

На правах рукописи

Москалев Дмитрий Олегович

**Исследование и разработка технологии формирования джозефсоновских переходов для криогенных параметрических усилителей**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор **Панфилов Юрий Васильевич**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
**Панкратов Андрей Леонидович**,  
ведущий научный сотрудник  
Института физики микроструктур РАН

кандидат физико-математических наук,  
**Маклаков Сергей Сергеевич**,  
ведущий научный сотрудник  
Института теоретической и прикладной  
электродинамики РАН

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.18  
доктор технических наук, доцент



Мешков С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В настоящее время криогенные параметрические усилители активно используются при высокоточном считывании микроволновых и оптических сигналов сверхнизкой интенсивности, в квантовой метрологии и криптографии, при исследовании темной материи и разработке систем искусственного интеллекта. Благодаря возможности достижения квантово-ограниченных собственных шумов они могут использоваться для высокоточного считывания состояний сверхпроводниковых кубитов, осуществления обратной связи в режиме реального времени, а также для генерации сжатых квантовых состояний. Необходимость использования криогенных параметрических усилителей вызвана крайне малой мощностью (менее  $10^{-16}$  Вт) детектируемого сигнала, который необходимо усилить без привнесения шума в систему.

Обычно в процессе усиления происходит увеличение мощности полезного сигнала, однако это сопровождается добавлением к нему широкополосных помех, вызванных собственными шумами усилителя. Например, шумы, добавляемые лучшими современными коммерческими полупроводниковыми НЕМТ (high-electron-mobility transistor) усилителями с коэффициентом усиления более 40 дБ и шумовой температурой ниже 2 К, могут в 10-20 раз превышать детектируемый сигнал. Решением данной проблемы является использование в качестве первой ступени каскада усиления криогенного параметрического усилителя, способного работать в квантовом режиме, добавляя к полезному сигналу минимальное количество шума, ограниченное квантовым пределом на рабочей частоте. Квантово-ограниченные параметрические усилители могут быть созданы на базе бездиссипативных элементов – субмикронных джозефсоновских переходов.

Основной вклад в развитие физических основ и реализаций криогенных параметрических усилителей внесли фундаментальные работы Б. Юрке, М. Фельдмана и А. Сильвера, а также работы научных групп Т. Ямамото, Д. Мартиниса, Т. Роя, М. Деваре и Н. Роха. Параметрический усилитель представляет собой сверхпроводниковый LC контур, в котором основным элементом в качестве нелинейной индуктивности является джозефсоновский переход. Данный элемент конструктивно представляет собой трехслойную структуру из двух сверхпроводников, разделенных тонким слоем изолятора (толщина 1-2 нм). В настоящее время наиболее высокоэффективные параметрические усилители, используемые в исследованиях ведущих мировых научных групп университетов MIT, Berkley, KIT и Chalmers, а также таких технологических лидеров как Google, IBM и Intel, построены на основе джозефсоновских переходов типа Al/AlO<sub>x</sub>/Al. Необходимость воспроизводимого формирования таких бездиссипативных структур в составе криогенных параметрических усилителей вызвана определяющим влиянием электрических характеристик джозефсоновских переходов на центральную частоту усилителя и его выходные характеристики. Формирование джозефсоновских переходов типа Al/AlO<sub>x</sub>/Al ведущими мировыми научными группами реализуется методом теневого осаждения и окисления с использованием мостовой технологии Нимейера–Долана.

На основании анализа доступных данных можно видеть, что технологические параметры рассмотренных процессов в зависимости от группы в значительной степени отличаются. Так, диапазоны толщин верхнего и нижнего электродов варьируются в диапазоне от 15 до 60 нм и от 20 до 120 нм соответственно, при этом скорости осаждения изменяются от 0,3 до 1 нм/с. Параметры процесса окисления, который является ключевым при формировании туннельного барьера джозефсоновского перехода, варьируются в широком диапазоне парциальных давлений кислорода от 3 до 150 Торр и времени окисления от 5 до 30 минут. Таким образом, представленные в доступных литературных источниках данные по формированию джозефсоновских переходов не обладают полнотой информации для реализации на их основе высококачественных криогенных параметрических усилителей ввиду отсутствия базы для научно обоснованного выбора технологических режимов формирования джозефсоновских переходов методом теневого осаждения.

**Целью диссертационной работы** является создание физико-технологических основ формирования джозефсоновских переходов типа  $Al/AlO_x/Al$  для применения в криогенных параметрических усилителях. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих реализаций криогенных параметрических усилителей на основе джозефсоновских переходов.

2. Разработан процесс изготовления джозефсоновских переходов  $Al/AlO_x/Al$ , обеспечивающий высококачественную структуру тонкопленочных электродов.

3. Установлены экспериментальные зависимости влияния параметров процесса теневого осаждения и окисления на воспроизводимость электрических характеристик джозефсоновских переходов.

4. Проведено математическое моделирование влияния потока осаждаемого металла в процессе электронно-лучевого испарения на линейные размеры электродов джозефсоновских переходов.

5. Разработан многостадийный процесс изготовления сверхпроводниковых схем, обеспечивающий гальваническую связь и бездиссипативный контакт структур.

6. Разработана методика проектирования криогенного параметрического усилителя на основе джозефсоновских переходов.

7. Разработана технология, позволяющая изготовить криогенный параметрический усилитель на основе джозефсоновских переходов.

**Научная новизна работы:**

1. Для процесса теневого осаждения определено комплексное влияние технологических параметров на структуру и свойства тонкопленочных электродов, а также определено комплексное влияние параметров процесса окисления на электрические характеристики джозефсоновских переходов, что позволяет формировать субмикронные переходы с малым стандартным отклонением критического тока в диапазоне плотностей критических токов от 0,5 до 35 мкА/мкм<sup>2</sup>.

2. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель, описывающая взаимосвязь линейных размеров электродов джозефсоновских

переходов и распределения потока испаряемого металла через двухслойную резистивную маску в процессе электронно-лучевого испарения.

3. Сформулированы критерии выбора технологических параметров процесса ионной обработки и геометрии тонкопленочных бандаж-структур, которые обеспечивают бездиссипативный гальванический контакт на интерфейсе базовый металлический слой-электрод джозефсоновского перехода при многостадийном процессе изготовления устройств квантовой обработки информации.

**Практическая значимость и результаты внедрения.** На основе предложенных в работе технологий и методов сформирован технологический базис создания криогенных параметрических усилителей. Разработанные технологические операции использованы при создании первых российских опытных образцов сверхпроводниковых устройств с параметрами, не уступающими мировым аналогам: кубиты типа Трансмон со временем релаксации более 200 мкс, кубиты-флаксоны с высокой точностью выполнения операций, двухкубитный сопроцессор для реализации алгоритма Гровера, многокубитные симуляторы до 25 кубитов, квантово-ограниченные криогенные параметрические усилители.

Разработанный базовый маршрутный технологический процесс, методики и модели внедрены при реализации НИОКР, проводимых совместно ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и МГТУ им. Н.Э. Баумана, в том числе научно-исследовательских проектов Фонда перспективных исследований «Лиман-М» и «Прибой-М». Предложенные модели и методика процесса электронно-лучевого испарения внедрены в учебный процесс кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе проведены экспериментальные исследования по определению влияния режимов процесса теневого осаждения и окисления на характеристики тонкопленочных структур, выполненные по плану полного факторного эксперимента. Для достижения поставленных задач изготовлено и охарактеризовано более 1000 экспериментальных образцов. Результаты экспериментальных исследований обработаны методами дисперсионного анализа. Для контроля параметров формируемых структур, а также параметров изготовленных сверхпроводниковых устройств использовались следующие методы их измерения: оптическая и электронная микроскопия для измерения линейных размеров и оценки поверхности тонкопленочных структур, атомно-силовая микроскопия и стилусная профилометрия для измерения шероховатости поверхности и контроля профиля поверхности. Измерение электрических характеристик структур осуществлялось при комнатной температуре на зондовой станции с возможностью работы в автоматическом режиме, также проводилась характеристика джозефсоновских переходов при криогенных температурах.

**Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы** обусловлена использованием современного поверенного метрологического оборудования, а также подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований и внедрением разработанных методик в НИР и ОКР, проводимых ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова».

Изготовленные на базе разработанной технологии сверхпроводниковые устройства измерялись в ведущих университетах и лабораториях России: НИТУ «МИСИС», МФТИ, ИФТТ РАН. Полученные результаты достоверно демонстрируют эффективность разработанных технологий, что подтверждено публикациями в ведущих по данной тематике мировых журналах.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Научно обоснованный комплексный выбор технологических режимов формирования тонкопленочных структур джозефсоновских переходов: скорость осаждения 1-15 Å/с, угол осаждения до 45 градусов и толщина электрода 15-100 нм - позволяет достигнуть среднеквадратичной шероховатости тонкопленочных алюминиевых электродов менее 1 нм при шероховатости края электрода менее 1,5 нм.

2. Предложенный метод окисления для формирования туннельного барьера джозефсоновского перехода, отличающийся выбором времени выдержки в среде кислорода при комнатной температуре, а также режима окисления (статический или динамический) в зависимости от парциального давления кислорода в диапазоне от 0,001 до 5 мбар, позволяет изготавливать субмикронные джозефсоновские переходы с разбросом значений критического тока менее 5 % по чипу в диапазоне от 7 нА до 8,5 мкА.

3. Разработанная бандаж-технология позволяет реализовать многостадийный процесс изготовления сверхпроводниковых устройств с достижением критического тока проводников более 10 мА за счет уменьшения потерь на интерфейсе базовый металлический слой схемы – электрод джозефсоновского перехода, связанных с разрывом вакуумного цикла.

4. Разработанные технологические операции формирования тонкопленочных структур позволяют изготовить криогенный параметрический усилитель с квантовым уровнем шумов и коэффициентом усиления выше 20 дБ, средней мощностью насыщения -117 дБм, полосой усиления не менее 15 МГц и диапазоном перестройки частоты более 1 ГГц.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: ICQT 2019 (Москва), MNE 2019 (Греция), APS March Meeting 2020 (Бостон), XIV Научно-техническая конференция «ВНИИА-2020» (Москва), QTS'20 (Сочи), XV Научно-техническая конференция «ВНИИА-2021» (Москва), MNE 2021 (Турин), а также семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Публикации.** По материалам и основному содержанию работы опубликовано 16 научных работ в научно-технических журналах и трудах конференций, из которых 10 в научно-технических журналах, рецензируемых Web of Science и Scopus, и 1 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Личный вклад.** Автор самостоятельно провел поиск и анализ литературных источников. Установка электронно-лучевого испарения отлажена и запущена в работу непосредственно автором. Экспериментальные и расчетные данные, а также данные моделирования получены автором лично или с его непосредственным участием. Автор лично отработал процесс формирования тонких пленок алюминия

методом электронно-лучевого испарения, процесс ионной предобработки и процесс окисления для формирования туннельного барьера. Автор принимал непосредственное участие в процессе проектирования схемы криогенного параметрического усилителя, расчета ключевых параметров и разработки базового технологического маршрута с последующим изготовлением устройства.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 134 страницах, содержащих 75 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 131 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна, а также приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния и тенденций развития сверхпроводниковых устройств и технологий криогенных параметрических усилителей. Сформулированы требования к используемым тонкопленочным структурам джозефсоновских переходов и выявлено, что наиболее перспективным материалом для всех типов высококогерентных кубитов и криогенных параметрических усилителей является алюминий. Это объясняется наличием сверхпроводящих свойств при критической температуре материала 1,2 К, а также наличием естественного плотного оксида ( $AlO_x$ ), играющего роль туннельного барьера джозефсоновского перехода. Анализ существующих реализаций сверхпроводниковых параметрических усилителей показал, что для их успешного изготовления необходимы джозефсоновские переходы с линейными размерами электродов от 100 нм до 1 мкм, а также критическими токами переходов от 10 нА до 5 мкА в зависимости от применения.

Из анализа разработок в области криогенных параметрических усилителей на основе джозефсоновских переходов  $Al/AlO_x/Al$ , достигающих собственных шумов на уровне квантового предела, можно сделать вывод, что реализация такого типа устройств требует разработки многостадийной технологии, когда на первом этапе происходит формирование базового слоя схемы (микрополосковые/копланарные линии передачи сигнала и накачки, встречно-штыревые/плоскопараллельные конденсаторы), а на втором этапе формируются джозефсоновские переходы, реализующие функции нелинейной индуктивности схемы.

В результате проведенного расчета зависимости резонансной частоты криогенного усилителя от критического тока джозефсоновских переходов  $Al/AlO_x/Al$ , лежащих в основе устройства, установлено, что процесс изготовления джозефсоновских переходов должен обеспечивать повторяемость критических токов структур выше 95 % по чипу. Отклонение критического тока на 5 % приводит к изменению центральной частоты усилителя на 150 МГц (Рис. 1), а с учетом того, что в конструкции усилителя, в зависимости от типа, может быть использовано от 2 до 2000 переходов, серьезной технологической задачей является повышение воспроизводимости значений критических токов джозефсоновских переходов.

В работе проанализированы существующие подходы к изготовлению субмикронных джозефсоновских переходов типа Al/AlO<sub>x</sub>/Al и криогенных параметрических усилителей на их основе, однако в литературе отсутствует общность информации по научно обоснованному выбору технологических режимов формирования джозефсоновских переходов методом теневого осаждения, оказывающих ключевое влияние на воспроизводимость критических токов таких тонкопленочных структур. Решение данной задачи требует комплексного экспериментально-теоретического исследования.

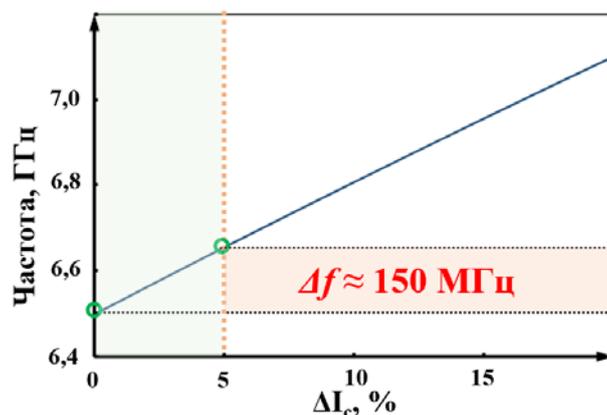


Рис. 1. Зависимость центральной частоты криогенного параметрического усилителя и отклонения значений критического тока джозефсоновских переходов от проектируемых

**Вторая глава** разделена на три части и посвящена исследованию влияния режимов теневого осаждения тонких алюминиевых пленок методом электронно-лучевого испарения, а также режимов окисления тонкопленочных электродов джозефсоновских переходов на их свойства. В первой части главы приведены результаты исследования механизма роста тонких пленок под углом к поверхности подложки. Установлено, что ключевыми причинами, оказывающими влияние на среднеквадратичную шероховатость осаждаемых под углом тонких пленок, являются эффект затенения (процесс предотвращения осаждения частиц поступающего металла в затененные области, сформированные ранее осажденными адатомами) и стадия конкурентного роста, когда происходит интенсивное развитие более высоких поверхностных элементов.

Для подтверждения теоретических положений механизма осаждения тонких пленок алюминия под углом к поверхности подложки проведена серия экспериментов по осаждению алюминиевых электродов через органическую двухслойную маску при комплексном варьировании параметров процесса теневого осаждения. Получены экспериментальные зависимости свойств тонкопленочных электродов от режимов осаждения (Рис. 2): зависимости среднеквадратичной шероховатости поверхности (RMS) и шероховатости края электродов (LER) от скорости осаждения (от 1 до 15 А/с), толщины электрода (от 15 до 100 нм) и угла осаждения (от 0 до 62 градусов). В результате проведенных экспериментальных исследований были сформулированы рекомендации по выбору технологических параметров процесса теневого осаждения, обеспечивающих формирование высококачественных тонкопленочных электродов джозефсоновских переходов.

Так, при определенной комбинации параметров осаждения, а именно минимизации угла осаждения и толщины тонкопленочного электрода при фиксированной скорости осаждения, возможно достичь среднеквадратичной шероховатости поверхности менее 1 нм при шероховатости края тонкопленочного электрода менее 1,5 нм. Требование к формированию высококачественного нижнего электрода обусловлено тем фактом, что данный электрод является базой для формирования туннельного барьера, определяющего электрические характеристики переходов.

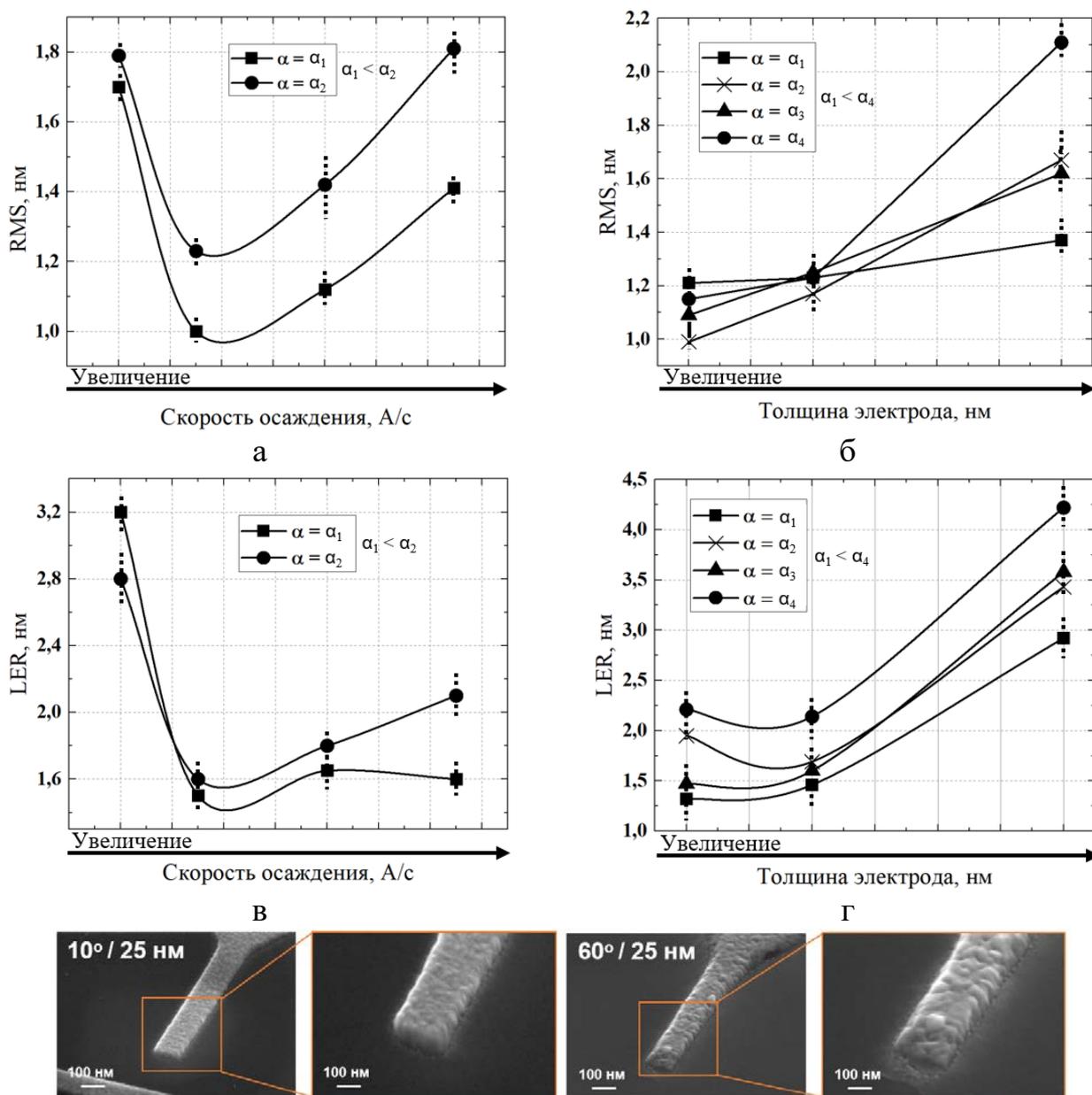


Рис. 2. Экспериментальные зависимости влияния параметров процесса теневого осаждения на структуру тонкопленочных алюминиевых электродов: влияние на среднеквадратичную шероховатость поверхности электродов скорости осаждения (а), толщины электрода и угла осаждения (б); влияние на шероховатость края электродов скорости осаждения (в), толщины электрода и угла осаждения (г); СЭМ изображения алюминиевых электродов, сформированных при различных параметрах процесса осаждения (д)

Основным параметром джозефсоновских переходов является критический ток. При пропускании через контакт тока, величина которого не превышает критического, падение напряжения на контакте отсутствует за счет туннельного эффекта. На критический ток джозефсоновских переходов оказывает влияние площадь туннельного барьера, а, следовательно, линейные размеры электродов. В работе проведено математическое моделирование влияния направленного потока испаряемого металла через двухслойную резистивную маску в процессе электронно-лучевого испарения на линейные размеры электродов джозефсоновских переходов. На основании результатов моделирования процесса теневого осаждения сформирована карта изменения линейных размеров электродов джозефсоновских переходов, вызванное затенением потока металла от края резистивной маски, по подложкодержателю диаметром 100 мм в зависимости от угла осаждения в диапазоне от 0 до 60 градусов. Проведенное экспериментальное исследование показало, что данные модели расходятся с экспериментом на 6,3 % для нижнего электрода и на 6,8 % для верхнего электрода. Полученные математические и экспериментальные данные подтверждают, что изменение линейного размера электрода не зависит от номинального значения ширины отверстия в резистивной маске.

Во второй части главы приведены результаты исследования влияния ключевых параметров процесса окисления на свойства туннельного барьера. При разработке технологического этапа окисления осуществлен переход от оперирования параметром критического тока (зависимая от площади туннельного барьера величина) к плотности критического тока – удельной по площади величине.

Процесс формирования туннельного барьера проходил в среде кислорода при комнатной температуре. В работе проведено экспериментальное исследование комплексного влияния параметров процесса окисления на воспроизводимость электрических характеристик джозефсоновских переходов.

На первом этапе экспериментально определено время выдержки в среде кислорода, при котором происходило насыщение барьера, то есть прекращение увеличения сопротивления джозефсоновских переходов. Далее экспериментально исследовалось влияние парциального давления кислорода и метода окисления (статическое и динамическое окисление) на плотность критического тока и воспроизводимость сопротивления джозефсоновских переходов по чипу. Полученная экспериментальная зависимость аппроксимируется степенной зависимостью в диапазоне плотностей критических токов от 0,5 до 35 мкА/мкм<sup>2</sup> при парциальных давлениях кислорода от 0,001 до 5 мбар. Комбинированное использование статического и динамического методов окисления в рассматриваемом диапазоне парциальных давлений кислорода позволило изготовить субмикронные джозефсоновские переходы с разбросом значений сопротивления (следовательно, критического тока) менее 5% по чипу.

Разработанная технологическая операция формирования туннельного барьера позволяют изготавливать джозефсоновские переходы со значениями критических токов в диапазоне от 7 до 8500 нА. Данный диапазон значительно перекрывает требуемые при изготовлении устройств квантовой обработки информации

значения критических токов. Полученная экспериментальная зависимость комплексного влияния ключевых параметров процесса окисления на плотность критического тока, а также ВАХ джозефсоновских переходов представлена на Рис. 3.

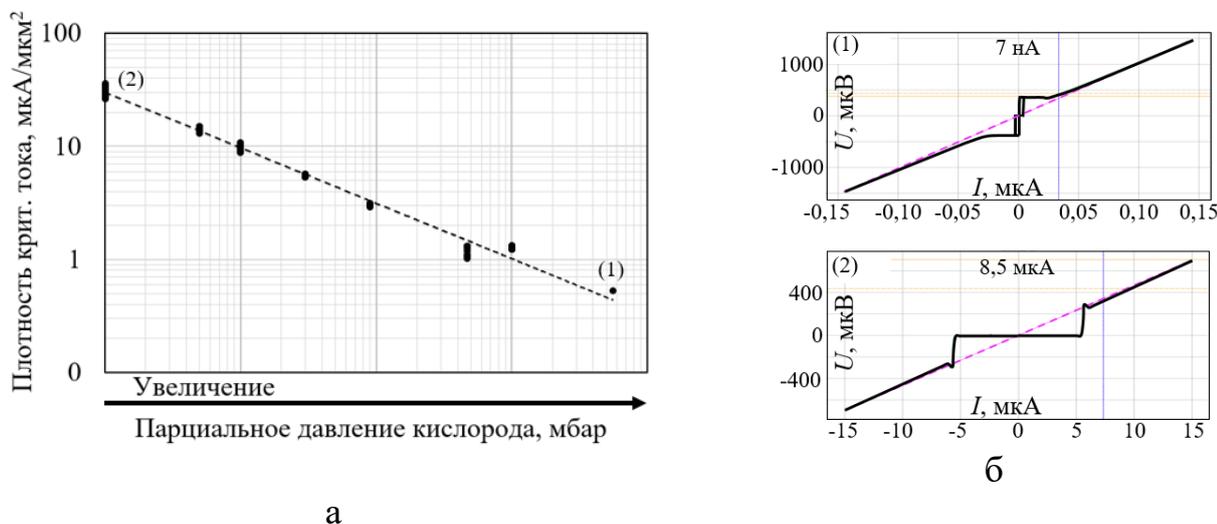


Рис. 3. Экспериментальная зависимость влияния парциального давления кислорода на плотность критического тока джозефсоновских переходов (а), ВАХ характерных структур (б)

Третья часть главы посвящена разработке бандаж-технологии, которая позволяет реализовать многостадийный процесс изготовления сверхпроводниковых устройств, когда конструкционные элементы схемы формируются в различных вакуумных циклах. Экспериментально оценен вклад паразитных интерфейсов в общее сопротивление формируемых тонкопленочных структур джозефсоновских переходов, а также определена форма бандаж-структур, при которой возможно полностью исключить влияние паразитных интерфейсов, связанных с разрывом вакуумного цикла.

Для удаления естественного оксида базового металлического слоя, который в последующем должен быть гальванически связан с электродами джозефсоновских переходов, разработана операция прецизионного ионного травления непосредственно перед осаждением бандаж-структур. На основании экспериментального исследования определены параметры процесса ионного травления (ускоряющее напряжение, ионный ток, время обработки), при которых возможно гальванически связать базовый слой и электроды джозефсоновских переходов без повреждения резистивной маски, поверхности подложки, а также самих металлических структур. При этом были определены скорости травления для различных структур базового слоя: поликристаллической и монокристаллической пленки алюминия (Рис. 4).

Выбраны средства метрологического контроля параметров тонкопленочных электродов: стилусный профилометр для измерения шероховатости и глубины травления, сканирующий электронный микроскоп для анализа структуры формируемой тонкой пленки. Выбраны средства контроля электрических характеристик джозефсоновских переходов: автоматическая зондовая станция для

измерения сопротивления контактов, криостат растворения, оснащенный электронными устройствами, для измерения критического тока и критической температуры контактов.

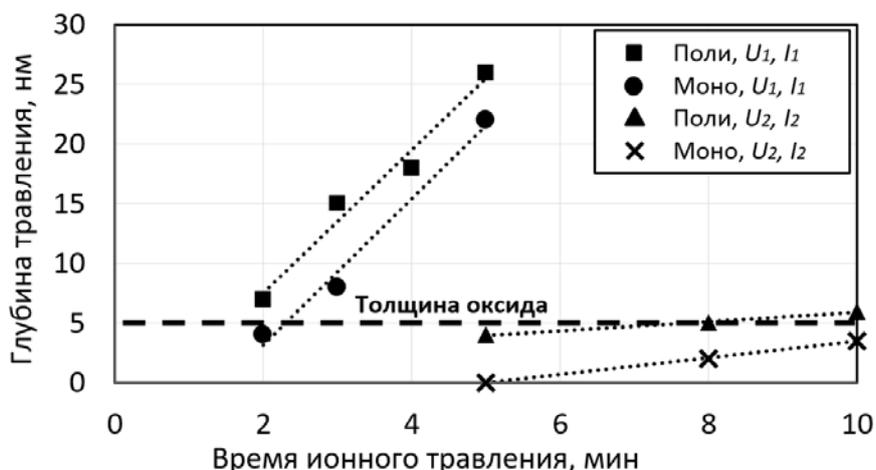


Рис. 4. Экспериментальная зависимость влияния параметров процесса ионного травления на глубину травления

**Третья глава диссертации** посвящена разработке конструкции криогенного параметрического усилителя на базе джозефсоновских переходов и моделированию основных параметров устройства. Разработанный узкополосный криогенный параметрический усилитель представляет собой резонансный LC контур на основе полуволновой микрополосковой линии передачи, в центре которой размещен массив из сверхпроводниковых нелинейных асимметричных элементов на основе джозефсоновских переходов. Разработанная конструкция позволяет перестраивать резонансную частоту устройства при изменении внешнего магнитного потока за счет зависящей от него индуктивности каждого нелинейного элемента массива.

Проведено проектирование микрополосковой линии передачи (разделена на две части), одна часть которой сильно связана ( $C_k$ ) с сигнальной линией, а вторая часть слабо связана ( $C_p$ ) с линией накачки емкостной связью (Рис. 5). Линия сигнала и накачки представляют собой микрополосковые линии импедансом 50 Ом и шириной 400 мкм. Емкость связи  $C_k$  реализована с помощью встречно-штыревого конденсатора. Для выбора геометрических параметров конденсатора связи варьировалась ширина зазора между обкладками.

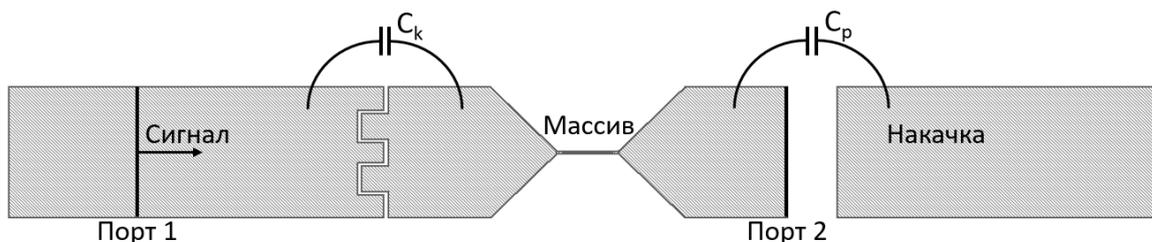


Рис. 5. Топология микрополосковой части параметрического усилителя

Проведен расчет параметров массива нелинейных элементов, каждый из которых представляет собой совокупность трех последовательно соединенных

джозефсоновских переходов, характеризующихся джозефсоновской энергией  $E_j$ , и одного параллельно соединенного джозефсоновского перехода с энергией  $\alpha E_j$  (Рис. 6, а). Коэффициент асимметрии ( $\alpha$ ) нелинейного элемента определен из требования обеспечения высокой индуктивности элемента и условия  $\alpha \leq 1/n$ , где  $n$  определяет количество джозефсоновских переходов, характеризующихся джозефсоновской энергией  $E_j$ . Максимальные значения индуктивности нелинейного элемента достигаются при значениях  $\alpha$  много меньше предельного ( $\alpha \approx 0,1$ , для  $n = 3$ ). Такое значение коэффициента асимметрии достигается за счет изменения площади малого джозефсоновского перехода в составе элемента. Также коэффициент асимметрии определяет соотношение квадратичной ( $g_3$ ) и кубической ( $g_4$ ) нелинейностей, которые для рассматриваемого нелинейного элемента зависят от внешнего магнитного потока. Эти нелинейности влияют на коэффициент усиления и мощность насыщения устройства соответственно. При проектировании необходимо минимизировать значение кубической нелинейности при максимальном значении квадратичной нелинейности (Рис. 6, б).

Проведено моделирование влияния числа нелинейных элементов в массиве на резонансную частоту криогенного параметрического усилителя. Установлено, что для характерного диапазона частот от 5 до 8 ГГц число нелинейных элементов должно превышать 20, поскольку при этом можно добиться уменьшения кубической нелинейности. Также уменьшение числа нелинейных элементов приводит к значительному увеличению длины линии передачи.

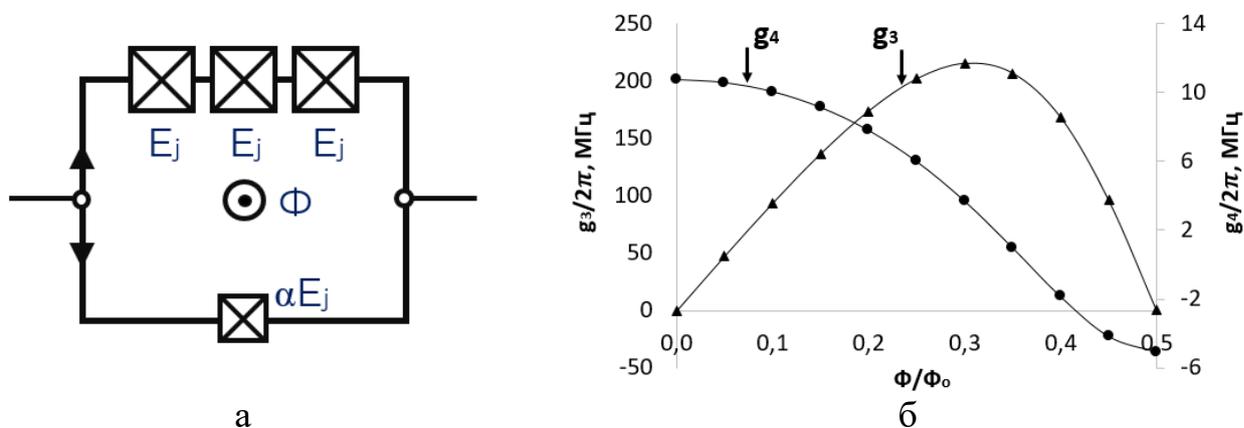


Рис. 6. Схема нелинейного асимметричного элемента на базе джозефсоновских переходов (а), а также изменение квадратичной и кубической нелинейностей от внешнего магнитного потока (б)

На основании моделирования и расчета параметров микрополосковой линии передачи и массива нелинейных элементов в составе криогенного параметрического усилителя проведено моделирование основных параметров усилителя. Получены проектные значения индуктивности контура (Рис. 7, а) и перестройки резонансной частоты усилителя в зависимости от внешнего магнитного поля (Рис. 7, б), а также профиль коэффициента усиления как на определенной рабочей частоте (Рис. 7, в), так и на всем частотном диапазоне перестройки (Рис. 7, г). Моделирование основных параметров усилителя проведено с использованием библиотеки NumPy Python.

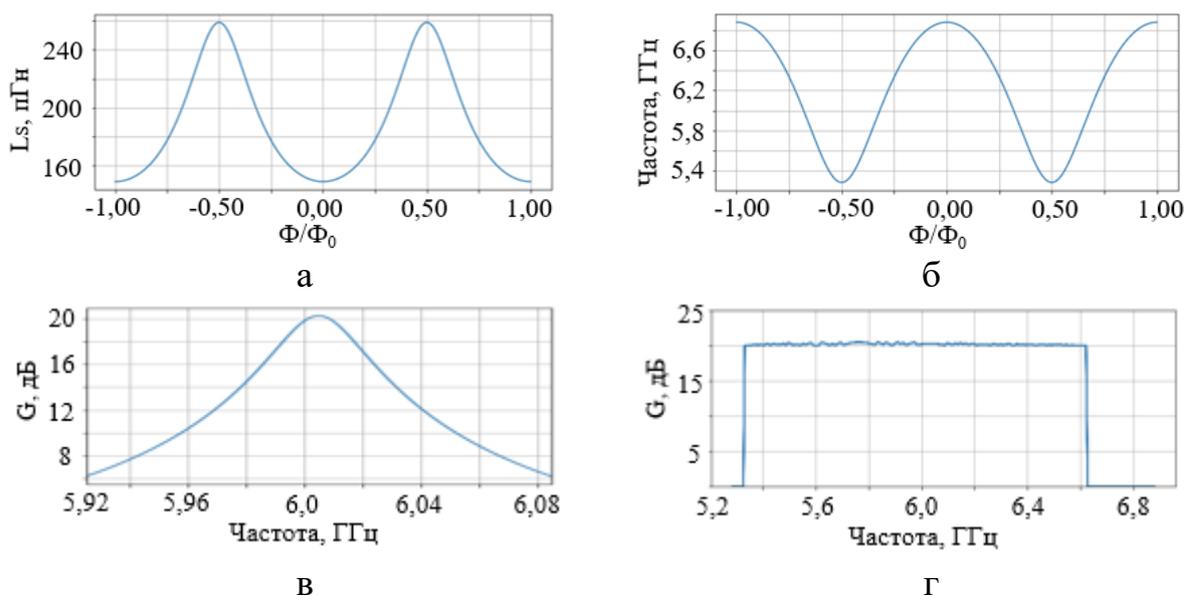


Рис. 7. Результаты моделирования параметров криогенного параметрического усилителя на массиве нелинейных асимметричных элементов

В результате проектирования конструкции и моделирования криогенного параметрического усилителя получены следующие расчетные параметры: коэффициент усиления 20 дБ, диапазон перестройки частоты от 5,3 до 6,6 ГГц (перестраиваемая полоса 1,3 ГГц при усилении 20 дБ).

В четвертой главе представлена разработанная на основе Al/AlO<sub>x</sub>/Al тонкопленочных структур последовательность технологических операций, на базе которой изготовлен узкополосный криогенный параметрический усилитель в соответствии с параметрами схемы, описанными выше. Разработанный технологический маршрут включает разработанные операции теневого осаждения и окисления джозефсоновских переходов разной площади в составе нелинейного элемента устройства, а также операцию формирования бандаж-структур для обеспечения гальванического контакта массива нелинейных элементов (25 нелинейных элементов, содержащих 100 джозефсоновских переходов) и микрополосковых линий передачи сигнала и накачки (Рис. 8).

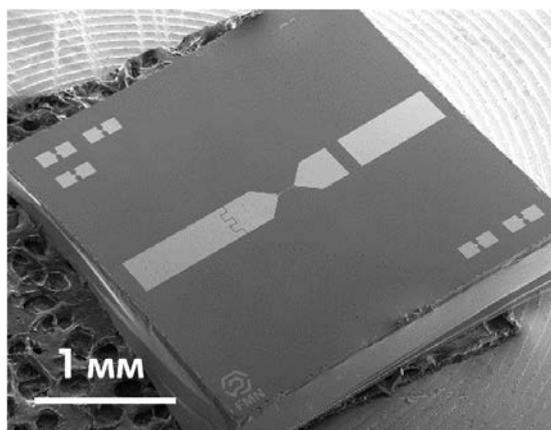


Рис. 8. СЭМ изображение изготовленного криогенного параметрического усилителя

Для характеристики изготовленного устройства разработана схема измерения на базе криостата растворения (Рис. 9), позволяющая проводить измерения основных параметров параметрического усилителя: коэффициента усиления, диапазона перестройки рабочей частоты, ширины полосы усиления, мощности насыщения и шумовой температуры устройства.

Параметрический усилитель был установлен на низкотемпературной ступени криостата растворения при температуре 20 мК. Усилитель работает в режиме отражения, поэтому входной и выходной сигналы разделены при помощи циркулятора. Переключение источников сигнала для измерения шумовых характеристик устройства осуществлялось при помощи СВЧ реле. В качестве источников сигнала использовались анализатор цепей, а также источники шума: согласованные нагрузки (50 Ом), расположенные на разных ступенях криостата (при температуре 1 К и при температуре 20 мК). Сигнал от анализатора цепей проходил через набор аттенуаторов, которые находятся на разных ступенях криостата, для того чтобы привести уровень содержащихся в нем шумов (с комнатной температуры) к величине, существенно меньшей квантового предела на рабочей частоте усилителя.

Сигнал с выхода параметрического усилителя поступал на СВЧ изолятор, который необходим для ослабления обратного потока теплового шума от полупроводникового НЕМТ усилителя, расположенного на ступени криостата с температурой 4 К. Усиленный сигнал выводится из криостата и поступает на второй полупроводниковый усилитель, с которого через разветвитель поступает на анализатор цепей и анализатор спектра. Сигнал накачки подавался от генератора через каскад аттенуаторов. Смещение внешним магнитным потоком было реализовано с использованием сверхпроводниковой катушки, установленной непосредственно в держатель усилителя. Катушка управлялась источником постоянного тока.

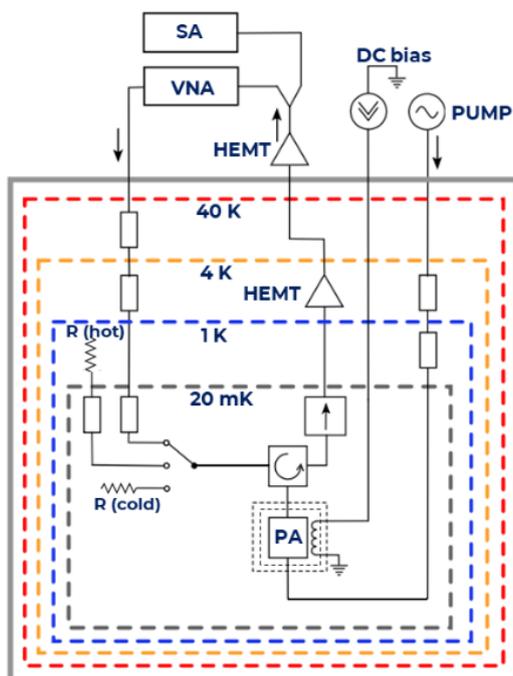


Рис. 9. Схема измерения на базе криостата растворения

Рабочий режим криогенного параметрического усилителя был настроен за счет выбора трех основных параметров: величины магнитного смещения, частоты и амплитуды накачки. Диапазон перестройки рабочей частоты усилителя определен при помощи анализатора цепей, измеряя задержку прохождения сигнала при отсутствии накачки (Рис. 10, а). Коэффициент усиления параметрического усилителя определен за счет измерения разницы амплитуд прохождения измерительного сигнала анализатора цепей при включенном и выключенном генераторе накачки. Коэффициент усиления определялся для всего диапазона перестраиваемых рабочих частот (Рис. 10, б).

Для определения мощности насыщения измерялась зависимость коэффициента усиления от амплитуды сигнала на входе усилителя (Рис. 10, в). При этом учитывалось ослабление входного измерительного тракта от выхода анализатора цепей до входа параметрического усилителя. Величина мощности насыщения определялась как мощность, при которой усиление уменьшается на 1 дБ.

Измерение уровня шума усилителя производилось путем измерения спектра шума на выходе измерительной системы для двух источников шума на входе параметрического усилителя с разной температурой: горячей и холодной согласованных нагрузок (Рис. 10, г). В качестве источников использовались нагрузки номиналом 50 Ом. Для предотвращения насыщения параметрического усилителя шум от высокотемпературной нагрузки ослабляется аттенюатором, установленным на низкотемпературной ступени криостата.

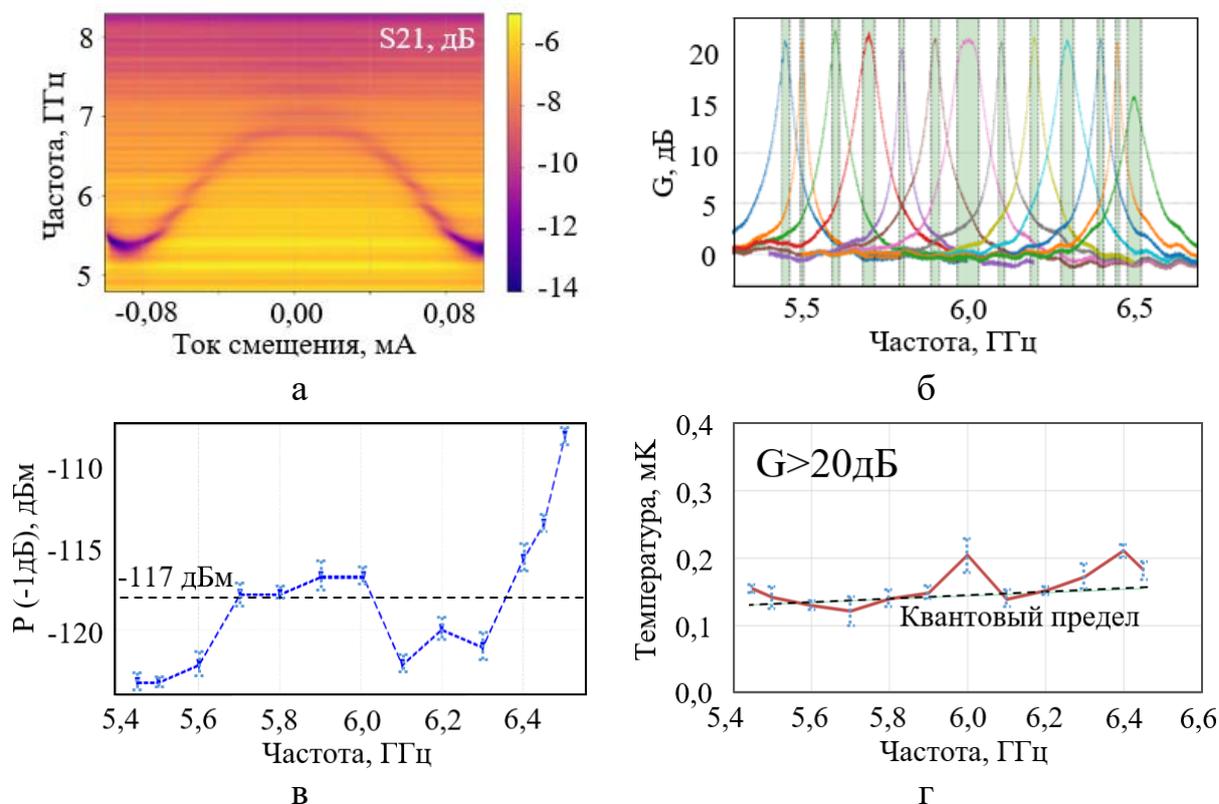


Рис. 10. Результаты криогенных измерений характеристик разработанного и изготовленного параметрического усилителя: диапазон перестройки рабочей частоты усилителя (а), коэффициент усиления (б), мощность насыщения (в), шумовая температура усилителя (г)

На основании проведенных измерений разработанный криогенный параметрический усилитель имеет диапазон перестройки рабочей частоты от 5,5 до 6,5 ГГц при коэффициенте усиления 20 дБ во всей полосе. Ширина полосы усиления находится в диапазоне 15-70 МГц. Среднее значение мощности насыщения составило -117 дБм. Результаты измерения шумовой температуры показали уровень шумов усилителя на всем рабочем частотном диапазоне на уровне квантового предела.

Работа выполнена в Научно-образовательном центре «Функциональные Микро/Наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Экспериментально установлено, что уменьшение толщины нижнего электрода джозефсоновского перехода при фиксированной скорости осаждения в комбинации с уменьшением угла осаждения менее 45 градусов позволяет уменьшить среднеквадратичную шероховатость тонкопленочной поверхности электрода до 1 нм, а также уменьшить шероховатость края электрода до 1,5 нм.

2. На основании моделирования процесса теневого осаждения и экспериментальной апробации установлено, что линейные размеры верхнего и нижнего электродов джозефсоновских переходов изменяются из-за эффекта распределения потока осаждаемого металла, при этом изменение линейного размера электрода зависит от его расположения на подложкодержателе и не зависит от номинального значения ширины отверстия в резистивной маске.

3. Для обеспечения воспроизводимости плотности критических токов джозефсоновских переходов при многостадийном процессе изготовления сверхпроводниковых устройств рекомендуется использовать бандаж-технология, обеспечивающую гальваническую связь и бездиссипативный контакт на интерфейсе базовый металлический слой – электрод джозефсоновского перехода.

4. Установлено, что плотность критического тока джозефсоновских переходов находится в степенной зависимости от парциального давления кислорода в диапазоне от 0,001 до 5 мбар при фиксированном времени выдержки в среде кислорода с достижением значений от 0,5 до 35 мкА/мкм<sup>2</sup>.

5. Для изготовления субмикронных джозефсоновских переходов с разбросом значений критических токов менее 5 % по чипу рекомендуется использовать динамический метод окисления при малых парциальных давлениях кислорода.

6. Разработанные технологические операции процесса теневого осаждения и окисления позволяют формировать джозефсоновские переходы с критическим током в диапазоне от 7 до 8500 нА, который необходим для изготовления криогенных параметрических усилителей.

7. В результате проектирования конструкции криогенного параметрического усилителя, разработки последовательности технологических операций, изготовления устройства, а также криогенной характеристики разработан параметрический усилитель, соответствующий следующим техническим параметрам:

- Коэффициент усиления: 20 дБ

- Полоса усиления (-3 дБ): от 15 до 70 МГц
- Диапазон перестройки частоты: от 5,5 до 6,5 ГГц
- Мощность насыщения (-1 дБ): -123...-108 дБм
- Шумовая температура: на уровне квантового предела во всем перестраиваемом частотном диапазоне.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

По материалам и основному содержанию работы опубликованы следующие научные работы:

1. Cavity-QED of a quantum metamaterial with tunable disorder / Moskalev D. O. [et al.] // *Physical Review A*. 2022. Т. 105, С. 033519. (1,0 п.л./ 0,15 п.л.)
2. Topological excitations and bound photon pairs in a superconducting quantum metamaterial / Moskalev D. O. [et al.] // *Physical Review B*. 2021. Т. 103, №. 22, С. 224520. (0,5 п.л./ 0,08 п.л.)
3. A wideband cryogenic microwave low-noise amplifier / Moskalev D. O. [et al.] // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2020. Т. 11, №. 1, С. 1484-1491. (0,5 п.л./ 0,06 п.л.)
4. Ultrathin film deposition for nanoelectronic device manufacturing / Moskalev D. O. [et al.] // *IOP Publishing*. 2020. Т. 781, С. 012021. (0,4 п.л./ 0,11 п.л.)
5. Light dressing of a diatomic superconducting artificial molecule / Moskalev D. O. [et al.] // *Physical Review A*. 2020. Т. 102, №. 1, С. 013707. (1,1 п.л./ 0,17 п.л.)
6. Планарная архитектура для исследования кубита-флюксониума / Москалев Д. О. [и др.] // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2019, Т. 110, №. 8, С. 569-574. (0,5 п.л./ 0,1 п.л.)
7. Epitaxial Silver Films Morphology and Optical Properties Evolution over Two Years / Moskalev D. O. [et al.] // *Coatings*. 2020. Т. 10, №. 10, С. 911. (0,8 п.л./ 0,15 п.л.)
8. Toward a theoretically limited SPP propagation length above two hundred microns on an ultra-smooth silver surface / Moskalev D. O. [et al.] // *Optical Materials Express*. 2018. Т. 8, №. 11, С. 3254-3261. (0,5 п.л./ 0,09 п.л.)
9. Highly directional plasmonic nanolaser based on high-performance noble metal film photonic crystal / Moskalev D. O. [et al.] // *International Society for Optics and Photonics*. 2018. Т. 10672, С. 106724D. (0,5 п.л./ 0,1 п.л.)
10. Crystalline structure dependence on optical properties of silver thin film over time / Moskalev D. O. [et al.] // *IEEE*. 2017. С. 1497-1502. (0,4 п.л./ 0,07 п.л.)