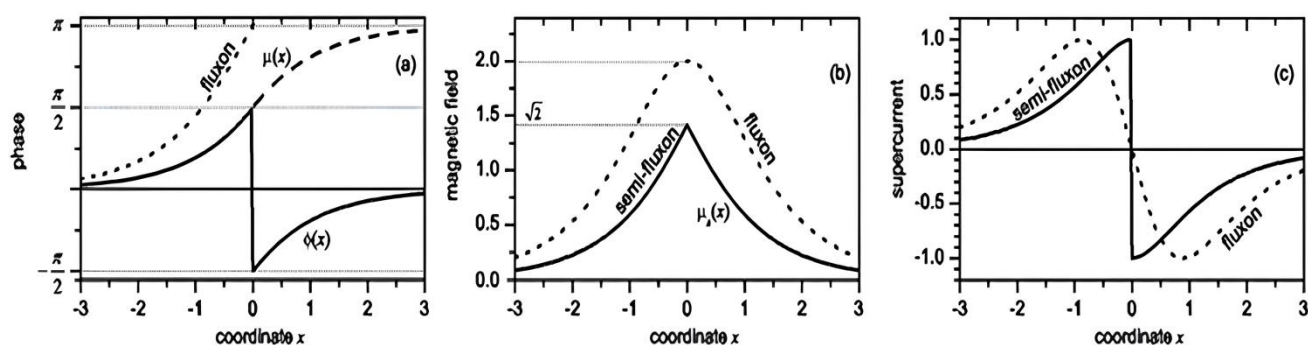


Рисунок 5.1. Распределение разности фаз $\phi_0(x)$, магнитного поля $H(x)$ и сверхтока $j_s(x)$, для флаксона (пунктиром) и полуфлаксона (сплошной линией) внутри РДП [82]

В работах [83, 84] фазовый разрыв формировался с помощью двух инжекторов, которые позволяли пропускать постоянный ток через небольшой участок верхнего электрода РДП. Инжекторы - это тонкие полоски из сверхпроводящего материала шириной Δw , подходящие к

центру РДП; расстояние между полосками Δx . При пропускании небольшого тока I_{inj} через участок верхнего электрода генератора, ограниченного инжекторами, джозефсоновская фаза претерпевает разрыв с образованием полуфлаксона. Чтобы данный разрыв можно было бы считать точечным, требуется, чтобы ширина инжекторов и расстояние между ними в сумме $(2\Delta w + \Delta x)$ были много меньше чем λ_J . При приложении тока смещения I_{bias} , величина которого превышает I_{dpn} – ток депининга, полуфлаксон переворачивается, формируя флаксон, движущийся в направлении одного из краев генератора под действием I_{bias} . При достижении флаксоном края происходит излучение электромагнитной волны. Следующий переворот, теперь уже анти-полуфлаксона, соответствует рождению анти-флаксона, движущегося в сторону противоположного края генератора. Этот процесс повторяется бесконечно, пока значение тока смещения достаточно для переворота полуфлаксона (больше тока депининга). Иллюстрация циклического процесса переворота полуфлаксона представлена на рисунке 5.2 (A - F).

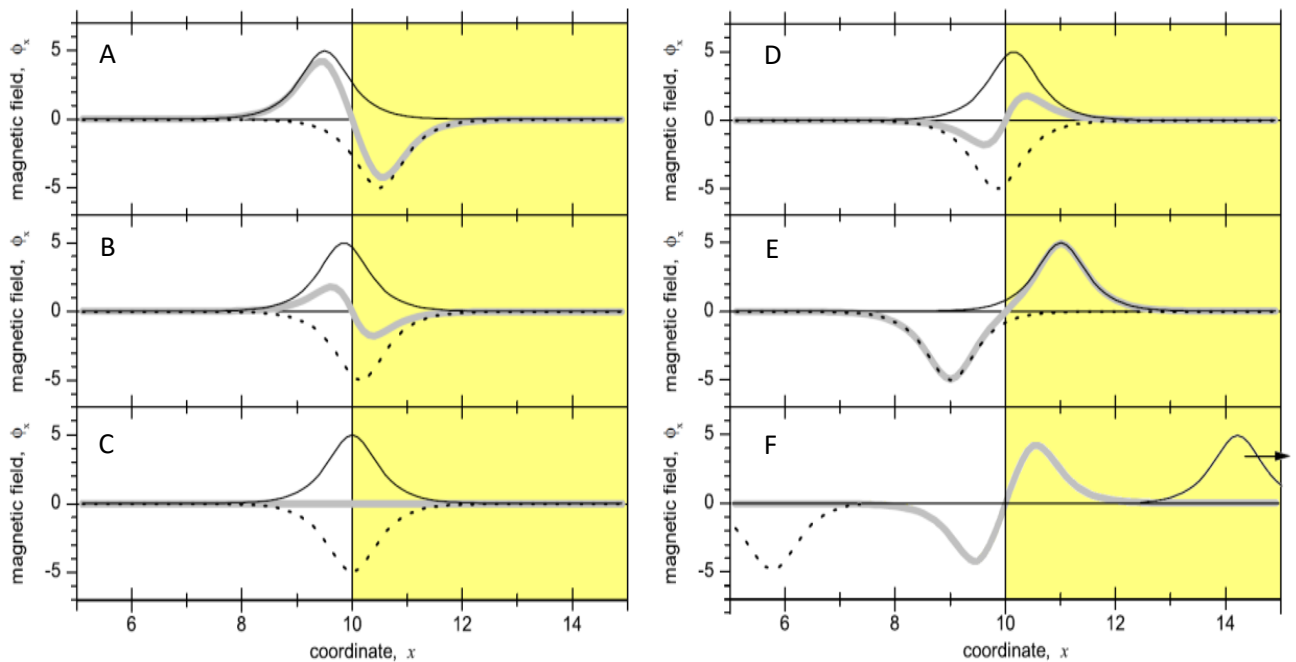


Рисунок 5.2 (A - F) Иллюстрация циклического процесса переворота полуфлаксона (отмечен серой сплошной линией) с последующим излучением флаксона (отмечен черной сплошной линией) в РДП. Рисунок взят из курса лекций Edward Goldobin «Introduction to the fluxon dynamics in Long Josephson junction» для студентов университета города Тюбинген, Германия.

Ток смещения I_{bias} разгоняет флаксоны до скорости Свайхарта c_{sw} и на ВАХ РДП – генератора появляется полуфлаксонная ступень (полуцелая ступень нулевого поля), что свидетельствует о наличии рабочих точек для генерации. Несмотря на то, что такие ступени уже ранее наблюдались экспериментально [81], до настоящего времени не проводились измерения мощности излучения и ширины спектральной линии. Отметим, что подобный способ генерации, во-первых, является необычным для устройств, построенных на РДП, а, во-вторых, открывает возможность создания генераторов - аналогов, без использования внешнего магнитного поля, что является необходимым условием для использования в чувствительных квантовых схемах.

§5.3. Реализация полуфлаксонного генератора с инжекторами тока

Для исследования характеристик полуфлаксонного генератора и измерения спектров его излучения была изготовлена тестовая сверхпроводящая микросхема (см. рисунок 5.4). Как и для всех измерений высокочастотных характеристик сверхпроводящих генераторов в ее основе лежала СВЧ-схема гармонического смесителя. Для связи РДП - генератора и СИС – смесителя использовалась специальная интегральная согласующая структура. Состав и функциональное назначение каждого элемента данной согласующей структуры подробно описан в главе 2 «Технология изготовления образцов и методика проведения эксперимента». Здесь будут приведены только результаты расчетов (выполненного в САПР PTC Mathcad) согласования по мощности между полуфлаксонным генератором и гармоническим СИС - смесителем для конфигурации, представленной на рисунке 2.30 (см. главу 2).

Для расчетов использовались следующие параметры: сопротивление туннельного СИС – перехода в нормальном состоянии $R_n = 30 \Omega$, его площадь $S_{сис} = 1.4 \text{ мкм}^2$, удельная емкость $C_s = 0.085 \text{ пФ/мкм}^2$; толщина нижнего сверхпроводящего электрода генератора, а также базового электрода микрополосковой линии $d_B = 200 \text{ нм}$, толщина диэлектрического слоя линии передачи $H_I = 400 \text{ нм}$, диэлектрическая проницаемость слоя диэлектрика (SiO_2) $\varepsilon = 4.2$, глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник $\lambda_L = 85 \text{ нм}$, выходной импеданс генератора гетеродина $Z_{вых} = 0.95 \Omega$. Результат расчёта показан в виде графика на рисунке 5.3.

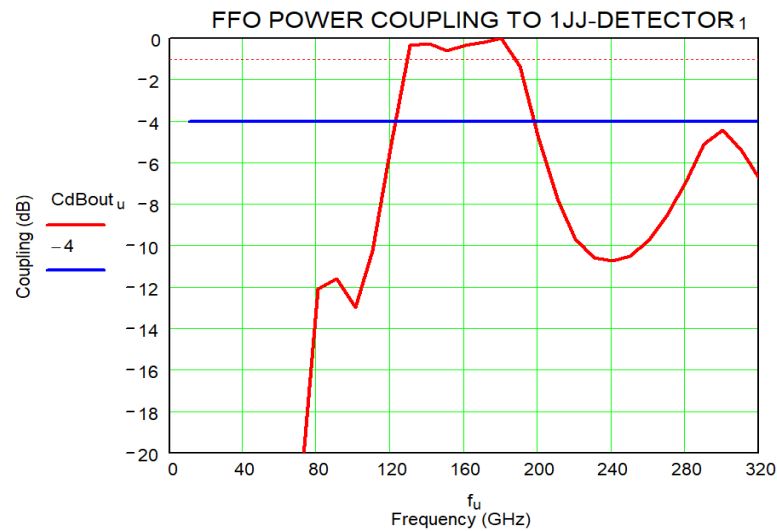


Рисунок 5.3. Фрагмент численного расчета отклика (согласования) по мощности между генератором и гармоническим СИС-смесителем, произведеного в среде PTC Mathcad.

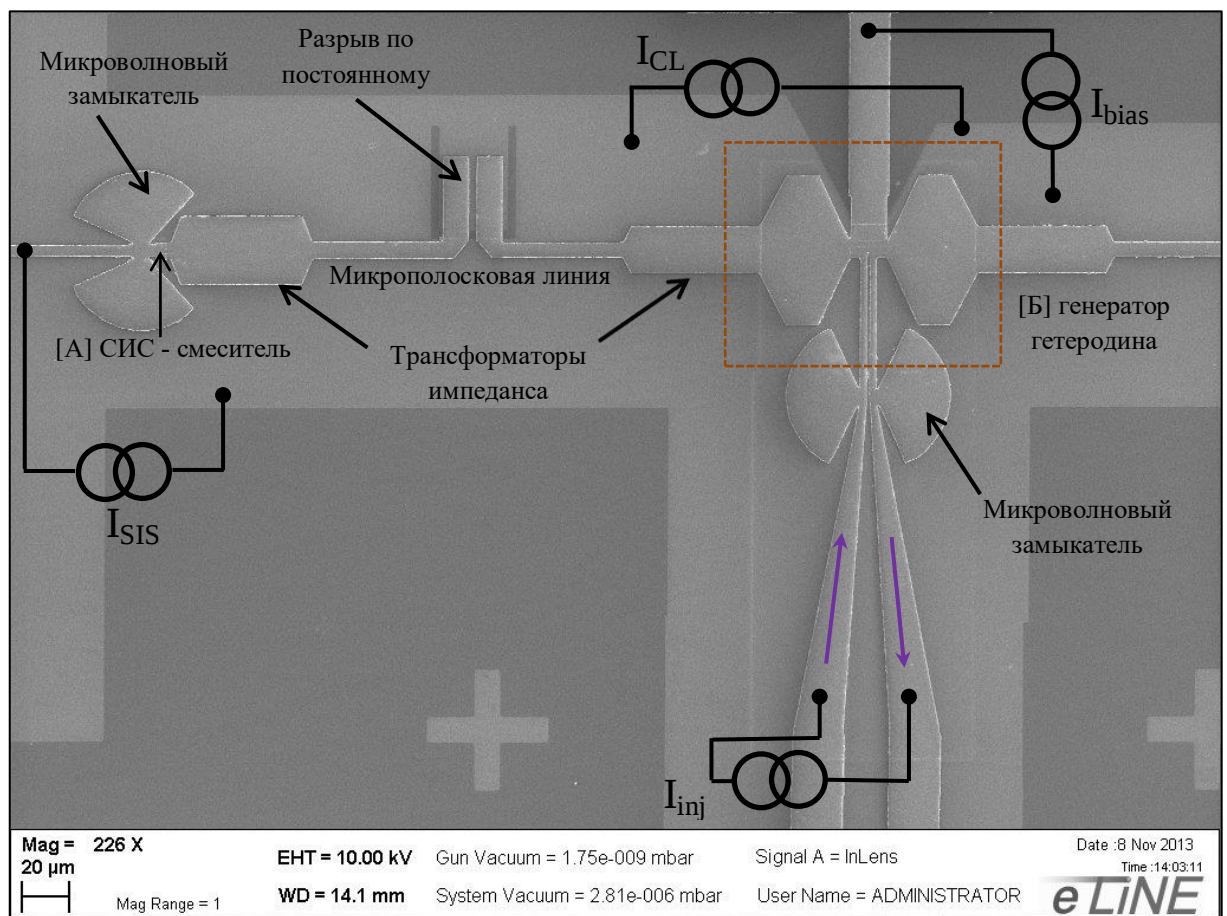


Рисунок 5.4. Фотография СВЧ – микросхемы для экспериментов с полуфлаксонным генератором получена с использованием сканирующего электронного микроскопа.

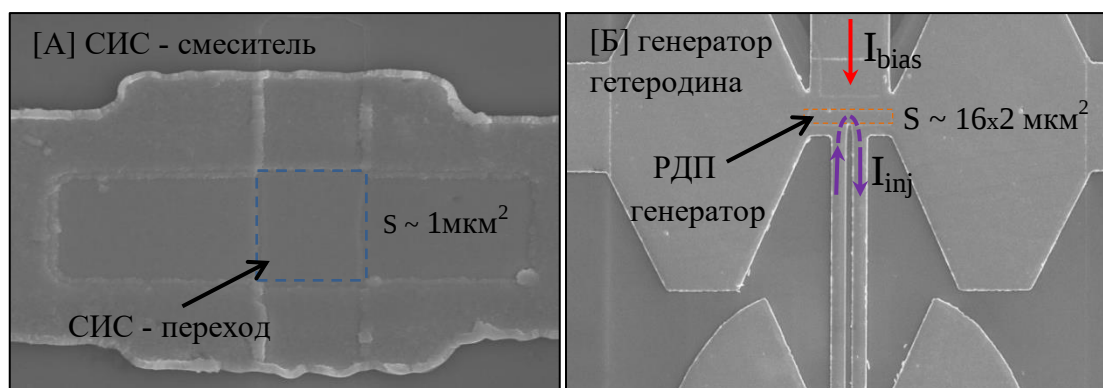


Рисунок 5.5. Фотография СВЧ – микросхемы для экспериментов с полуфлаксоным генератором получена с использованием сканирующего электронного микроскопа [А] - Область СИС – смесителя площадью около 1 мкм^2 , расположенную между микроволновым замыкателем и трансформатором импеданса. Переход изготавливался методом пересечения полос (англ. cross - bar). [Б] – Область РДП – генератора с инжекторами (выполненными в верхнем электроде), подходящими к его центру.

§5.4 Измерения по постоянному току

Тестовые измерения для проверки работоспособности отдельных элементов схемы по постоянному току производились в транспортном сосуде Дьюара с жидким гелием с помощью криогенного зонда – вставки. Функционирование всей сверхпроводящей СВЧ – схемы проверялось в специальном заливном (гелиевом) криостате фирмы Infrared Laboratories. Конструкция криостата и внутреннее электронное оснащение предусматривает фильтрацию полезного сигнала от воздействия помех, тем самым, минимизируя искажения на измеренных характеристиках. Для работы РДП в режиме полуфлаксоного генератора было необходимо провести предварительную калибровку инжекторов по зависимости критического тока джозефсоновского перехода от тока через эти инжекторы (см. рисунок 5.6).

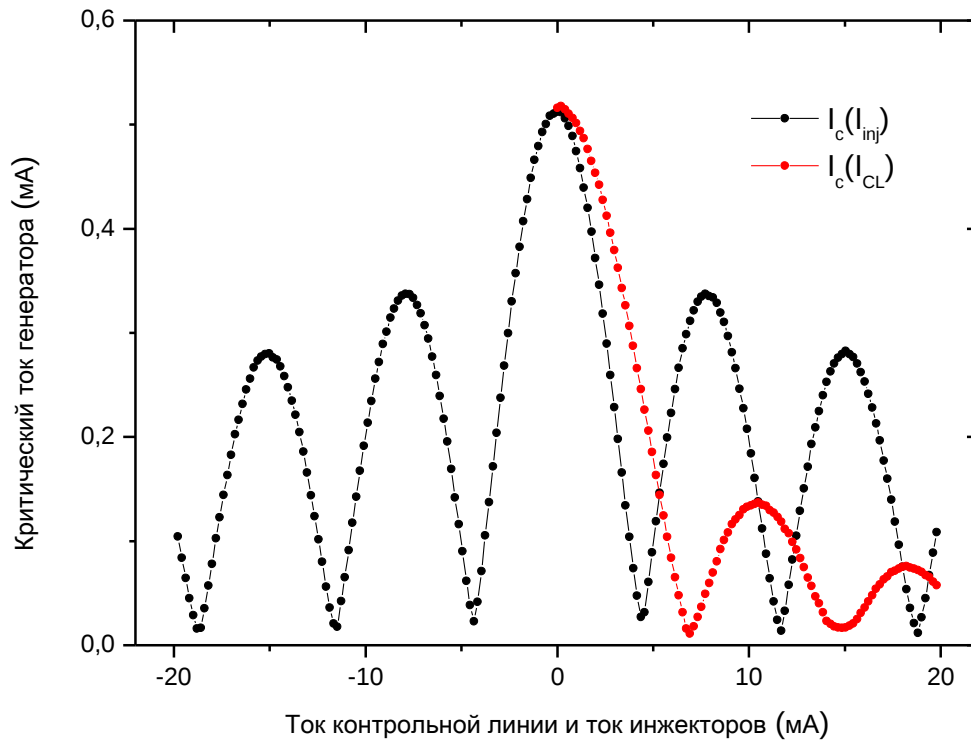


Рисунок 5.6. Зависимость критического тока перехода от тока инжекторов – черная кривая $I_c(I_{inj})$ и зависимость критического тока перехода от внешнего магнитного поля

Измеренная зависимость – функция с периодом соответствующим величине фазового разрыва, π – разрыв, необходимый для создания полуфлаксона (на месте разрыва) реализуется в первом минимуме зависимости, где происходит полное подавление критического тока перехода $I_c(I_{inj_\pi}) \rightarrow 0$. Ненулевое значение критического тока на зависимости $I_c(I_{inj})$ обусловлено распределенным характером самого разрыва, где область между инжекторами характеризуется неопределённым состоянием джозефсоновской фазы. Для проверки однородности протекания тока через РДП измерялась зависимость критического тока перехода от внешнего магнитного поля, которая похожа на зависимость Фраунгофера для сосредоточенного перехода с длиной $L < \lambda_J$.

Следующим шагом было измерение ВАХ генератора с приложенным током через инжекторы, который соответствует разрыву фазы равному π , величина тока I_{inj_π} была определена из предыдущего эксперимента. Вольтамперные характеристики генератора показаны на рисунке 5.7 – автономная и с заданным инжекторным током I_{inj_π} .

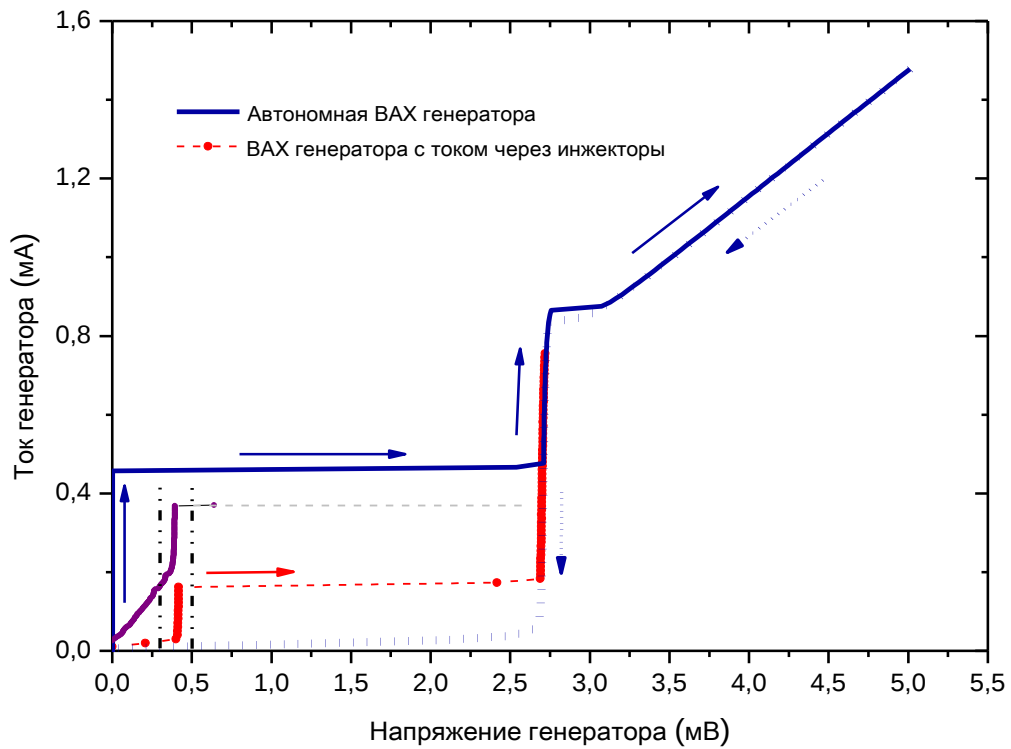


Рисунок 5.7. ВАХ генератора автономная (в прямом направлении тока – сплошной линией и инверсном – точками) и с током через инжекторы $I_{inj} = I_{inj_п}$ – красная кривая. ВАХ шунтированного РДП – фиолетовыми кружками. Штрихпунктирными линиями ограничена область скачка тока (на шунтированной ВАХ) при напряжении, соответствующем первой ступени Фиске.

На графике в районе 400 мВ можно наблюдать вертикальную ступень. Для проведения СВЧ измерений и удобства подстройки рабочей точки генератора переход шунтировался, вследствие чего, ступень генерации смещалась выше по току на несколько сотен мкА (фиолетовая кривая на рисунке 5.7). Так как данный джозефсоновский переход является относительно коротким ($\alpha L < 1$, где α – параметр затухания, αL – нормированная длина) входящая в переход, под действием магнитного поля, электромагнитная волна способна достигнуть противоположного края и вызвать всплеск напряжения, обуславливающий генерацию. В это же время часть электромагнитного излучения способна отразиться и, впоследствии, интерферировать сама с собой, тем самым образуя стоячую волну с набором собственных мод внутри РДП. Как уже упоминалось в Главе 1, процесс синхронизации собственных мод и джозефсоновского тока,

приводит к возникновению Фиске резонансов на ВАХ, где каждая ступень соответствует определённому напряжению, приведем еще раз уравнение (1.5) из Главы 1:

$$V_n = \frac{\Phi_0 \overline{c_{sw}}}{2L} n,$$

где $\overline{c_{sw}}$ – скорость Свайхарта, Φ_0 - квант магнитного потока, L – длина перехода, а n – порядковый номер ступени). Для изготовленного генератора длиной $L = 16$ мкм и скорости Свайхарта в данной геометрии перехода $\overline{c_{sw}} = 6.087 \cdot 10^6$ м/с, напряжение первой резонансной ступени Фиске:

$$V_{FS1} = \frac{2.086 \cdot 10^{-15} \text{ Вб} \cdot 6.087 \cdot 10^6 \text{ м/с}}{2 \cdot 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}} = 0.393 \cdot 10^{-3} \text{ В},$$

что подтверждает резонансную природу особенности, появившейся на ВАХ генератора. Поясним, что геометрия «overlap», на основе которой изготавливается полуфлаксонный РДП - генератор, предусматривает наличие зон перекрытия над слоем изолятора верхнего и нижнего подводящих электродов с образованием так называемых «холостых областей» (англ. idle region), конструктивно представляющих из себя параллельно подсоединенные конденсаторы. Эти конденсаторы вносят заметный вклад в изменение скорости распространения электромагнитной волны внутри перехода.

Для сравнения двух режимов работы генераторов (полуфлаксонного и с использованием внешнего магнитного поля) на аналогичной микросхеме, были проведены измерения по постоянному току. На рисунке 5.8 показаны: ВАХ РДП генератора с резонансной ступенью Фиске, вследствие воздействия внешнего магнитного поля и ВАХ полуфлаксонного генератора с заданным током через инжекторы (величина тока, как и ранее, выбиралась в первом минимуме зависимости $I_c(I_{inj})$, соответствующему разрыву джозефсоновской фазы на величину π). Из графика видно, что обе ступени имеют практически одинаковое напряжение, что показывает одинаковую природу их появления – наличие стоячей волны внутри перехода с выделенными частотами - резонансами Фиске.

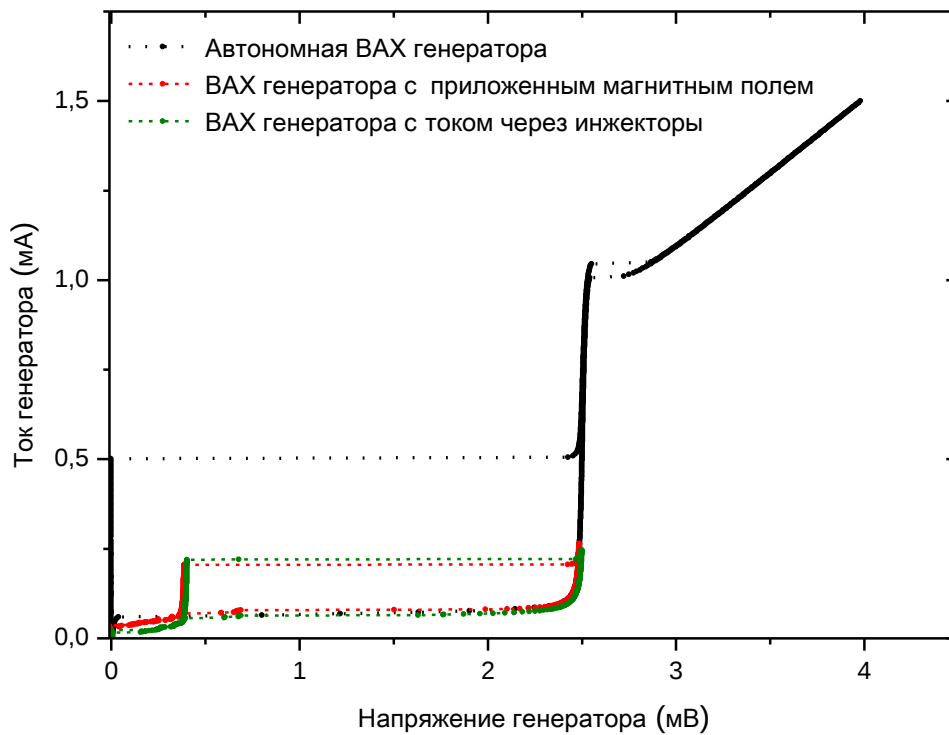


Рисунок 5.8. Автономная ВХ РДП генератора (черными кружками), ВХ РДП в режиме генератора под действием внешнего магнитного поля (красными кружками), ВХ РДП в режиме полуфлаксонного генератора при пропускании постоянного тока через инжекторы (зелеными кружками).

На рисунке 5.9 показана ВХ РДП - генератора с дополнительным шунтированием в области резонансной ступени в более крупном масштабе (данная область ограничена вертикальными штрихпунктирными линиями на рисунке 5.7). На том же графике (правая ось абсцисс) построена зависимость дифференциального сопротивления R_d от напряжения. Поскольку для резонансных ступеней Фиске характерно увеличение дифференциального сопротивления R_d на краях, рабочая точка генератора выбирается ближе к середине вертикальной части ступени – области с минимальным локальным изменением R_d . Стоит отметить, что величина дифференциального сопротивления “традиционного” РДП по току смещения R_d^{bias} и величина R_d^{CL} по току управления магнитным полем, оказывают сильное влияние на ширину линии в спектре его излучения. Однако в случае возбуждения генерации с помощью инжекторов, дифференциальное сопротивление по току управления магнитным полем R_d^{CL} должно быть заменено на подобную величину R_d^{inj} , вклад которой в спектральные

характеристики линии излучения будет минимальным в силу конструктивных особенностей инжекторов и локального воздействия на РДП генератор. Изучение влияния величины R_d^{inj} на ширину линии в спектре излучения полуфлаксонного генератора не входит в данную работу.

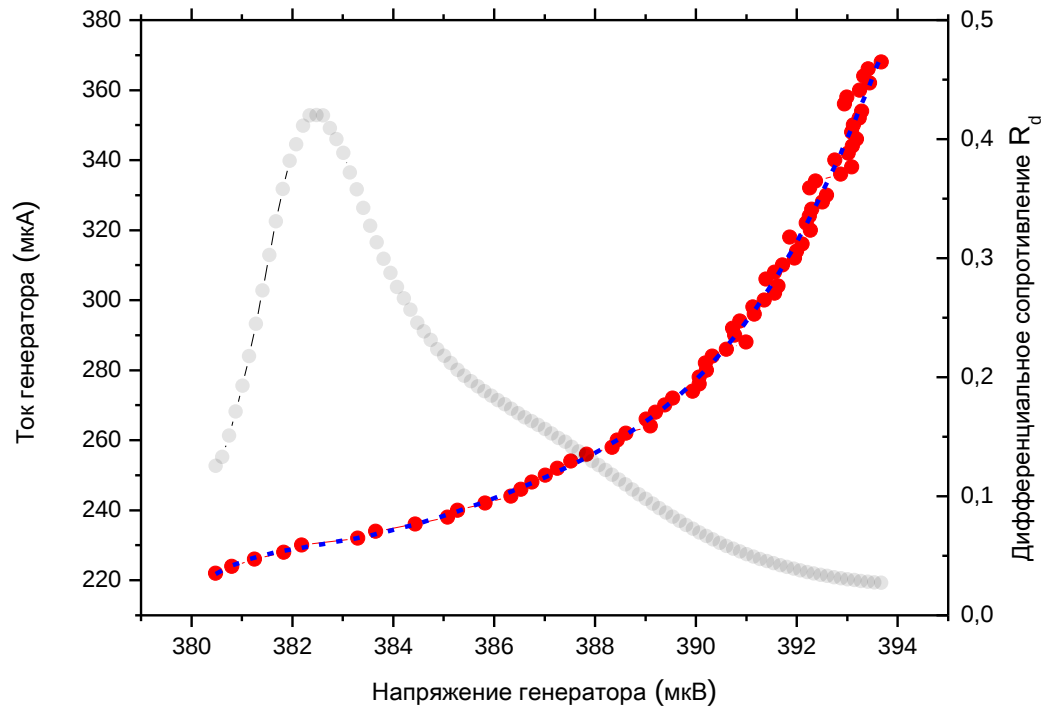


Рисунок 5.9. ВАХ генератора с током через инжекторы (увеличенная область, ограниченная штрихпунктирными вертикальными линиями на рисунке 5.7) — красным, аппроксимация — синим пунктиром; производная по напряжению $R_d(V)$ показана серой кривой.

Итак, установка РДП генератора в рабочую точку соответствует одновременной подаче двух питающих сигналов: I_{inj} — величина тока при которой достигается локальный разрыв джозефсоновской фазы РДП на величину π и I_{bias} в выбранной точке на резонансной ступени. Генерируемое, в результате этого процесса, излучение через согласующий СВЧ — тракт подается на гармонический СИС — смеситель.

На измеренной ВАХ гармонического СИС — смесителя под действием СВЧ — сигнала от генератора, проявляются два типа ступенчатых особенностей, трансформирующих его автономную характеристику — ступени Шапиро и квазичастичные ступени (см. рисунок 5.10). Ступени Шапиро возникают в результате процесса синхронизации джозефсоновской компоненты внешним сигналом РДП генератора на его основной частоте и частотах его

гармоник. Положение ступеней Шапиро на ВАХ определяется непосредственно из соотношения Джозефсона $V_n = n(\hbar f/2e)$. Второй тип ступеней – вынужденное туннелирование квазичастиц под действием внешнего СВЧ – излучения, их положение определяется соотношением $V_n = V_g \pm n(\hbar f/e)$. ВАХ с квазичастичными ступенями называют «накачанной», а её величина определяется областью изменения тока по сравнению с «ненакачанной» ВАХ.

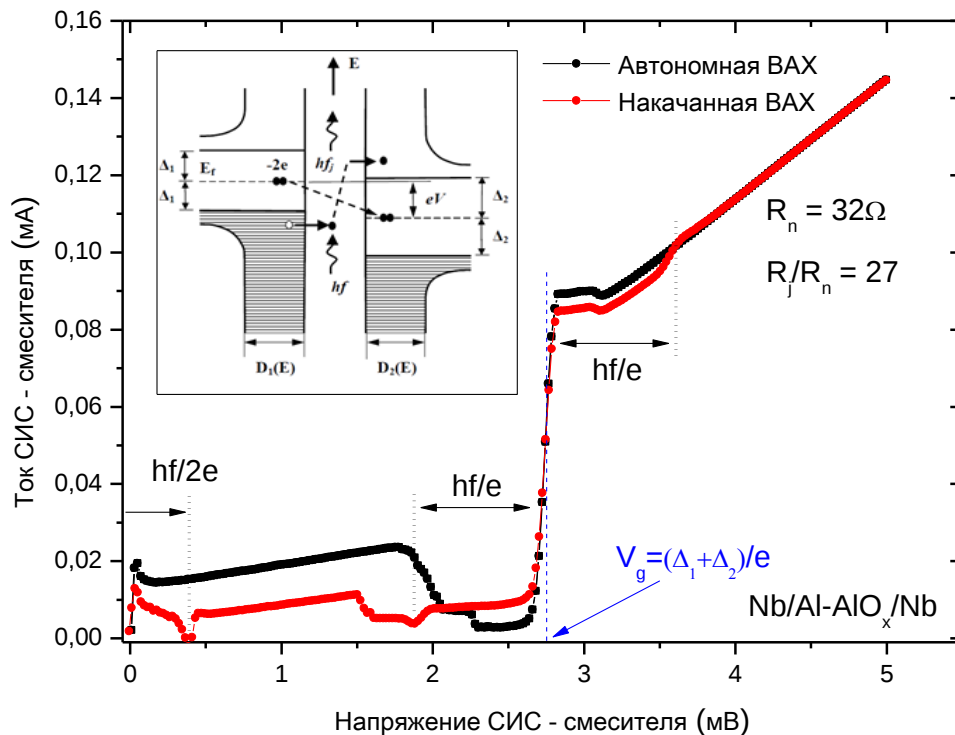


Рисунок 5.10. Автономная и «накачанная» ВАХ гармонического СИС-смесителя. На вставке в левом углу графика показана диаграмма процесса вынужденного туннелирования квазичастиц под действием энергии фотонов $\hbar f$ для туннельного сверхпроводящего перехода под действием внешнего СВЧ излучения.

На данном этапе проводились калибровочные измерения зависимости величины тока накачки ΔI (индуцированное изменение подщелевого туннельного тока при напряжении 2.5 мВ) от приложенного СВЧ – сигнала. Значение величины накачки ставилось в соответствие каждой из рабочих точек расположенных вдоль резонансной ступени Фiske на ВАХ генератора. На рисунке 5.11, показана ВАХ РДП в области ступени генерации с дополнительной цветовой шкалой, соответствующей величине отклика гармонического СИС – смесителя под

воздействием СВЧ – сигнала от генератора. Величина отклика выражается в процентах из отношения индуцированного изменения тока ΔI к величине скачка тока на щели I_g : $\Delta I / I_g \cdot 100$. Как показано в работе [85] величина отношения в 7 - 10% (оранжевый и красный цвет на шкале) соответствует достаточной прикладываемой мощности сигнала от генератора для нормальной работы гармонического СИС – смесителя. Эта область располагается на краю резонансной ступени с самым низким значением дифференциального сопротивления R_d и соответствует напряжениям выше 392 мВ.

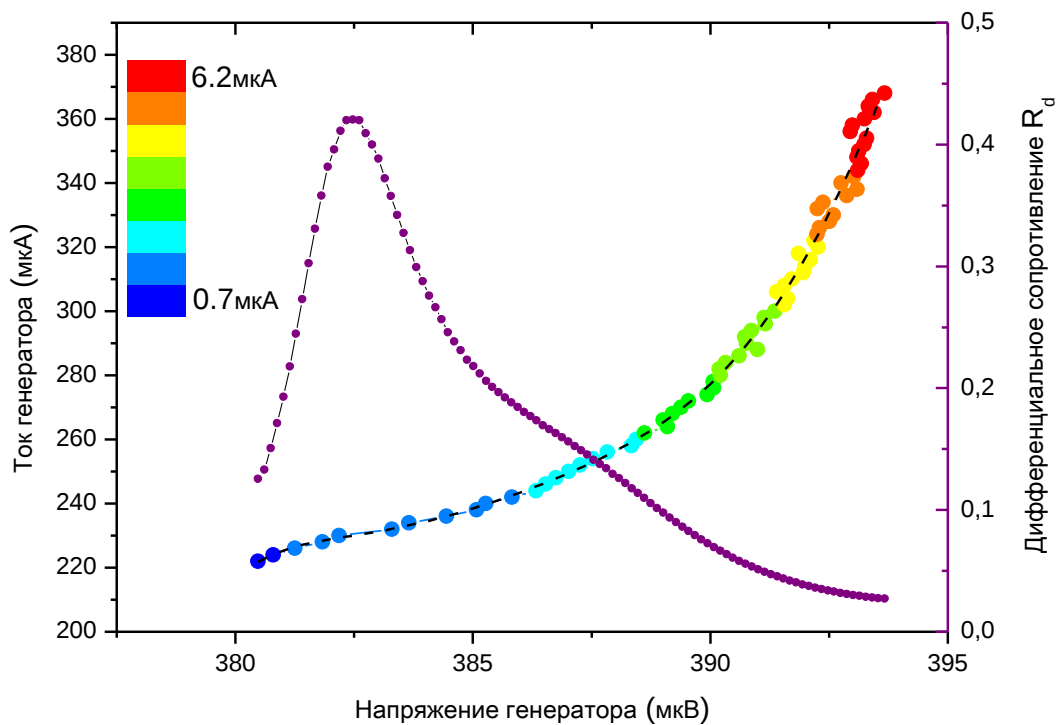


Рисунок 5.11. ВАХ РДП в области резонансной ступени Фiske с дополнительной цветовой шкалой, демонстрирующей уровень накачки гармонического СИС – смесителя на рабочих точках генератора – левая ось. Правая ось - зависимость $R_d(V)$ для данной ступени генерации

Следует отметить, что для РДП - генератора с интегрированной линией управления магнитным полем, на его ВАХ реализуется широкий по напряжению массив резонансных ступеней Фiske, частично перекрывающихся друг друга (см. главу 4 “Перестраиваемый генератор гетеродина”). Тем самым реализуется возможность плавной перестройки частоты генерации с достаточно узкой спектральной линией в широком диапазоне, даже с учетом роста R_d на краях ступеней. В рамках данной работы не стояло задачи реализации широкополосного

генератора, в связи с этим, необходимым условием было исследование диапазона генерации (на одной ступени Фиске) в рассчитанном диапазоне согласования передающей линии между генератором и смесителем.

§5.5. СВЧ – измерения

Эксперименты по регистрации линии излучения полуфлаксона генератора производились в гелиевом криостате, оснащённом системой частотной и фазовой стабилизации исследуемого генератора, а также рядом широкополосных (100 – 800 МГц) усилителей промежуточной частоты (ПЧ) работающих при гелиевой и комнатной температурах. Подробное описание измерительного стенда и оборудования представлено в Главе 2.

Используя ВАХ генератора (рисунок 5.11 - область ступени в крупном масштабе с цветовой шкалой, соответствующей величине воздействия на гармонический СИС – смеситель, ВАХ которого изображена на рисунке 5.10), на резонансной ступени выбиралась серия рабочих точек, на которых уровень сигнала, приходящего на гармонический СИС – смеситель был достаточным для его работы. Рабочий диапазон по току смещения генератора I_{bias} лежал в пределах 320 – 370 мкА, и соответствовал по цветовой шкале оранжевому и красному цвету. Ток через инжекторы на этапе получения спектра излучения полуфлаксона генератора был фиксированным и соответствовал величине $I_{inj} = 3.83$ мА. С помощью лабораторного СВЧ – синтезатора на вход гармонического СИС – смесителя подавался сигнал на частоте 10 – 12 ГГц. В силу нелинейности нагрузки (туннельный джозефсоновский переход), на смесителе реализуется набор гармоник основного сигнала синтезатора. Частота опорного сигнала подбиралась из расчёта, чтобы его N - гармоника была близка к частоте сигнала от РДП – генератора.

При токе смещения $I_{bias} = 342$ мкА частота генерации составляла примерно 197 ГГц. Таким образом, сигнал на основной частоте от РДП – генератора смешивался на СИС – переходе с 16 – ой гармоникой опорного сигнала частотой 12.283 ГГц. Полученный после перемножения двух частот сигнал на промежуточной (разностной) частоте примерно равной 400 МГц, после усиления поступал на вход лабораторного спектроанализатора. Визуальный поиск преобразованной вниз по частоте спектральной линии излучения полуфлаксона генератора не представлял из себя сложной задачи благодаря широкой полосе пропускания ПЧ – тракта, которая составляла 100 – 1000 МГц. Далее путем подстройки тока генератора в пределах доступного рабочего диапазона, подстройки рабочей точки по напряжению гармонического СИС – смесителя в области первой квазичастичной ступени (ВАХ

гармонического СИС – смесителя при напряжении 2.5 мВ на рисунке 5.10) и мощности сигнала опорного синтезатора в диапазоне $-30 - 0$ дБм достигались условия для получения максимальной эффективности преобразования частоты – максимальной амплитуды сигнала на ПЧ.

Далее в петлю обратной связи питания генератора подключалась система частотной стабилизации (ЧС) для минимизации воздействия медленных технических флуктуаций и внешних наводок, приводящих к дрейфу и колебаниям спектральной линии излучения. В результате подбора оптимальных параметров системы, ширина линии излучения генератора с инжекторами в режиме ЧС, визуально наблюдаемая на экране спектроанализатора, составляла 1 - 10 МГц. На следующем шаге проводилась процедура усреднения спектральной линии в узкой полосе частот шириной 100 МГц. Вид преобразованных вниз по частоте спектров излучения в режиме ЧС, полученных при разных токах I_{bias} в диапазоне 338 – 345 мкА (на участке ВАХ с достаточной накачкой вдоль ступени генерации), показан на рисунке 5.12.

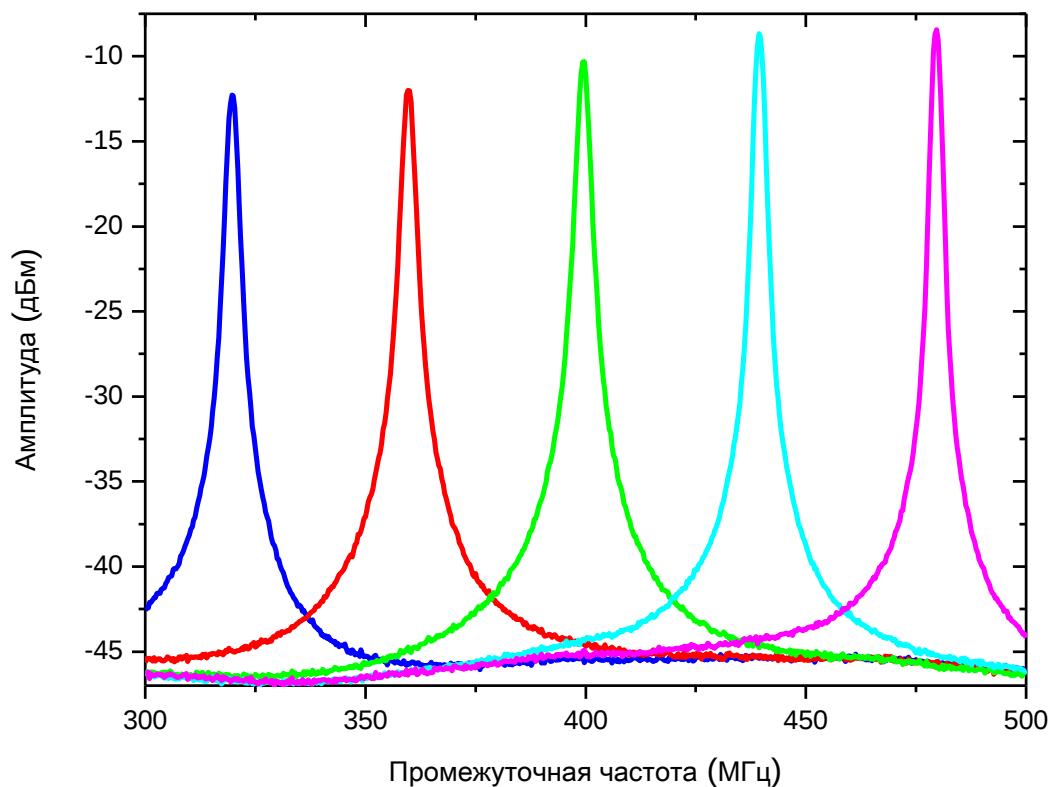


Рисунок 5.12. Спектры излучения полуфлаксона генератора при разных токах смещения, расположенных на резонансной ступени $I_{bias} = 338 - 345$ мкА. Каждая кривая усреднялась при помощи спектроанализатора, а затем записывалась на компьютер.

Для центрального спектра на графике частота генератора составляла 197 ГГц при токе смещения $I_{bias} = 342$ мкА и токе через инжекторы $I_{inj} = 3.83$ мА. Форма спектральной линии близка к Лоренцевской, ширина линии излучения в режиме АЧС составила 1.8 МГц, отношение сигнал/шум: 35.5 дБ.

На рисунке 5.13 показаны преобразованные вниз по частоте спектры излучения РДП - генератора, работающего в разных режимах: под воздействием внешнего магнитного поля (флаксонный генератор) и при пропускании тока через инжекторы (полуфлаксонный генератор). Оба полученных спектра имеют лоренцеву форму, близкие значения ширины линии и отношения сигнал/шум.

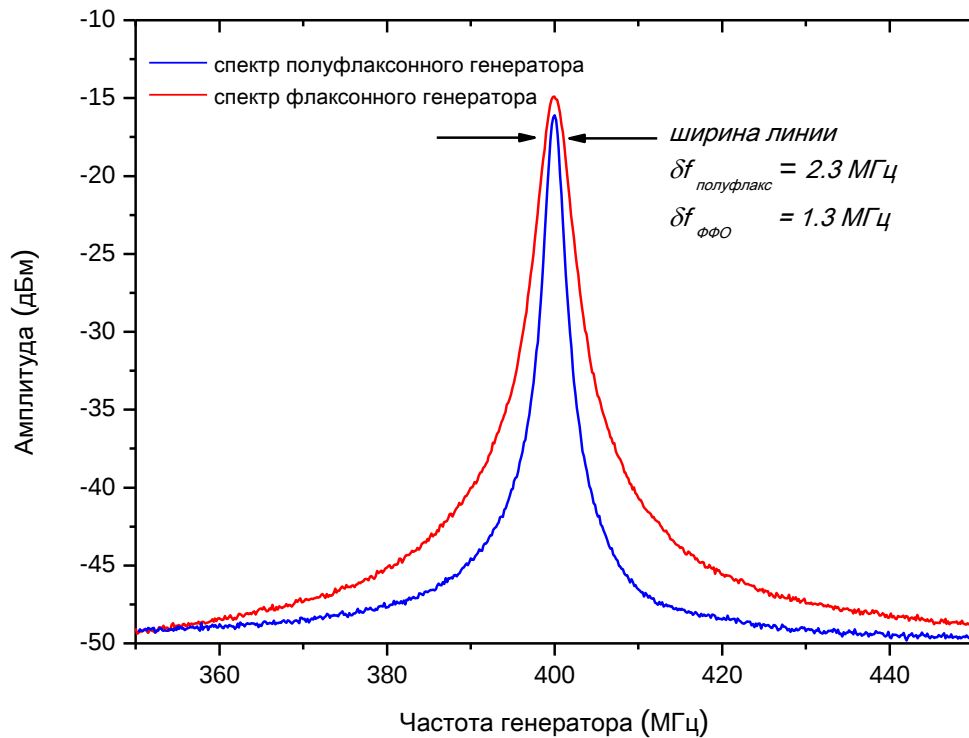


Рисунок 5.13. Преобразованные вниз по частоте спектры излучения полуфлаксонного и флаксонного генераторов в режиме частотной стабилизации.

Для синхронизации полуфлаксонного генератора с опорным синтезатором со стабилизацией по фазе использовалась система ФАПЧ. На рисунке 5.14 показан преобразованный вниз по частоте спектр сигнала от генератора перестроенный на частоту

209.5 ГГц (при помощи тока смещения $I_{bias} = 245$ мкА и тока через инжекторы $I_{inj} = 3.84$ мА): черным – частотная стабилизация сигнала, красным – режим ФАПЧ. Ширина линии излучения в режиме ФАПЧ составила 0.7 МГц относительно опорного генератора и определялась величиной разрешения полосы пропускания (RBW) спектроанализатора. Также для фазово - синхронизированной спектральной линии полуфлаксонного генератора вычислялся параметр спектрального качества (СК) – процент мощности сконцентрированной в центральном пике к полной мощности излучения генератора, он составил 95.7%. Соотношение сигнал - шум (SNR) — это безразмерная величина, равная отношению мощности полезного сигнала к мощности шума 34.1 дБ.

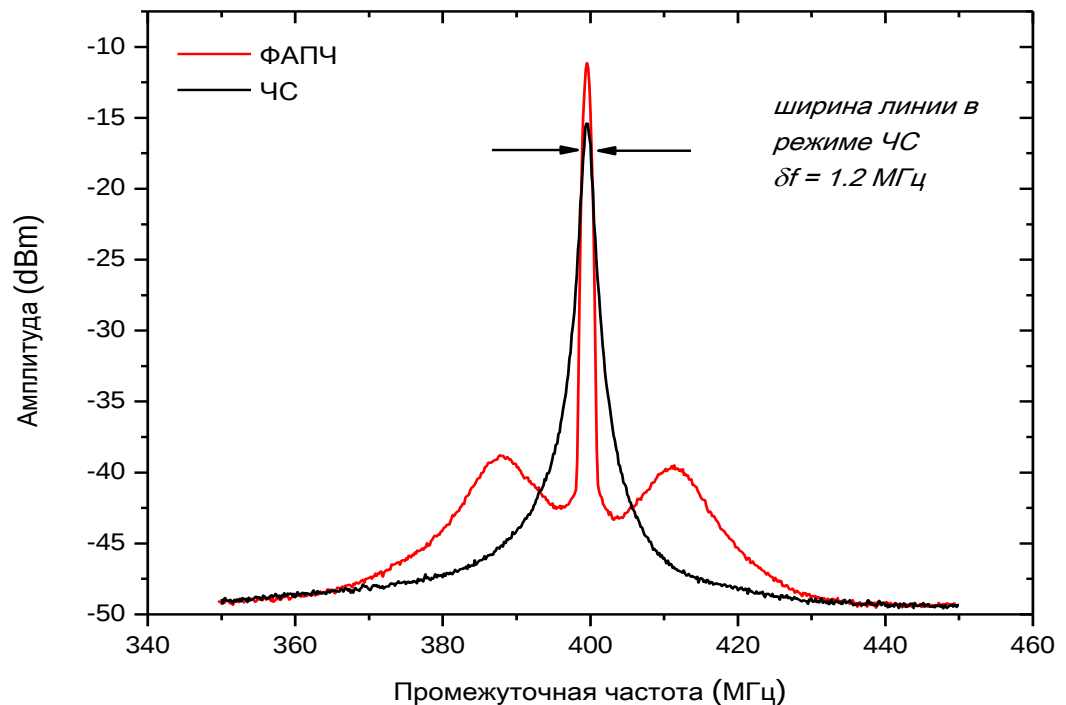


Рисунок 5.14. Преобразованные вниз по частоте спектры излучения РДП – генератора с инжекторами на частоте 209.5 ГГц Частотная стабилизация (черная кривая). Режим фазовой стабилизации (красная кривая).

Для дальнейшего исследования свойств РДП генератора с инжекторами, было предложено провести серию измерений спектров излучения при изменении тока инжекторов I_{inj} . Ток смещения генератора I_{bias_gen} , соответствующий одной из рабочих точек на

резонансной ступени, оставался постоянным. На рисунке 5.15 показана зависимость ширины спектральной линии РДП – генератора в режиме частотной стабилизации от величины тока задаваемой через инжекторы I_{inj} при постоянном токе смещения генератора $I_{bias_gen} = 340$ мкА.

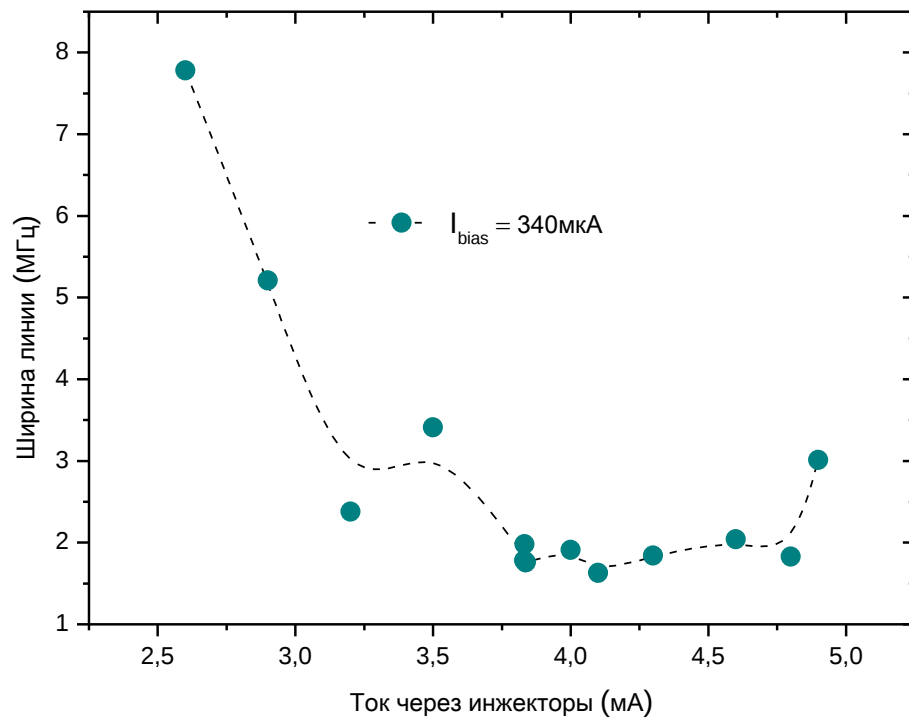


Рисунок 5.15. График зависимости ширины линии излучения на ступени от тока инжектора I_{inj} при токе смещения $I_{bias} = 340$ мкА (точки на графике соединены линиями для наглядности).

Изменение величины тока через инжекторы в области первого минимума зависимости $I_c(I_{inj})$ (аналогичной изображенной на рисунке 5.6) приводит к изменению положения резонансной ступени на ВАХ генератора вдоль оси напряжений. Стоит отметить, что сдвиг резонансной ступени происходит не только в горизонтальном направлении - в сторону более низких/высоких напряжений (частот), но и в сторону с более низкими/высокими токами I_{bias} . При фиксированном токе смещения генератора это приводит к сдвигу рабочей точки к краю резонансной ступени с характерным ростом дифференциального сопротивления R_{d_bias} и соответствующим уширением спектральной линии. Полученные значения ширины линии излучения является типичным для геометрических резонансов.

На рисунке 5.16 представлена зависимость ширины линии излучения генератора от тока смещения I_{bias} при фиксированном токе через инжекторы $I_{inj} = 3.83$ мА. Изменение тока смещения генератора соответствует движению рабочей точки вдоль выбранной резонансной ступени на ВАХ.

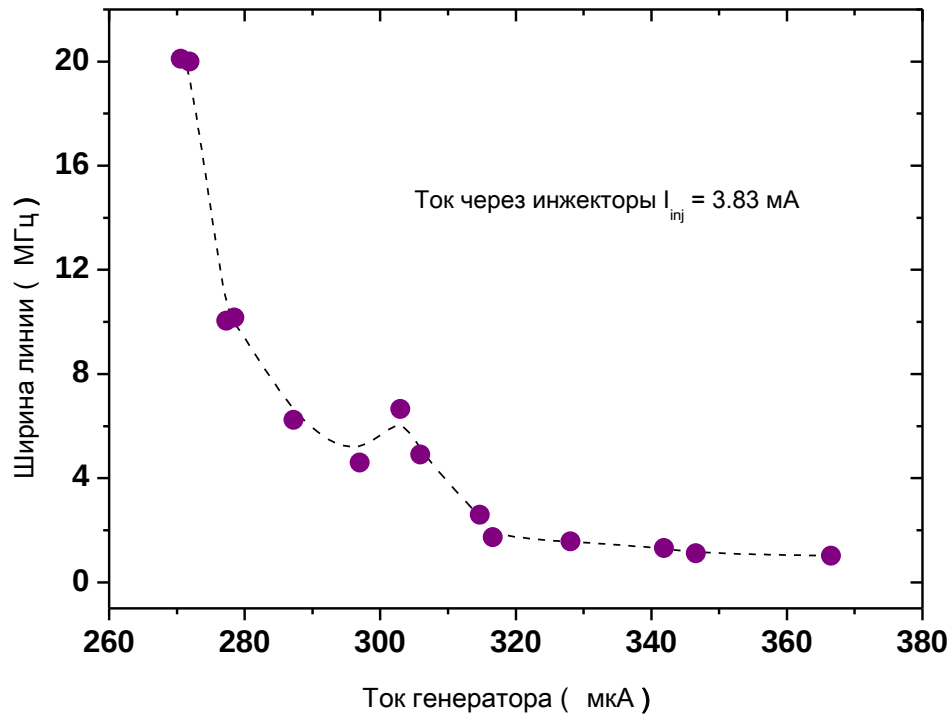


Рисунок 5.16. График зависимости ширины линии излучения генератора от тока смещения I_{bias} , измеренный при токе через инжекторы $I_{inj} = 3.83$ мА (экспериментальные точки соединены линиями для наглядности).

При токе $I_{bias} = 303$ мкА было замечено локальное уширение линии излучения (рисунок 5.16), появление которого не связано с увеличением дифференциального сопротивления в этой области на ВАХ генератора (как будет показано далее на рисунке 5.17). Характер полученной зависимости демонстрирует сужение линии генерации на краю ступени Фиске.

Как уже описывалось в главе 2, существует способ с высокой точностью определять напряжение приложенное к РДП–генератору из фундаментального джозефсоновского соотношения (1.10). Таким образом, следующий эксперимент состоял в получении на экране спектроанализатора линии генерации в выбранных оператором рабочих точках и записью

приращения частоты при перестройке на следующую точку. На рисунке 5.17 показана ВАХ генератора в области резонансной ступени с рассчитанной величиной напряжения.

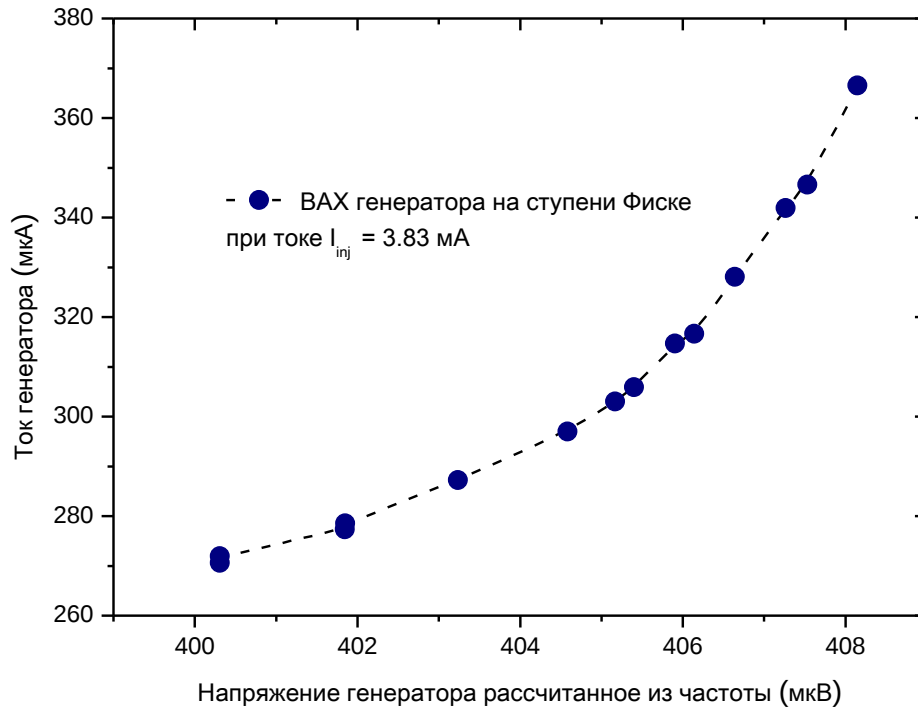


Рисунок 5.17. *ВАХ генератора* в области резонансной ступени, ток через инжекторы $I_{inj} = 3.83$ мА.

Проведенные эксперименты основаны на перестройке генератора в доступном диапазоне частот – рабочие точки на единственной резонансной ступени. Узкая полоса частот ~ 4 ГГц является следствием резкости ступеней – быстро растущим дифференциальным сопротивлением при движении вдоль нее. Отметим, что указанное свойство является дополнительным подтверждением резонансного характера ступеней. Таким образом, данный тип генераторов на этапе проектировки рассчитывается на заданную частоту генерации с возможностью небольшой (порядка $\pm 25\%$ от центральной частоты) подстройки.

§5.6. Выводы по главе

Впервые были проведены исследования выходной мощности, ширины, фазовой и частотной стабилизации линии генерации джозефсоновского генератора с инжекторами, основанного на создании разрыва фазы внутри перехода. Продемонстрирована возможность перестройки частоты такого генератора. Проведенные исследования показали, что генератор с инжекторами позволяет получать стабильное узкополосное излучение диапазона 100 - 300 ГГц шириной ~ 1 МГц и спектральным качеством $> 95\%$ в режиме фазовой автоподстройки частоты.

Основные результаты исследований, описанные в данной главе опубликованы в работах автора: [A1], [A2], [A3], [A11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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: Nb/Al-AlO_x/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 кА/см². 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 кА/см²) 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 малощумящих 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.

Личный вклад автора

Работы были выполнены М.Е. Парамоновым в соавторстве с сотрудниками ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. М.Е. 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 полуфлаксонального 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 М.Е. 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 полуфлаксонального 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.

Список работ автора

- A1. 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. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4864320>
- A2. 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.
- A3. Парамонов М.Е., Голдобин Э.Б., Кошелец В.П. Измерение ширины линии джозефсоновского генератора с инжекторами //Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №. 7. – С. 4-4.
- A4. Рудаков К.И., Парамонов М.Е., Дмитриев П.Н., Барышев А.М., Худченко А.В., Кошелец В.П. Определение высокочастотных параметров сверхпроводниковых планарных структур //Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61. – №. 12. – С. 1220-1224 (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)
- A5. Парамонов М. Е., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Фоминский М.Ю., Кошелец В.П. Определение параметров туннельных барьеров сверхпроводящих туннельных структур для приемников субмиллиметрового диапазона //Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – №. 10. – С. 1029-1033 (Paramonov M. E. et al. 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.)
- A6. 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 (Paramonov M. E. et al. Parameters of the Tunnel Barrier of Superconducting Niobium-Based Structures //Physics of the Solid State. – 2020. – Т. 62. – С. 1534-1538.)
- A7. 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.
- A8. 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.

- A9. 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 (Chekushkin A.M., Paramonov M.E., Koshelets V.P. Adjusting the Parameters of the Tunnel Barrier of the SIS Junction by Varying the Composition of the Top Electrode // Physics of the Solid State. – 2024. – Т. 66. – С. 1009-1013.)
- A10. 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.
- A11. 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.
- A12. 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.
- A13. 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.
- A14. 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.
- A15. 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.
- A16. 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.
- A17. М.Е. 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.

Благодарности

Выражаю искреннюю благодарность своему научному руководителю Кошельцу Валерию Павловичу за неоценимую помощь, поддержку и мудрое руководство на всех этапах работы над диссертацией. Ваши профессиональные советы, терпение и вдохновение стали для меня важным ориентиром в научной деятельности. Особая благодарность научному коллективу лаборатории 234 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, в частности: Тарасову М.А., Ермакову А.Б., Филиппенко Л.В., Фоминскому М.Ю., Худченко А.В., Киневу Н.В., Чекушкину А.М., Юсупову Р.А., Хану Ф.В., ее бывшим сотрудникам: Дмитриеву П.Н., Торгашину М.Ю., Калашникову К.В., Киселеву О.С., а также аспирантам и студентам лаборатории за плодотворное сотрудничество, ценные замечания и создание творческой и дружественной атмосферы, способствующей развитию моих исследований. Ваши знания, опыт, трудолюбие и преданность общему делу стали важной частью этой работы!

Отдельные слова благодарности хочу выразить своей семье. Моей любимой жене Ксении — за бесконечное терпение, поддержку и вдохновение, которые она дарит мне каждый день. Моим родителям — за вашу бесконечную любовь и поддержку. Моим детям: Варваре, Ивану и Илье — за радость, которую вы приносите в мою жизнь, и за понимание, когда я был занят работой. Без вашей любви и заботы этот путь был бы намного сложнее.

Спасибо всем, кто помогал мне на этом пути!

Список используемой литературы

1. Интернет-ресурс [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Электромагнитная пропускная способность атмосферы.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Электромагнитная_пропускная_способность_атмосферы.svg) (доступен март 2025)
2. Матвеев Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиоинтерферометре с большой базой //Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1965. – Т. 8. – №. 4. – С. 651-654.
3. Интернет-ресурс <https://galspace.spb.ru/index62-8.html> (доступен март 2025)
4. Интернет-ресурс <https://millimetron.ru/> (доступен март 2025)
5. Интернет-ресурс <https://markimicrowave.com/technical-resources/white-papers/mixer-basics-primer/> (доступен март 2025)
6. Vernon F. L., Millea M. F., Bottjer M. F., Silver A. H., Pedersen R. J., McColl M. The super-Schottky diode //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1977. – Т. 25. – №. 4. – С. 286-294.
7. Kerr A. R., Pan S. K., Lyons W. G. The genesis of SIS mixers-the legacy of John Tucker in radio astronomy //2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – IEEE, 2015. – С. 1-4.
8. Tucker J. Quantum limited detection in tunnel junction mixers //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1979. – Т. 15. – №. 11. – С. 1234-1258.
9. Tucker J. R., Feldman M. J. Quantum detection at millimeter wavelengths //Reviews of Modern Physics. – 1985. – Т. 57. – №. 4. – С. 1055.
10. Richards P. L., Shen T. M., Harris R. E., Lloyd F. L. Quasiparticle heterodyne mixing in SIS tunnel junctions //Applied Physics Letters. – 1979. – Т. 34. – №. 5. – С. 345-347.
11. Kerr A. R., Feldman M. J., Pan S. K. Receiver noise temperature, the quantum noise limit, and the role of the zero-point fluctuations //Proc. of the 8th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. – 1997. – С. 101-111.
12. Шитов С. В. Интегральные устройства на сверхпроводниковых туннельных переходах для приемников миллиметровых и субмиллиметровых волн : дис. – Институт радиотехники и электроники Российской академии наук, 2003.
13. A. Karpov, J. Blondell, M. Voss, K.H. Gundlach. IEEE Transact. Appl. Supercond. -1995. - №5. – С. 3304.
14. B.D. Jackson, G.de Lange, T. Zijlstra, M. Kroug, J.W. Kooi, J.A. Stern, T.M. Klapwijk. IEEE Transact. Microw. Theory Techn. MTT-54. – 2006. - № 2. С. 547.
15. A. Karpov, D. Miller, F. Rice, J.A. Stern, B. Bumble, H.G. LeDuc, J. Zmuidzinas. IEEE Transact. Appl. Supercond. -2007. - № 17. С. 343.

16. A.M. Baryshev, R. Hesper, F.P. Mena, T.M. Klapwijk, T.A. Van Kempen, M.R. Hogerheijde, J. Barkhof. *Astronomy Astrophys.* – 2015. – Т. 577. – С. A129.
17. A. Khudchenko, A.M. Baryshev, K.I. Rudakov, P.M. Dmitriev, R. Hesper, L. de Jong, V.P. Koshelets. *IEEE Transact. Terahertz. Sci. Technol.* – 2016. – Т. 5. - №1. – С. 127.
18. Интернет-ресурс https://laser-portal.ru/content_731 (доступен март 2025)
19. Интернет-ресурс <https://iopscience.iop.org/article/10.10> (доступен март 2025)
20. Интернет-ресурс <https://herschel.jpl.nasa.gov/hifiInstru> (доступен март 2025)
21. Golubov A. A., Malomed B. A., Ustinov A. V. Radiation linewidth of a long Josephson junction in the flux-flow regime // *Physical Review B.* – 1996. – Т. 54. – №. 5. – С. 3047.
22. Ustinov A. V., Kohlstedt H., Henne P. Giant radiation linewidth of multifluxon states in long Josephson junctions // *Physical review letters.* – 1996. – Т. 77. – №. 17. – С. 3617.
23. Koshelets V. P., Shitov S. V., Shchukin A. V., Filippenko L. V., Mygind J., Ustinov A. V. Self-pumping effects and radiation linewidth of Josephson flux-flow oscillators // *Physical Review B.* – 1997. – Т. 56. – №. 9. – С. 5572.
24. Hasselberg L. E., Levinsen M. T., Samuelsen M. R. Theories of subharmonic gap structures in superconducting junctions // *Physical Review B.* – 1974. – Т. 9. – №. 9. – С. 3757.
25. Maezawa M., Aoyagi M., Nakagawa H., Kurosawa I., Takada S. Observation of Josephson self-coupling in Nb AlO_x Nb tunnel junctions // *Physical Review B.* – 1994. – Т. 50. – №. 13. – С. 9664.
26. Werthamer N. R. Nonlinear self-coupling of Josephson radiation in superconducting tunnel junctions // *Physical Review.* – 1966. – Т. 147. – №. 1. – С. 255.
27. Киселев О. С. Исследование основных характеристик и разработка алгоритмов управления сверхпроводниковым интегральным приемником. – диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04. 03-«Радиофизика» в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2011.
28. Кинев Н. В. Генерация и прием ТГц излучения с использованием сверхпроводниковых интегральных устройств. – диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04. 03-«Радиофизика» в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2012.
29. Pankratov A. L. Form and width of the spectral line of a Josephson flux-flow oscillator // *Physical Review B.* – 2002. – Т. 65. – №. 5. – С. 054504.
30. 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* . – 2001. – Т. 14. – №. 12. – С. 1040.

31. Dueholm B., Levring O. A., Mygind J., Pedersen N. F., Soerensen O. H., Cirillo M. Multisoliton excitations in long Josephson junctions //Physical Review Letters. – 1981. – Т. 46. – №. 19. – С. 1299.
32. Joergensen E., Koshelets V. P., Monaco R., Mygind J., Samuelsen M. R., Salerno M. Thermal fluctuations in resonant motion of fluxons on a Josephson transmission line: Theory and experiment //Physical Review Letters. – 1982. – Т. 49. – №. 15. – С. 1093.
33. Sørensen M. P., Parmentier R. D., Christiansen P. L., Skovgaard O., Dueholm B., Joergensen E., Samuelsen M. R. Magnetic field dependence of microwave radiation in intermediate-length Josephson junctions //Physical Review B. – 1984. – Т. 30. – №. 5. – С. 2640.
34. S. Morohashi, S. Hasuo, Experimental investigations and analysis for high-quality Nb/Al-AlO_x/Nb Josephson junctions //Journal of applied physics. – 1987. – Т. 61. – №. 10. – С. 4835-4849.
35. Imamura T., Shiota T., Hasuo S. Fabrication of high quality Nb/AlO_x/sub x/-Al/Nb Josephson junctions. I. Sputtered Nb films for junction electrodes //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2002. – Т. 2. – №. 1. – С. 1-14.
36. Imamura T., Hasuo S. Fabrication of high quality Nb/AlO_x/sub x/-Al/Nb Josephson junctions. II. Deposition of thin Al layers on Nb films //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 1992. – Т. 2. – №. 2. – С. 84-94.
37. V.P. Koshelets, S.A. Kovtonyuk, I.L. Serpuchenko, L.V. Filippenko, and A.V. Shchukin, High quality Nb-AlO_x/sub x/-Nb junctions for microwave receivers and SFQ logic device //IEEE Transactions on Magnetics. – 1991. – Т. 27. – №. 2. – С. 3141-3144.
38. Филиппенко Л. В. Интегральные сверхпроводниковые приемные структуры на основе высококачественных туннельных переходов //Москва. – 2009.
39. Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N. et al. //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2001.- № 1. С. 816.
40. Dmitriev P.N., Lapitskaya I.L., Filippenko L.V. et al. //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2003. - № 2. С. 107-110.
41. Imamura T., Hasuo S. Fabrication of high quality Nb/AlO_x/sub x/-Al/Nb Josephson junctions. II. Deposition of thin Al layers on Nb films //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 1992. – Т. 2. – №. 2. – С. 84-94.
42. Дмитриев П. Н. Разработка и исследование новых типов сверхпроводниковых туннельных переходов для приемных свч устройств – диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01-«Приборы и методы экспериментальной физики» в ИРЭ им. ВА Котельникова РАН, 2009.

43. Meng X., Van Duzer T. Light-anodization process for high-J/sub c/micron and submicron superconducting junction and integrated circuit fabrication //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2003. – T. 13. – №. 2. – C. 91-94.
44. Ermakov A. B., Shitov S. V., Baryshev A. M., Koshelets V. P., Luinge W. A data acquisition system for test and control of superconducting integrated receivers //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2001. – T. 11. – №. 1. – C. 840-843.
45. M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, P.A. Yagoubov//IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2007. - №17. – C. 379.
46. Bumble B., LeDuc H. G., Stern J. A., Megerian K. G. Fabrication of Nb/Al-N/sub x//NbTiN junctions for SIS mixer applications //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2002. – T. 11. – №. 1. – C. 76-79.
47. Shiota T., Imamura T., Hasuo S. Nb Josephson junction with an AlN x barrier made by plasma nitridation //Applied physics letters. – 1992. – T. 61. – №. 10. – C. 1228-1230.
48. Kleinsasser A. W., Mallison W. H., Miller R. E. Nb/AlN/Nb Josephson junctions with high critical current density //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1995. – T. 5. – №. 2. – C. 2318-2321.
49. Iosad N. N., Ermakov A. B., Meijer F. E., Jackson B. D., Klapwijk T. M. Characterization of the fabrication process of Nb/Al–AlNx/Nb tunnel junctions with low RnA values up to 1 $\Omega \mu\text{m}^2$ //Superconductor Science and Technology. – 2002. – T. 15. – №. 6. – C. 945.
50. Dmitriev P. N., Lapitskaya I. L., Filippenko L. V., Ermakov A. B., Shitov S. V., Prokopenko G. V., Koshelets V. P. High quality Nb-based tunnel junctions for high frequency and digital applications //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2003. – T. 13. – №. 2. – C. 107-110.
51. Brinkman W. F., Dynes R. C., Rowell J. M. Tunneling conductance of asymmetrical barriers //Journal of applied physics. – 1970. – T. 41. – №. 5. – C. 1915-1921.
52. Булат Л. П., Конопелько В. В., Пшенай-Северин Д. А. О критических токах в контактах Джозефсона типа сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник //Вестник международной академии холода. – 2013. – №. 3. – С. 46-49.
53. Bratkovsky A. M. Tunneling of electrons in conventional and half-metallic systems: Towards very large magnetoresistance //Physical Review B. – 1997. – T. 56. – №. 5. – C. 2344.
54. Rowell J. M., McMillan W. L., Feldmann W. L. Phonon emission and self-energy effects in normal-metal tunneling //Physical Review. – 1969. – T. 180. – №. 3. – C. 658.
55. Tolpygo S. K. et al. Tunneling properties of barriers in Nb/Al/AlO/sub x//Nb junctions //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2003. – T. 13. – №. 2. – C. 99-102.

56. Adelerhof D. J., Houwman E. P., Fransen P. B. M., Veldhuis D., Flokstra J., Rogalla H. Characterization of different types of Nb-AlO/sub x/-based Josephson tunnel junctions //IEEE transactions on magnetics. – 1991. – T. 27. – №. 2. – C. 3153-3156
57. Hartman T. E. Tunneling through asymmetric barriers //Journal of Applied Physics. – 1964. – T. 35. – №. 11. – C. 3283-3294.
58. Rowell J. M. Tunneling anomalies-experiment //Tunneling Phenomena in Solids: Lectures presented at the 1967/NATO Advanced Study Institute at Risö, Denmark. – Boston, MA : Springer US, 1969. – C. 385-404.
59. Tolpygo S. K., Cimpoiasu E., Liu X., Simonian N., Polyakov Y. A., Lukens J. E., Likharev K. K. Tunneling properties of barriers in Nb/Al/AlO/sub x/-Nb junctions //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2003. – T. 13. – №. 2. – C. 99-102.
60. Wang Z., Terai H., Kawakami A., Uzawa Y. Interface and tunneling barrier heights of NbN/AlN/NbN tunnel junctions //Applied physics letters. – 1999. – T. 75. – №. 5. – C. 701-703.
61. Koshelets V. P., Shitov S. V., Filippenko L. V., Vaks V. L., Mygind J., Baryshev A. M., Whyborn N. Phase locked 270–440 GHz local oscillator based on flux flow in long Josephson tunnel junctions //Review of Scientific Instruments. – 2000. – T. 71. – №. 1. – C. 289-293.
62. Dahm A. J., Denenstein A., Langenberg D. N., Parker W. H., Rogovin D., Scalapino D. J. Linewidth of the radiation emitted by a Josephson junction //Physical Review Letters. – 1969. – T. 22. – №. 26. – C. 1416
63. Joergensen E., Koshelets V. P., Monaco R., Mygind J., Samuelsen M. R., Salerno, M. Thermal fluctuations in resonant motion of fluxons on a Josephson transmission line: Theory and experiment //Physical Review Letters. – 1982. – T. 49. – №. 15. – C. 1093.
64. Likharev K. K. Dynamics of Josephson junctions and circuits. – Routledge, 2022.
65. 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. – T. 12. – №. 17. – C. 8904.
66. Фуско В. СВЧ цепи //Анализ и автоматизированное проектирование. М.: Радио и связь. – 1990.
67. Mattis D. C., Bardeen J. Theory of the anomalous skin effect in normal and superconducting metals //Physical Review. – 1958. – T. 111. – №. 2. – C. 412.
68. Zimmermann W., Brandt E. H., Bauer M., Seider E., Genzel L. Optical conductivity of BCS superconductors with arbitrary purity //Physica C: Superconductivity. – 1991. – T. 183. – №. 1-3. – C. 99-104.

69. Koshelets V. P., Dmitriev P. N., Ermakov A. B., Sobolev A. S., Torgashin M. Y., Kurin V. V., Mygind J. Optimization of the phase-locked flux-flow oscillator for the submm integrated receiver //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2005. – Т. 15. – №. 2. – С. 964-967.
70. Koshelets V. P., Shitov S. V., Filippenko L. V., Vaks V. L., Mygind J., Baryshev A. M., Whyborn N. Phase locked 270–440 GHz local oscillator based on flux flow in long Josephson tunnel junctions //Review of Scientific Instruments. – 2000. – Т. 71. – №. 1. – С. 289-293.
71. Dmitriev P. N., Ermakov A. B., Kinev N. V., Kiselev O. S., Filippenko L. V., Fominskii M. Y., Koshelets V. P. Superconducting Structures for Study and Phase Synchronization of Integrated Terahertz Oscillators //Journal of Communications Technology and Electronics. – 2021. – Т. 66. – №. 4. – С. 473-479.
72. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., K. Yoshida. Flux-flow type Josephson oscillator for millimeter and submillimeter wave region //Journal of Applied Physics. – 1983. – Т. 54. – №. 6. – С. 3302-3309.
73. 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)
74. Gulevich D. R., Koshelets V. P., Kusmartsev F. V. Josephson flux-flow oscillator: The microscopic tunneling approach //Physical Review B. – 2017. – Т. 96. – №. 2. – С. 024515.
75. Буздин А. И., Булаевский Л. Н., Панюков С. В. Осцилляции критического тока в зависимости от обменного поля и толщины ферромагнитного металла (F) в джозефсоновском контакте SFS //Письма в ЖЭТФ. – 1982. – Т. 35. – С. 147.
76. Ryazanov V. V., Oboznov V. A., Rusanov A. Y., Veretennikov A. V., Golubov A. A., Aarts J. Coupling of two superconductors through a ferromagnet: Evidence for a π junction //Physical review letters. – 2001. – Т. 86. – №. 11. – С. 2427.
77. Ortlepp T., Ariando Mielke O., Verwijs C. J. M., Foo K. F. K., Rogalla H., Hilgenkamp H. Flip-flopping fractional flux quanta //Science. – 2006. – Т. 312. – №. 5779. – С. 1495-1497.
78. Feofanov A. K., Oboznov V. A., Bol'Ginov V. V., Lisenfeld J., Poletto S., Ryazanov V. V., Ustinov A. V. Implementation of superconductor/ferromagnet/superconductor π -shifters in superconducting digital and quantum circuits //Nature Physics. – 2010. – Т. 6. – №. 8. – С. 593-597.
79. Sickinger H., Lipman A., Weides M., Mints R. G., Kohlstedt H., Koelle D., Goldobin E. Experimental evidence of a ϕ Josephson junction //Physical review letters. – 2012. – Т. 109. – №. 10. – С. 107002.
80. J. H. Xu, J. H. Miller, Jr., and C. S. Ting, " π -vortex state in a long $0-\pi$ Josephson junction", Phys. Rev. B 51, 11958–11961 (1995)

81. Pfeiffer J., Kemmler M., Koelle D., Kleiner R., Goldobin E., Weides M., Ustinov A. V. Static and dynamic properties of 0, π , and 0- π ferromagnetic Josephson tunnel junctions //Physical Review B. – 2008.–T. 77. – №. 21. – C. 214506.
82. Goldobin E., Koelle D., Kleiner R. Semifluxons in long Josephson 0- π -junctions //Physical Review B. – 2002. – T. 66. – №. 10. – C. 100508.
83. Alexey V. Ustinov,"Fluxon insertion into annular Josephson junctions", Appl. Phys. Lett. 80, 3153 (2002)
84. E. Goldobin, A. Sterck, T. Gaber, D. Koelle, and R. Kleiner,"Dynamics of Semifluxons in Nb Long Josephson 0- π Junctions", Phys. Rev. Lett. 92, 057005 (2004)
85. Koshelets V. P., Dmitriev P. N., Ermakov A. B., Sobolev A. S., Torgashin M. Y., Kurin V. V., Mygind J. Optimization of the phase-locked flux-flow oscillator for the submm integrated receiver //IEEE transactions on applied superconductivity. – 2005. – T. 15. – №. 2. – C. 964-967.