

На правах рукописи

Москалева Дарья Андреевна

**Исследование и разработка технологий сверхпроводниковых
широкополосных параметрических усилителей с низкими пульсациями
профиля усиления**

Специальность 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и
приборов электронной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

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: **Родионов Илья Анатольевич,**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Кленов Николай Викторович,**
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
профессор Физического факультета

Тархов Михаил Александрович,
кандидат физико-математических наук,
Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
начальник научно-исследовательской лаборатории

Ведущая организация: **ФГБУ науки «Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН»**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2025 г. в ____ час. на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33.

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16
кандидат технических наук, доцент



Сырицкий Антони Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Сверхпроводниковые параметрические усилители – это мощный инструмент для высокоточного считывания сигналов однофотонной мощности. Такие сигналы используются в сферах квантового машинного обучения, криптографии, экзафлопсных вычислений ($P_{\text{сиг}} = -130$ дБм), астрофизики ($P_{\text{сиг}} = -170$ дБм) и других. На данный момент измерения сверхмаломощных сигналов проводятся с использованием полупроводниковых усилителей с высокой подвижностью электронов (HEMT). Эти устройства обеспечивают широкую полосу усиления, но имеют высокую собственную шумовую температуру. Поэтому актуальной является задача разработки сверхпроводниковых широкополосных параметрических усилителей (СШПУ) с квантовым уровнем шумов.

Первые разработки в области создания ПУ появились в 1979 г. Основной вклад в развитие физических и технологических основ создания широкополосных ПУ внесли работы научных групп Д. Мартиниса, М. Деваре, Т. Ямамото, Т. Роя, Т. Уайта, Н. Роха и А. Зорина. Эти работы направлены на расширение мгновенной рабочей полосы устройства для обеспечения методик частотного мультиплексирования с сохранением коэффициента усиления G более 15 дБ. Такое значение G необходимо для поддержания шумовой температуры системы на уровне стандартного квантового предела. Этим требованиям удовлетворяют два подхода: ПУ с согласованием импеданса (IMPA), а также ПУ бегущей волны (TWPA). На усилителях TWPA продемонстрированы коэффициент усиления более 15 дБ в рабочей полосе более 3 ГГц при шумовой температуре устройства в 2-8 раз превышающей стандартный квантовый предел (КП). Усилители IMPA демонстрируют $G > 15$ дБ при ширине полосы от 300 МГц до 700 МГц, мощность насыщения от -115 дБм до -90 дБм и шумовую температуру на уровне КП. Именно этот тип устройств используется в исследованиях мировых лидеров Google и IBM, а также научных групп университетов MIT, Berkley и Chalmers.

На основании анализа доступных в литературе данных установлено, что разработанные на данный момент IMPA имеют зависимость профиля усиления от импеданса элементов измерительной системы, что приводит к пульсациям коэффициента усиления в рабочей полосе частот. Технологическим ограничением при создании IMPA являются диэлектрические потери в тонкопленочных плоскопараллельных конденсаторах, увеличивающие собственную шумовую температуру устройства. Таким образом, представленные в литературных источниках данные по снижению шумовой температуры и пульсаций профиля усиления не обладают полнотой информации, ввиду отсутствия базы для научно обоснованного выбора технологических режимов формирования бездиссипативных диэлектриков в составе плоскопараллельных конденсаторов.

Целью диссертационной работы является научно-обоснованный выбор технологии изготовления, материалов, режимов и методов формирования для создания сверхпроводниковых широкополосных параметрических усилителей с низкими пульсациями профиля усиления и квантовым уровнем собственных шумов. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведен технологический анализ существующих реализаций сверхпроводниковых широкополосных параметрических усилителей.

2. Разработана технология изготовления сверхпроводниковых широкополосных параметрических усилителей с квантовым уровнем шумов, состоящая из одного цикла электронно-лучевой литографии и теневого осаждения.

3. Разработан многостадийный процесс изготовления плоскопараллельных конденсаторов на основе тонкопленочного диэлектрика из гидрогенизированного аморфного кремния.

4. Разработана многоступенчатая технология изготовления сверхпроводниковых широкополосных параметрических усилителей с многосекционным согласующим контуром, позволяющая снизить пульсации профиля усиления.

5. Проведена апробация разработанных технологий на основании экспериментальной характеристики сверхпроводниковых широкополосных параметрических усилителей в криостате растворения.

Научная новизна работы:

1. Предложено использование в качестве диэлектрического слоя конденсатора кремниевой подложки, что позволяет изготавливать сверхпроводниковые широкополосные параметрические усилители с согласующими контурами на основе микрополосковых резонаторов за один цикл электронно-лучевой литографии и теневого осаждения.

2. Разработана технология изготовления плоскопараллельных конденсаторов с низкими диэлектрическими потерями, отличающаяся наличием многослойного тонкопленочного диэлектрика с высокими значениями диэлектрической проницаемости без разрушения базового слоя алюминия, что позволяет интегрировать его в технологический процесс изготовления сверхпроводниковых квантовых устройств.

3. Разработана многоступенчатая технология, позволяющая изготавливать сверхпроводниковые широкополосные параметрические усилители с многосекционным согласующим контуром на основе плоскопараллельных конденсаторов с низкими диэлектрическими потерями и планарных катушек индуктивности, для снижения пульсаций профиля усиления.

Практическая значимость и результаты внедрения. На основе предложенных в работе методик, технологий и методов сформирован технологический базис создания СШПУ с низкими пульсациями профиля усиления и квантовым уровнем собственных шумов. Разработанные топологии устройств, а также технологические операции использованы при создании опытных образцов СШПУ с параметрами, не уступающими мировым аналогам: коэффициент усиления более 15 дБ в полосе частот от 300 МГц до 600 МГц, экспериментально полученная мощность насыщения не менее -110 дБм и шумовая температура менее 350 мК.

Разработанные технологии изготовления, методики и устройства внедрены при реализации НИОКР (ФПИ, ГК «Росатом»), проводимых совместно ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе проведены экспериментальные исследования по определению влияния режимов плазмохимического осаждения из газовой фазы на характеристики широкополосных ПУ, выполненные по плану полного факторного эксперимента. Для достижения поставленных задач изготовлено и охарактеризовано более 1000 экспериментальных образцов. Для контроля параметров формируемых структур, а также параметров изготовления СШПУ использовались следующие методы их измерения: оптическая, электронная и ионная микроскопия для измерения линейных размеров и оценки поверхности тонкопленочных структур, стилусная профилометрия для контроля профиля поверхности. Измерение электрических характеристик структур и параметров СШПУ проводилось в криостате растворения при криогенных температурах.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы обусловлена использованием апробированного математического аппарата, 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». Полученные результаты достоверно демонстрируют эффективность разработанных технологий и устройств, что подтверждено публикациями в ведущих по данной тематике мировых журналах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная технология изготовления на основе одного цикла электронно-лучевой литографии и теневого осаждения в комбинации с микрополосковой реализацией согласующего контура, позволяет снизить привносимые диэлектрические потери и обеспечить следующие характеристики сверхпроводниковых параметрических усилителей: коэффициент усиления более 17 дБ с пульсациями в профиле 5-10 дБ, ширину полосы усиления 600 МГц, среднюю мощность насыщения -95 дБм, а также шумовую температуру системы менее 350 мК.

2. Предложенный метод формирования многослойного тонкопленочного диэлектрика в диапазоне толщин от 50 нм до 400 нм с эффективной диэлектрической проницаемостью материала равной $\epsilon=14,5$ и углом профиля 75° - 80° , необходимым для обеспечения электрического контакта между верхней обкладкой конденсатора и базовым металлическим слоем, позволяет изготавливать плоскопараллельные конденсаторы с тангенсом угла диэлектрических потерь в однофотонном режиме менее 8×10^{-5} и в многофотонном режиме менее 2×10^{-6} .

3. Предложенная технология изготовления плоскопараллельных конденсаторов, неразрушающая базовый слой, основанная на использовании в качестве материала базового слоя монокристаллического алюминия, а также травлении многослойного диэлектрика в смеси газов $Ag + CF_4$ в концентрации 50/50, позволяет формировать плоскопараллельные конденсаторы емкостью от 0,2 пФ до 8,0 пФ.

4. Разработанная многоступенчатая технология на основе циклов формирования плоскопараллельных конденсаторов с диэлектриком из аморфного гидрогенизированного кремния позволяет радикально уменьшить геометрические размеры сверхпроводниковых интегральных схем, снизить потери на распространение и отражение СВЧ-сигналов, а также изготавливать широкополосные параметрические усилители с многосекционными согласующими контурами, обеспечивающими пульсации профиля усиления менее 5 дБ и неподверженные влиянию СВЧ компонентов измерительной цепи.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: MNE 2021 (Турин), XVI и XVII Научно-техническая конференция «ВНИИА-2022», «ВНИИА-2023» и «ВНИИА-2024» (Москва), XXVII симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» 2023 (Нижний Новгород), ICQT 2023 (Москва), XXVIII симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» 2024 (Нижний Новгород), форум «Микроэлектроника 2024», а также семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По материалам и основному содержанию работы опубликовано 9 научных работ в научно-технических журналах, рецензируемых Web of Science и Scopus, и 1 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад. Автор самостоятельно провел поиск и анализ литературных источников. Экспериментальные и расчетные данные, а также данные моделирования получены автором лично или с его непосредственным участием. Технология изготовления плоскопараллельных конденсаторов с тонкопленочным диэлектриком из аморфного гидрогенизированного кремния разработана непосредственно с участием автора. Автор лично спроектировал две схемы широкополосных параметрических усилителей, рассчитал ключевые параметры и разработал технологии изготовления устройств. Все СЭМ-изображения, представленные в диссертационной работе, получены автором лично на сканирующем электронном или ионном микроскопе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 129 страницах, содержащих 61 рисунок, 18 таблиц, список литературы из 89 наименований.

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 Главе 1 проведен анализ современного состояния и тенденций развития сверхпроводниковых широкополосных параметрических усилителей. Сформулированы требования, предъявляемые к СШПУ, и выявлено, что наиболее перспективным нелинейным элементом для таких устройств является сверхпроводниковый нелинейный асимметричный индуктивный элемент

(СНАИЛ/SNAIL). В отличие от одиночных джозефсоновских переходов и сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИДов), СНАИЛ позволяет изменять квадратичную ($g_3=g_3(c_3)$) и кубическую ($g_4=g_4(c_4)$) нелинейности системы в зависимости от внешнего магнитного потока (Φ/Φ_0), а также перестраивать индуктивность элемента (L_j) в более широком диапазоне за счет наличия асимметрии (α) в ячейке (Таблица 1).

Таблица 1.

Сравнение типов нелинейных элементов

Характеристика	Одиночный ДП	СКВИД	СНАИЛ
Асимметрия	Нет	Нет/Да	Да
Внешний магнитный поток	Нет	DC	DC
Собственный магнитный поток	Нет	Нет	Да
Нелинейная индуктивность	L_j	$L = ML_j/2$	$L = ML_j/c_2(\alpha)$
Нелинейный коэффициент c_3	0	0	$c_3(\Phi/\Phi_0)$
Нелинейный коэффициент c_4	-1/24	-1/12	$c_4(\Phi/\Phi_0)$
Накачка потоком	Нет	Да	Да
Накачка током	Да	Да	Да

Из анализа разработок в области СШПУ следует, что в работе сверхпроводящего квантового сопроцессора могут быть использованы ПУ с согласованием импеданса или ПУ бегущей волны. Параметрические усилители бегущей волны позволяют расширить полосу усиления до нескольких гигагерц, но имеют высокую собственную шумовую температуру, что ограничивает их применение. Шумовая температура, в свою очередь, напрямую связана с типом и качеством тонкопленочного диэлектрика плоскопараллельного конденсатора. Другие проблемы этого класса усилителей – это многоэтапность технологического процесса изготовления, жесткие требования к воспроизводимости элементарных ячеек, а также необходимость согласования не только импеданса, но и фазы. Этих проблем лишены ПУ с согласованием импеданса.

В работе проанализированы существующие подходы к проектированию и изготовлению СШПУ с согласованием импеданса, и установлено, что предложенные реализации отличаются малым (не более трех) числом согласующих контуров, а также требуют разработки многоступенчатой технологии, содержащей этапы изготовления плоскопараллельных конденсаторов, джозефсоновских переходов и бандаж-структур. Однако в литературе отсутствует общность информации по научно обоснованному выбору конструкционных и технологических режимов формирования элементной базы СШПУ с согласованием импеданса, а также тонкопленочных плоскопараллельных конденсаторов, оказывающих ключевое влияние на резонансную частоту и импеданс согласующих контуров, а также шумовую температуру устройства. Решение данной задачи требует комплексного экспериментально-теоретического исследования.

Глава 2 разделена на три части и посвящена проектированию СШПУ с согласованием импеданса. В первой части главы приведены результаты моделирования параметров СНАИЛ. Каждый СНАИЛ представляет собой петлю, состоящую из трех одинаковых последовательно соединенных $Al/AlO_x/Al$ джозефсоновских переходов (ДП) с критическим током одного перехода равным I_c и одного параллельно подключенного перехода с критическим током αI_c . В результате моделирования квадратичной и кубической нелинейностей СНАИЛ установлено, что с ростом коэффициента асимметрии ячейки α возрастает интенсивность протекания нелинейных процессов в режиме 3-х волнового смещения фотонов, что приводит к росту коэффициента усиления в системе. Рабочий диапазон устройства по магнитному потоку (Φ/Φ_0) соответствует участку с отрицательным значением кубической нелинейности, что позволяет дополнительно повысить мощность насыщения устройства (Рисунок 1).

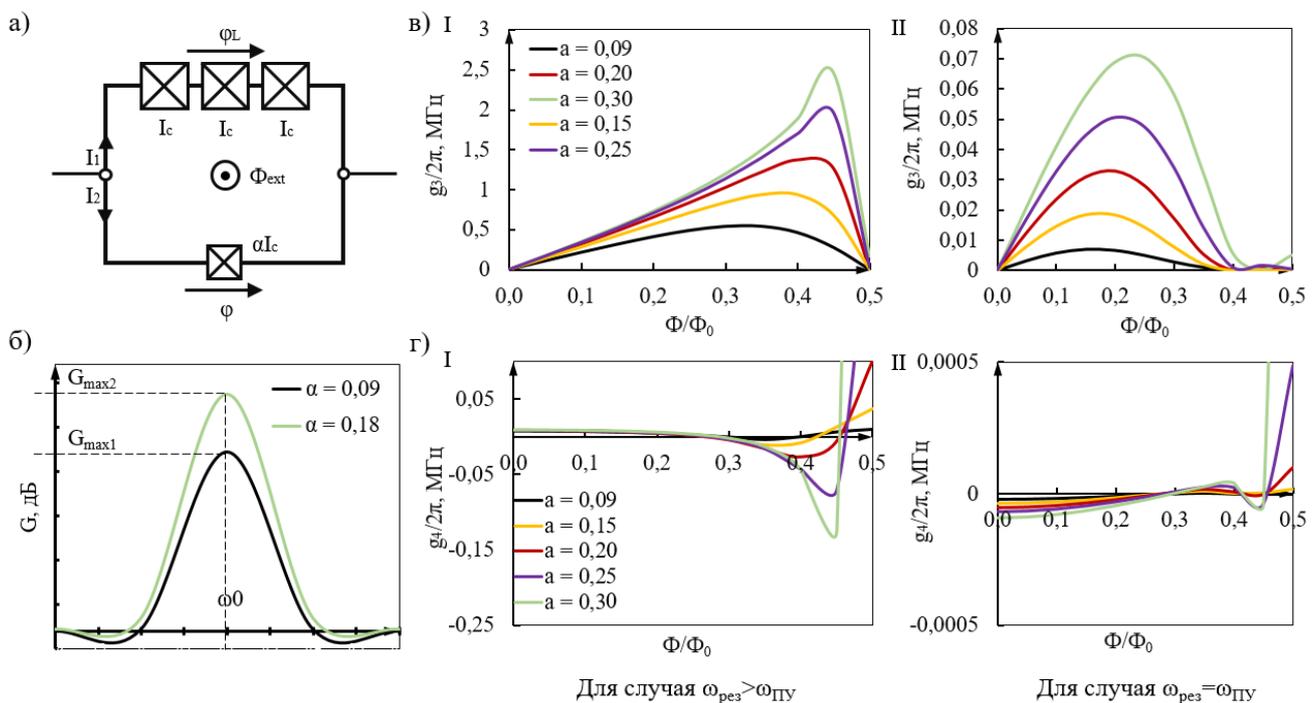


Рисунок 1. Моделирование параметров СНАИЛ: а) электрическая схема элемента; б) зависимость коэффициента усиления устройства от асимметрии ячейки СНАИЛ; зависимость квадратичной в) I, II и кубической г) I, II нелинейностей элемента от внешнего магнитного потока для различных коэффициентов асимметрии ячейки

Вторая часть главы посвящена разработке СШПУ с согласованием импеданса на основе согласующего контура второго порядка. Расчет электрических параметров контура проводился по методу прототипов с отрицательным сопротивлением. В качестве опорного выбран прототип Чебышева, т.к. он имеет равнопульсационную амплитудно-частотную характеристику, что позволяет расширить полосу усиления при меньшем числе согласующих контуров. Данная реализация представляет собой соединение на одном чипе узкополосного ПУ, а также согласующего контура, состоящего из двух участков: четвертьволнового трансформатора, необходимого для согласования импеданса усилителя с

импедансом внешней электроники (50 Ом), а также полуволнового резонатора, обеспечивающего расширение полосы усиления, посредством снижения обратных отражений усиливаемого сигнала (Рисунок 2).

Разработанная технология изготовления позволяет реализовать согласующий контур устройства на основе микрополосковых линий передачи. Конструкция ПУ рассчитана таким образом, чтобы в качестве диэлектрического слоя плоскопараллельного конденсатора С выступала кремниевая подложка.

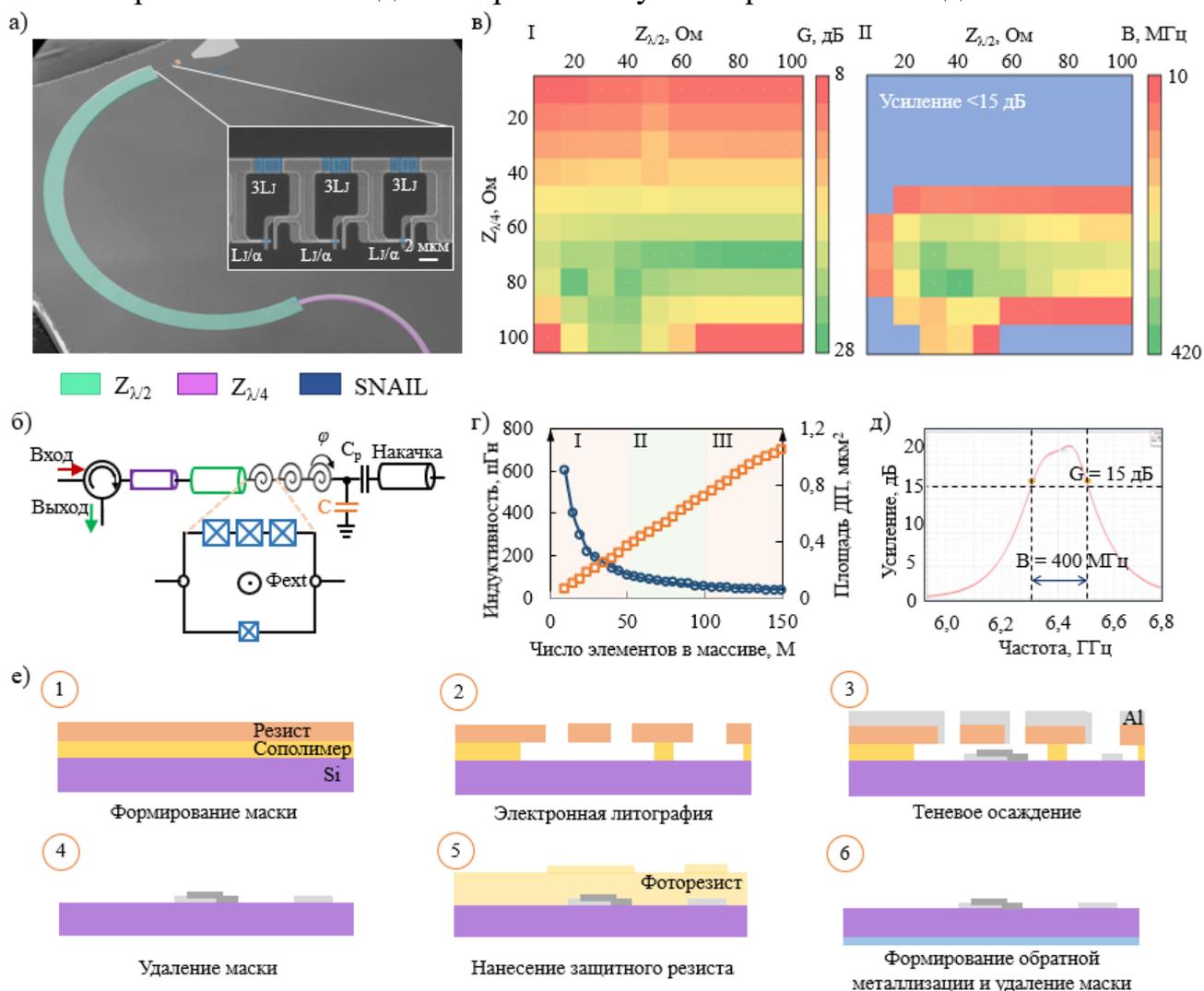


Рисунок 2. ПУ с согласующим контуром 2-го порядка на основе микрополосковых линий передачи: а) СЭМ-изображение разработанного устройства; б) электрическая схема ПУ; в) зависимость усиления (I) и ширины полосы (II) от импедансов согласующих резонаторов; г) и д) моделирование выходных параметров усилителя; е) (1-6) технология изготовления устройства

Характеристические импедансы четверть- и полуволнового резонаторов определяются шириной микрополосковой линии передачи и составляют 86 Ом и 59 Ом соответственно. Нелинейная индуктивность реализована массивом из 67 СНАИЛ с критическим током $Al/AlO_x/Al$ джозефсоновских переходов $I_C = 3$ мкА (Рисунок 2, а). Замена одиночного нелинейного элемента массивом позволяет значительно повысить мощность насыщения устройства за счет снижения влияния эффектов Керра ($P_{sat} \sim I_C^2 / Q^3$).

Проведено оптимизационное моделирование по выбору числа СНАИЛ в массиве в зависимости от геометрических и электрических параметров ДП. Установлено, что допустимое количество СНАИЛ ($M_{\text{СНАИЛ}}$) для СШПУ с согласованием импеданса лежит в диапазоне от 55 шт. до 100 шт., т.к. при $M_{\text{СНАИЛ}} < 55$ шт. рассчитанная индуктивность массива образует ДП с линейными размерами менее 100 нм, а при $M_{\text{СНАИЛ}} > 100$ шт. индуктивность одиночного перехода становится менее 25 пГн и не может быть реализована при помощи стандартных технологических операций микроэлектроники (Рисунок 2, г)). На основании требований, предъявляемых к ширине полосы усиления, проведено моделирование, показывающее зависимость GBP (gain-bandwidth product) ограничения от значений характеристических импедансов согласующих резонаторов. Установлено, что максимальный коэффициент усиления (более 15 дБ) при максимальной ширине полосы (более 300 МГц) могут быть получены при значениях импеданса четвертьволнового резонатора, лежащих в диапазоне от 65 Ом до 85 Ом, а также значениях характеристического импеданса полуволнового резонатора, лежащих в диапазоне от 25 Ом до 47 Ом (Рисунок 2, в) I, II).

На рисунке 2, д) представлено моделирование выходных характеристик разработанного устройства. В результате проектирования конструкции СШПУ с согласующим контуром 2-го порядка получены следующие расчетные параметры: центральная резонансная частота 6,4 ГГц, коэффициент усиления G более 15 дБ, а также ширина полосы усиления 400 МГц. Полученный профиль соответствует АЧХ характерной для прототипа Чебышева. Одной из ключевых проблем СШПУ с малым числом согласующих резонаторов является зависимость профиля усиления от окружающих СВЧ элементов измерительной цепи. Это проявляется в неконтролируемом изменении профиля усиления, а также значительных пульсациях G , нарушающих достоверность считывания состояний кубитов (Рисунок 3, в)). На решение этой проблемы направлен следующий раздел диссертации.

Третья часть главы посвящена разработке СШПУ с многосекционным согласующим контуром (ПУ МСК), который необходим для снижения пульсаций коэффициента усиления в рабочей полосе. Расчет параметров согласующего контура проводился также с использованием прототипа Чебышева с добавлением инверторов адмиттанса, необходимых для преобразования электрической схемы устройства. Проведено моделирование, оценивающее влияние микроволнового окружения (длины соединительных кабелей, индуктивности элементов проволочной разварки, а также SMP коннекторов) на профиль усиления для СШПУ с различным числом согласующих контуров (N). На основании результатов моделирования был выбран согласующий контур 4-го порядка (Рисунок 3).

Разработанный ПУ МСК состоит из 4-х резонаторов и 3-х дополнительных конденсаторов связи C_{12} , C_{23} и C_{34} (Рисунок 4). Резонатор 1 представляет собой сочетание конденсатора емкостью 5,60 пФ и одиночного СНАИЛ с критическим током большего джозефсоновского перехода $I_c = 8$ мкА. Резонаторы 2 – 4

представляют собой согласующие резонаторы, реализованные параллельным подключением конденсатора и планарной катушки индуктивности. Расчетные импедансы согласующих резонаторов составляют 7,4 Ом, 7,4 Ом и 13,3 Ом соответственно. Конденсаторы связи представляют собой инверторы адмиттанса, необходимые для преобразования последовательной схемы подключения конденсатора и катушки в параллельную. Повышение мощности насыщения в данном случае осуществлено не за счет увеличения числа нелинейных элементов, а за счет снижения добротности согласующих резонаторов. Перестройка индуктивности СНАИЛ реализована не прямым пропусканием тока через элемент, а при помощи линии потокового смещения.

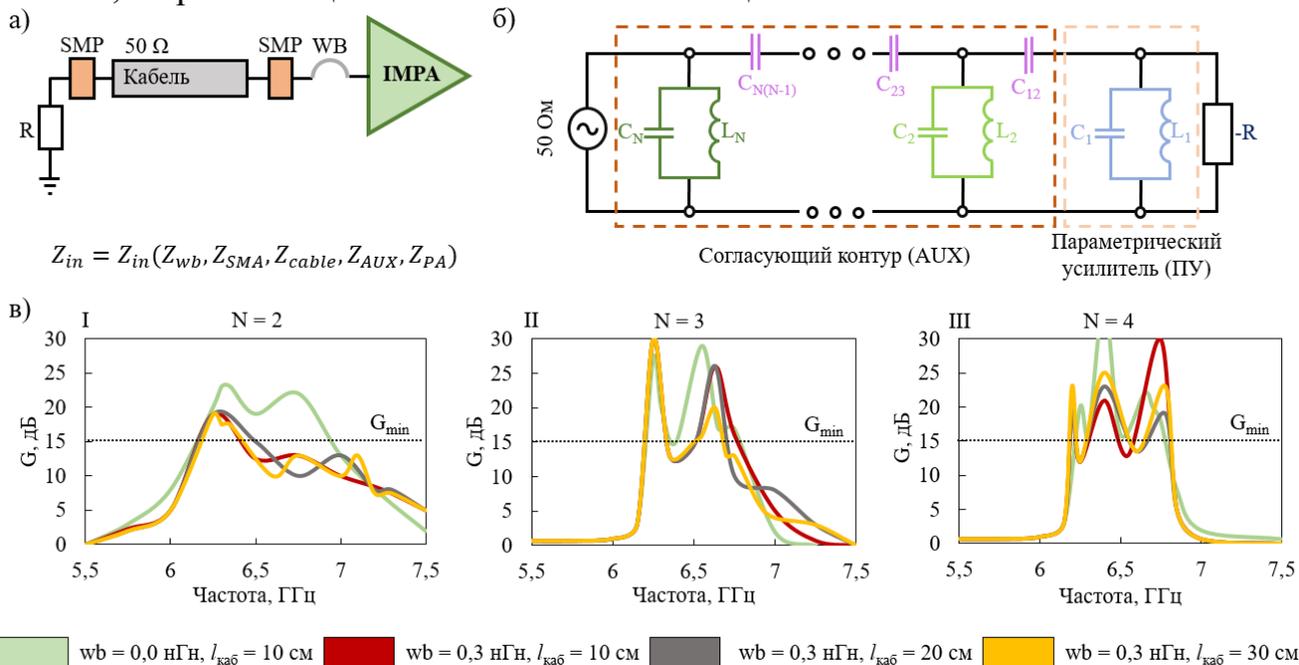


Рисунок 3. Моделирование влияния микроволнового окружения на профиль усиления: а) упрощенная схема модели; б) электрическая схема ПУ МСК; в) результаты моделирования, демонстрирующие изменение профиля усиления при варьировании длиной кабеля в диапазоне от 10 см до 30 см, а также индуктивностью элементов проволочной разварки, для порядка согласующего контура N = 2 (I), N = 3 (II), N = 4 (III)

Для проектирования ПУ МСК разработана методика многоступенчатого моделирования, включающая этапы аналитического расчета, разработки электрической схемы, симуляции планарных катушек индуктивности и плоскопараллельных конденсаторов, а также этапы СВЧ моделирования топологии ПУ. При проектировании геометрии устройства учитывался индуктивный вклад не только планарных катушек, но и межсоединений согласующих резонаторов. В результате проектирования конструкции ПУ МСК получены следующие расчетные параметры: центральная резонансная частота 6,5 ГГц, коэффициент усиления более 15 дБ, ширина полосы усиления 700 МГц, а также пульсации в профиле усиления менее 5 дБ.

Глава 3 посвящена разработке технологий изготовления спроектированных устройств. Использование в качестве диэлектрического материала конденсатора

кремниевой подложки позволило уменьшить количество технологических операций при изготовлении СШПУ с согласующим контуром на основе микрополосковых линий передачи и изготовить устройство за один цикл электронно-лучевой литографии и теневого осаждения.

Технология изготовления ПУ МСК требовала формирования на одном кристалле как конденсаторов емкостью от 1 пФ до 5 пФ, так и емкостью около 0,3 пФ. Емкость в схеме может быть реализована через подложку (микрополосковые конденсаторы), как в случае первого устройства, а также на основе встречно-штыревых или плоскопараллельных конденсаторов. В данной работе использовались плоскопараллельные конденсаторы, т.к. встречно-штыревые имеют большую паразитную индуктивность и геометрические размеры, а микрополосковые подходят только для малых емкостей (до 0,1 пФ).

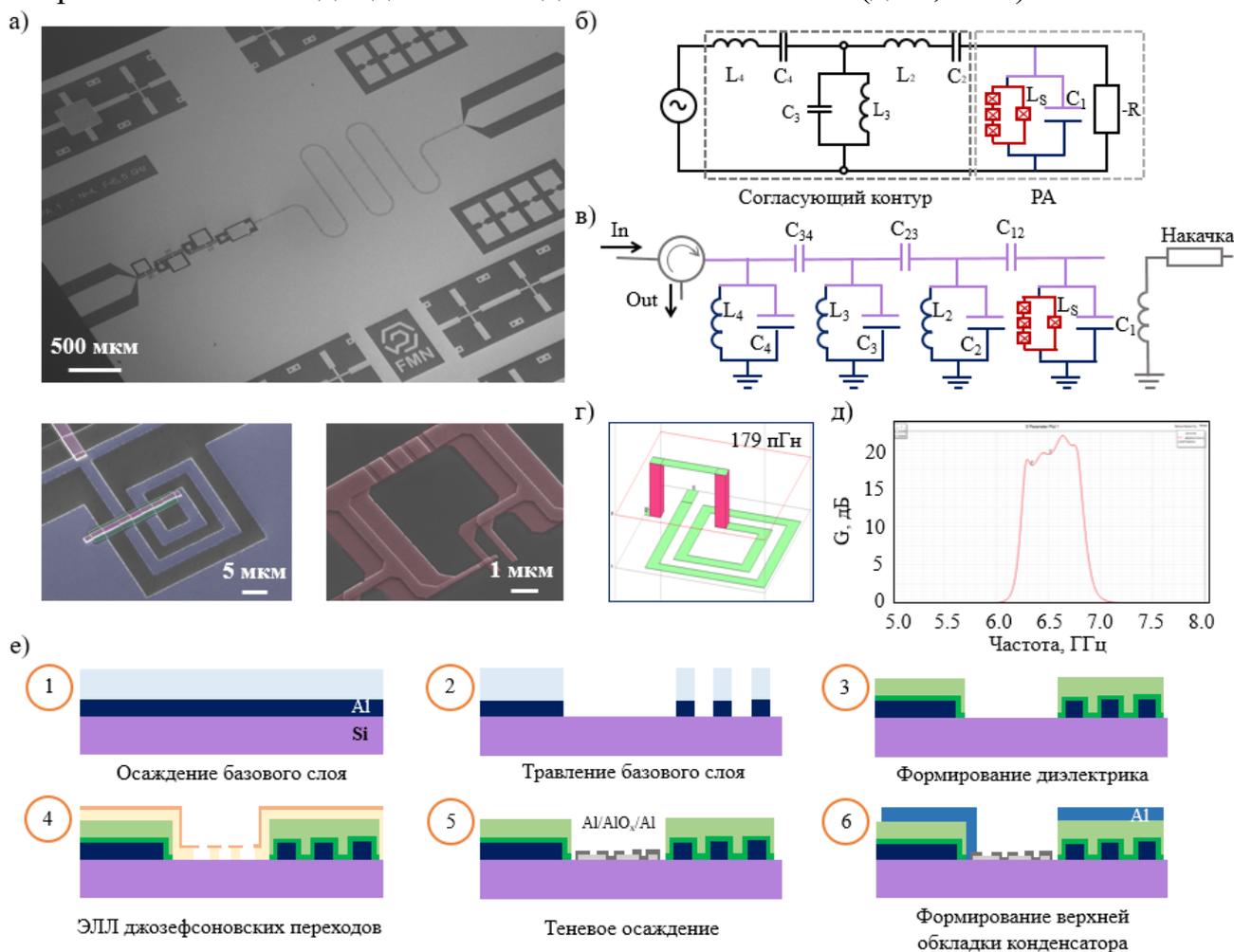


Рисунок 4. Разработанная топология ПУ МСК: а) вариант топологии устройства; б) и в) электрическая схема усилителя ДО и ПОСЛЕ применения инверторов адмиттанса; г) моделирование планарных катушек индуктивности; д) моделирование коэффициента усиления; е) (1-6) основные технологические этапы изготовления

В ходе проведенного анализа литературы в качестве материала диэлектрика плоскопараллельного конденсатора выбран гидрогенизированный аморфный кремний ($a\text{-Si:H}$), т.к. этот материал обладает малыми диэлектрическими

потерями, при максимальных значениях диэлектрической проницаемости. Требования к толщине диэлектрической пленки выдвигались, исходя из условий обеспечения электрического контакта между верхней обкладкой конденсатора и базовым слоем земли, а также исходя из минимальной площади обкладки. На основании этих критериев толщина пленки a-Si: H должна лежать в диапазоне от 150 нм до 400 нм.

С целью разработки технологии изготовления плоскопараллельных конденсаторов проведена серия экспериментов по осаждению пленок a-Si: H методом плазмохимического осаждения из газовой фазы (PECVD) при комплексном варьировании параметров процесса. Формирование пленки a-Si: H состоит из 2-х этапов: подготовки поверхности образца в среде аргона и водорода, в результате чего поверхность насыщается атомами водорода, а также этапа роста пленки. Время этапа подготовки поверхности фиксировалось и составило 60 секунд.

Для подтверждения теоретических положений механизма осаждения пленок a-Si: H проведена серия экспериментов по варьированию мощностью, подаваемой на электрод, а также концентрацией прекурсора силана (SiH_4) в газовой смеси при фиксированном значении общего потока ($\text{SiH}_4 + \text{H}_2$). Установлено, что при мощности на электроде 200 Вт, а также при проценте SiH_4 в смеси от 4% до 5% возможно получить бездефектные конформные пленки аморфного кремния в диапазоне толщин от 50 нм до 400 нм (Рисунок 5). При больших значениях мощности на электроде значительно возрастают внутренние напряжения в пленке, что приводит к ее разрушению. А при малом содержании SiH_4 в газовой смеси на поверхности образца образуются области, перенасыщенные водородом, что приводит к образованию дефектов.

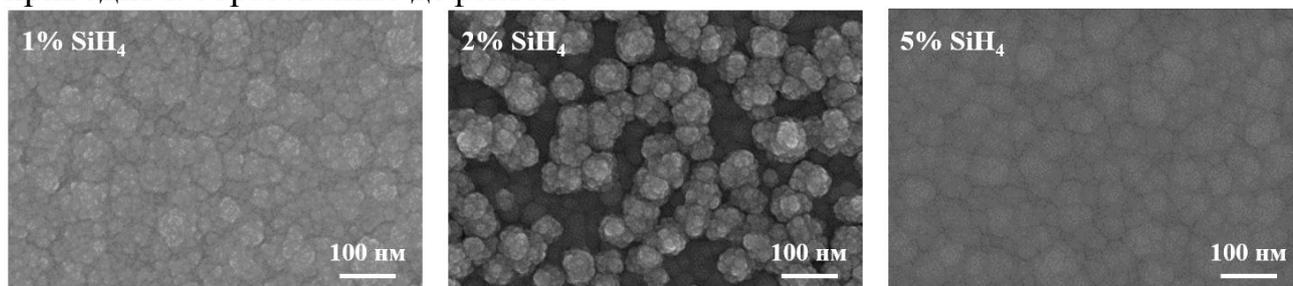


Рисунок 5. Структура пленки аморфного гидрогенизированного кремния в зависимости от процента содержания прекурсора силана в газовой смеси

В качестве метода травления диэлектрической пленки выбран метод плазмохимического травления (ПХТ). Для обеспечения электрического контакта между верхней обкладкой конденсатора и базовым слоем земли, угол профиля после травления диэлектрика должен быть менее 80° . В результате проведения серии экспериментов по подбору реагентов и их концентраций в составе газовой смеси на этапе ПХТ установлено, что требуемый профиль травления (от 65° до 80°) может быть обеспечен при травлении диэлектрической пленки в смеси газов $\text{CF}_4 + \text{Ar}$ в концентрации 50/50. С целью устранения разрушения базового слоя из алюминия в процессе формирования диэлектрического слоя конденсатора было проведено комплексное исследование влияния процесса травления базового слоя

в совокупности с процессом травления пленки a-Si: H на структуру пленки алюминия. В результате проведения серии экспериментов установлено, что использование в качестве базового слоя монокристаллического алюминия позволяет устранить разрушение слоя металла по границам структур за счет уменьшения площади межзеренных границ, взаимодействующих с компонентами газовой смеси как в процессе плазмохимического травления базового слоя, так и после плазмохимического травления диэлектрика (Рисунок 6).

Для оценки качества сформированного диэлектрика спроектирована топология, содержащая 6 сверхпроводниковых копланарных резонатора с сосредоточенными элементами, каждый из которых был рассчитан на собственную резонансную частоту. В процессе криогенной характеристики в криостате растворения проводились измерения резонансной частоты, а также внутренней добротности резонаторов, которые далее пересчитывались в диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь a-Si: H.

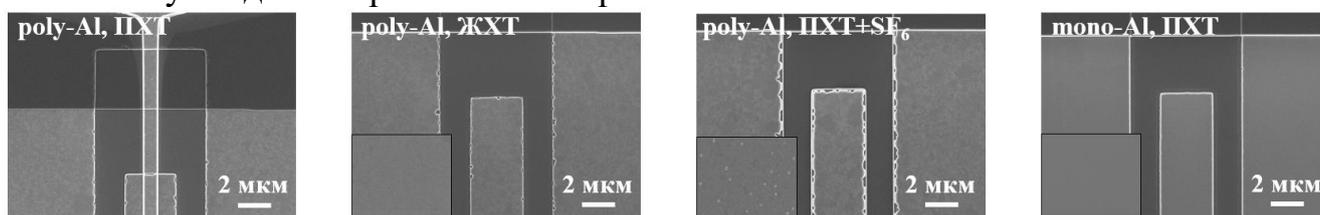


Рисунок 6. Влияние структуры и метода травления базового слоя из алюминия на разрушение границ структур при фиксированном методе травления тонкопленочного диэлектрика

В результате независимых измерений 4-х чипов резонаторов измерены конденсаторы емкостью от 0,2 пФ до 8 пФ (Рисунок 7, а)). Среднее значение тангенса угла диэлектрических потерь для пленки a-Si: H, сформированной при 5% силана в газовой смеси, в однофотонном режиме (1ph) составило $1,1 \times 10^{-4}$, лучший результат $8,0 \times 10^{-5}$ (Рисунок 7, в)). В многофотонном режиме (mрh) – $\text{tg}(\alpha) = 1,1 \times 10^{-6}$ (Рисунок 7, г)). Экспериментально измеренное значение диэлектрической проницаемости ϵ для пленки аморфного гидрогенизированного кремния толщиной 350 нм составило 14,5. Сравнение качества сформированной пленки с результатами ведущих научных групп представлено в Таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение характеристик тонкопленочного диэлектрика из a-Si: H

Группа	Метод	ϵ	$\text{tg}(\alpha) - 1\text{ph}$	Толщина, нм
Эта работа	PECVD	14,5	$8,0 \times 10^{-5}$	350
Google, США	распыление	–	$2,0 \times 10^{-5}$	300
Rigetti, США	распыление	17,5	$4,0 \times 10^{-4}$	9
NIST, США	распыление	–	$2,0 \times 10^{-3}$	200
NIST, США	PECVD	9,0	$2,0 \times 10^{-4}$	–

Помимо резонаторов, содержащих плоскопараллельные конденсаторы, были измерены резонаторы, содержащие планарные катушки индуктивности (Рисунок 7, б)). В результате измерений определена корреляция между индуктивностью катушки, полученной в ходе расчета и ее фактическим значением в криостате растворения. Разработанная многоступенчатая технология изготовления ПУ МСК

включает разработанные операции формирования плоскопараллельных конденсаторов, а также теневого осаждения джозефсоновских переходов и бандаж-структур (Рисунок 4).

В Главе 4 представлена апробация разработанных технологий посредством криогенной характеристика изготoвленных устройств. В результате экспериментальной характеристики в криостате растворения были измерены основные параметры СШПУ: коэффициент усиления, ширина полосы усиления, мощность насыщения и шумовая температура устройств.

Смещение нелинейных элементов внешним магнитным потоком реализовано с использованием внешней сверхпроводниковой катушки, установленной непосредственно в держатель усилителя, а также линии потокового смещения на чипе. Катушка управлялась источником постоянного тока. Рабочий режим параметрического усилителя настраивался посредством подбора величины магнитного смещения, а также частоты и амплитуды накачки.

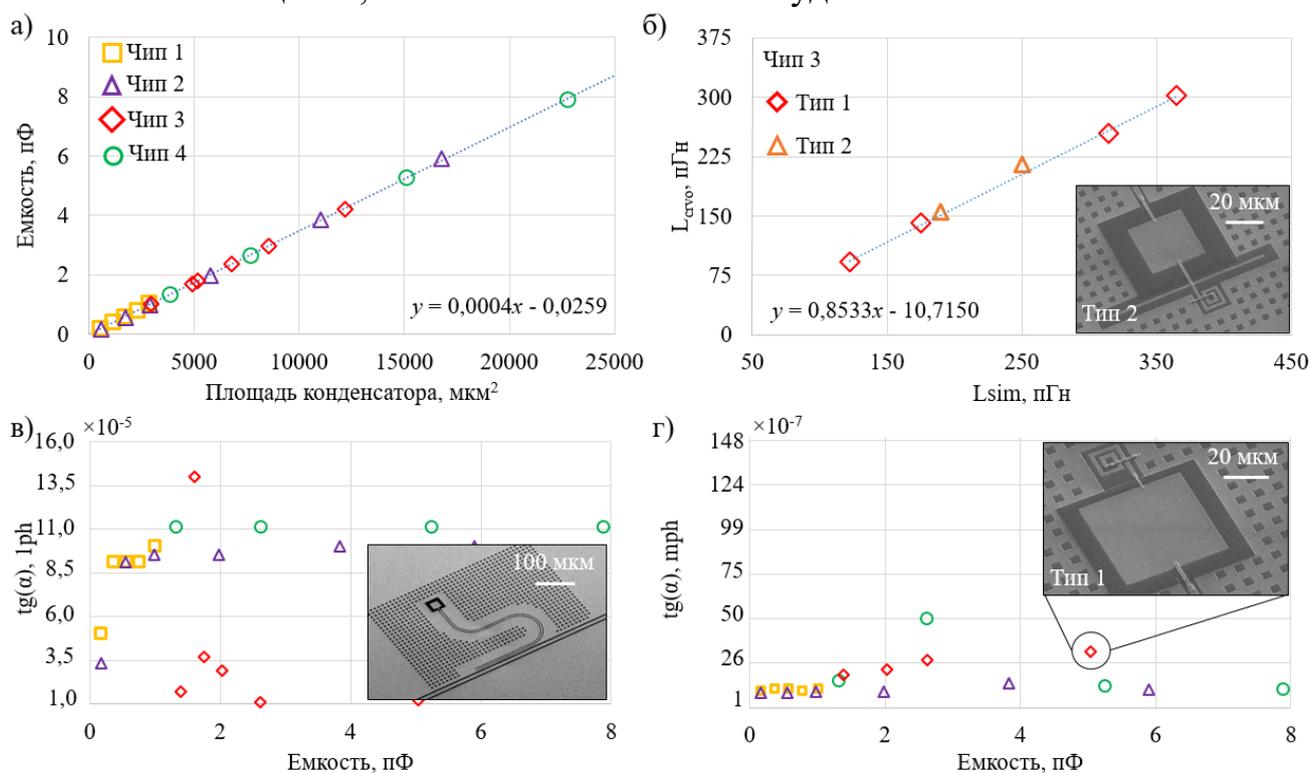


Рисунок 7. Результаты экспериментальной характеристики сверхпроводниковых резонаторов с конденсатором: а) зависимость емкости от площади конденсатора; б) фактические значения индуктивности катушек; в) и г) тангенс угла диэлектрических потерь в однофотонном и многофотонном режимах

Разработанные устройства работали в режиме 3-х волнового смещения фотонов. Настройка рабочего режима начиналась с установки резонансной частоты усилителя равной требуемой центральной частоте. Частота генератора накачки устанавливалась равной удвоенной центральной частоте. Значение коэффициента усиления определялось при помощи измерения разницы амплитуд коэффициента отражения S_{11} измерительного сигнала при включенном и выключенном генераторе накачки.

Измерение мощности насыщения во всей полосе усиления проводилось в два этапа: на первом этапе задавался диапазон измерений, покрывающий полосу усиления, а на втором этапе для каждой частоты из набора снималась зависимость амплитуды коэффициента отражения S_{11} от мощности сигнала на выходе анализатора цепей.

Измерение шумовой температуры на выходе с усилителя производилось методом оценки улучшения соотношения сигнал-шум при выключенном и включенном генераторе накачки. Для каждой частоты из набора при помощи векторного анализатора цепей 15000 раз производилось измерение комплексного коэффициента отражения S_{11} с выключенным и включенным генератором накачки для набора статистики с целью определения соотношения сигнал-шум. Значение шумовой температуры вычислялось на основании известного аналитического выражения.

На основании проведенных измерений разработанные сверхпроводниковые широкополосные параметрические усилители с согласованием импеданса имеют коэффициент усиления более 15 дБ в полосе усиления от 300 МГц до 600 МГц (Рисунок 8). Среднее значение мощности насыщения составило -100 дБм для обоих типов устройств. Результаты измерения шумовой температуры показали уровень шумов усилителя во всем рабочем частотном диапазоне на уровне квантового предела. Пульсации в полосе усиления менее 5 дБ.

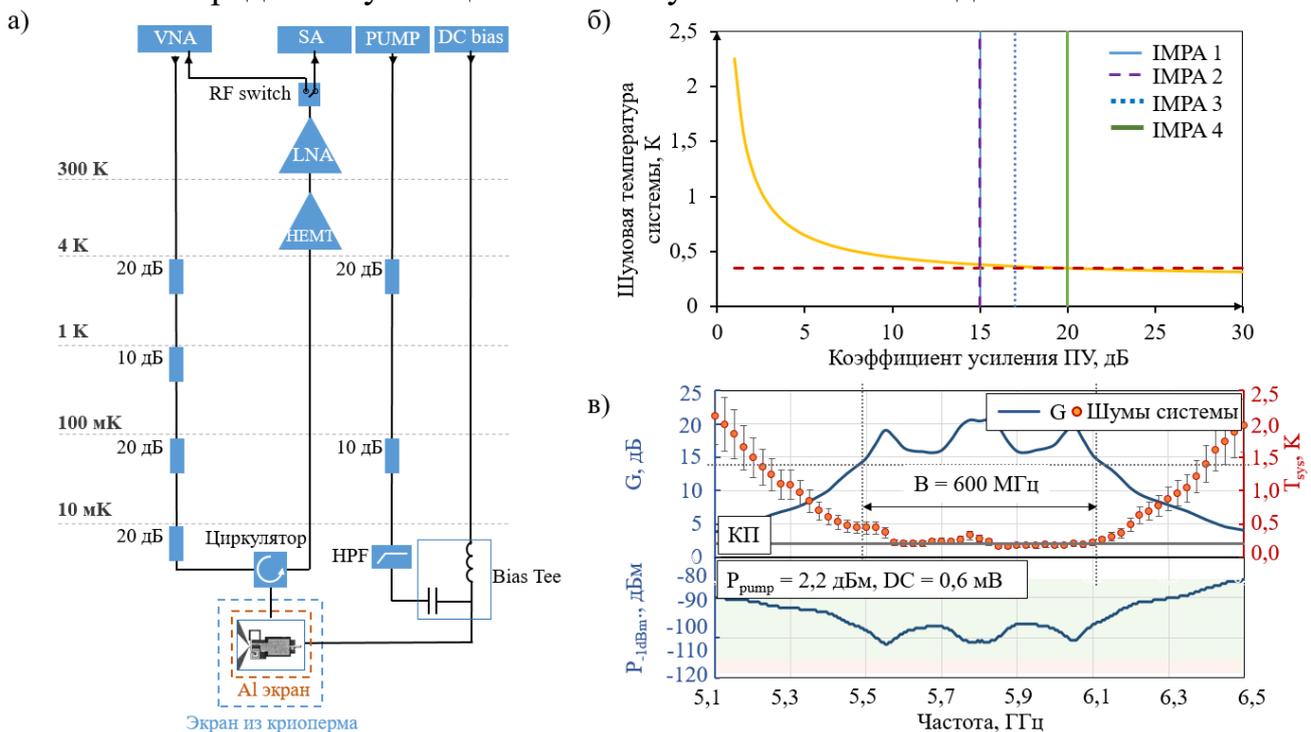


Рисунок 8. Результаты криогенной характеристики разработанных устройств: а) схема измерений; б) шумовая температура системы измерений с учетом разработанных устройств; в) результаты криогенной характеристики СШПУ, изготовленного по многоступенчатой технологии

Изготовленные устройства апробированы при измерениях 2-х, 4-х, 6-ти и 7-ми кубитных квантовых сопроцессоров с точностью квантовых операций более 99,9%, сверхпроводниковых резонаторов с добротностью $Q > 4 \times 10^6$ и квантовой

памяти с эффективностью до 75%. Работа выполнена в совместном научно-образовательном центре «Функциональные Микро/Наносистемы» МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП ВНИИА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ современного состояния в области разработки СШПУ, в результате которого определены основные реализации устройств, использующихся для работы с сигналами однофотонной мощности, а также материалы и методы их изготовления.

2. В результате проведенной классификации СШПУ для работы в составе квантовых сопроцессоров выбрана реализация параметрического усилителя с согласованием импеданса с использованием СНАИЛ для перестройки нелинейной индуктивности.

3. Разработана технология изготовления СШПУ с согласующим контуром на основе микрополосковых резонаторов, позволяющая изготавливать устройства за один цикл электронно-лучевой литографии и теневого осаждения.

4. Для формирования бездефектных пленок аморфного гидрогенизированного кремния в широком диапазоне толщин рекомендуется использовать значения мощности на электроде 200 Вт, а также содержание прекурсора силана (SiH_4) в газовой смеси от 4% до 5%.

5. Для устранения разрушения базового слоя по границам зерен рекомендуется использовать в качестве материала базового слоя монокристаллический алюминий, а также проводить травление многослойного диэлектрика в смеси газов $\text{Ar} + \text{CF}_4$ в концентрации 50/50.

6. Разработанная технология изготовления плоскопараллельных конденсаторов позволяет формировать конденсаторы в диапазоне емкостей от 0,2 пФ до 8 пФ, при этом тангенс угла диэлектрических потерь гидрогенизированного аморфного кремния в однофотонном режиме менее $8,6 \times 10^{-5}$, в многофотонном режиме $1,1 \times 10^{-6}$, а значение диэлектрической проницаемости материала составляет 14,5.

7. В результате экспериментальной апробации технологии изготовления СШПУ с микрополосковым согласующим контуром охарактеризован параметрический усилитель, соответствующий следующим техническим параметрам:

- Коэффициент усиления: более 17 дБ
- Полоса усиления: 600 МГц
- Мощность насыщения (-1 дБ): -95 дБм
- Шумовая температура: менее 350 мК.

8. В результате экспериментальной апробации многоступенчатой технологии изготовления СШПУ охарактеризован параметрический усилитель, позволяющий снизить чувствительность коэффициента усиления устройства к изменениям микроволнового окружения и обеспечить уровень пульсаций в профиле менее 5 дБ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По материалам и основному содержанию работы опубликованы следующие научные работы:

1. Lumped-element SNAIL parametric amplifier with two-pole matching network/ D. A. Moskaleva (D. A. Ezenkova) [et al.] // Applied Physics Letters. 2024. 125(16), 164003. (0,81 п.л./0,81 п.л.).
2. Improving Josephson junction reproducibility for superconducting quantum circuits: junction area fluctuation / D. A. Ezenkova [et al.] // Scientific Reports. 2023. 13(1), 6772. (0,81 п.л./0,27 п.л.).
3. Deep multilevel wet etching of fused silica glass microstructures in BOE solution / D. A. Ezenkova [et al.] // Scientific Reports. 2023. 13(1), 5228. (1,04 п.л./0,25 п.л.).
4. Optimization of shadow evaporation and oxidation for reproducible quantum Josephson junction circuits / D. A. Ezenkova [et al.] // Scientific Reports. 2023. 13(1), 4174. (0,81 п.л./0,27 п.л.).
5. Optical hydrogen sensing with high-Q guided-mode resonance of Al₂O₃/WO₃/Pd nanostructure / D. A. Ezenkova [et al.] // Scientific Reports. 2023. 13(1), 890. (1,04 п.л./0,25 п.л.).
6. Broadband SNAIL parametric amplifier with microstrip impedance transformer / D. A. Ezenkova [et al.] // Applied Physics Letters. 2022. 121(23), 232601. (0,81 п.л./0,81 п.л.).
7. Surface plasmon driven enhancement of linear and nonlinear magneto-optical Kerr effects in bimetallic magnetoplasmonic crystals in conical diffraction / D. A. Ezenkova [et al.] // Physical Review B. 2022. 105(15), 155408. (1,16 п.л./0,25 п.л.).
8. Optical Effects in Magnetoplasmonic Crystals Based on 1D Metal-Dielectric Lattice / D. A. Ezenkova [et al.] // Optics and Spectroscopy. 2020. 128(9). (0,69 п.л./0,15 п.л.).
9. Low-Damage Reactive Ion Etching of Nanoplasmonic Waveguides with Ultrathin Noble Metal Films / D. A. Ezenkova [et al.] // Applied Sciences. 2019. 9(20), 4441. (1,96 п.л./0,15 п.л.).
10. Способ изготовления сверхпроводниковых кубитов с отжигом фокусированным ионным пучком: а.с. 2813743 РФ / Д. А. Москалева (Д. А. Езенкова) [и др.] // заявл. 29.09.23, опубл. 16.02.24. Бюл. №5.