

На правах рукописи
УДК

Пищимова Анастасия Александровна

**Исследование и разработка
нанотехнологических методов создания
джозефсоновских переходов для многокубитных схем**

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 технических наук,
Киреев Валерий Юрьевич,
старший научный сотрудник,
АО «Зеленоградский нанотехнологический центр»

доктор технических наук,
Кленов Николай Викторович,
доцент физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация:

**Институт радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН**

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.

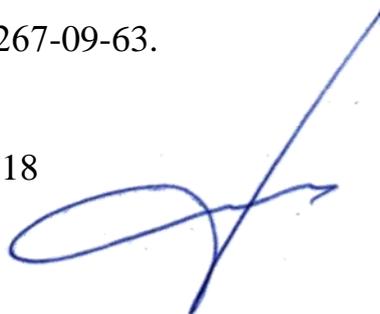
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

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. Вычислительная мощность современных суперкомпьютеров недостаточна для решения ряда NP-полных задач в области информационной безопасности, машинного обучения, квантовой химии, моделирования новых материалов и лекарств. В 1980 г. Ю. Манин и Р. Фейнман независимо предложили идею квантовых вычислений, позволяющих преодолеть ограничения современной вычислительной техники. В 1994 г. П. Шор предложил квантовый алгоритм факторизации и дискретного логарифмирования, позволяющий разложить простые числа за полиномиальное время. Спустя семь лет с использованием этого алгоритма компанией IBM было экспериментально показано разложение числа 15 с использованием кубитов на основе явления ядерного магнитного резонанса. В настоящее время разработано множество физических реализаций кубитов – квантовых двухуровневых систем, в качестве которых используют зарядовые состояния изолированных атомов или ионов, электронный или ядерный спин, поляризацию фотонов. Одной из наиболее перспективных реализаций квантовых вычислителей являются сверхпроводниковые схемы ввиду их масштабируемости и совместимости с традиционными планарными технологиями микроэлектроники. Так, в 1999 г. компанией NEC (Я. Накамура, Ю. Пашкин, Д. Цай) была проведена первая экспериментальная демонстрация квантового режима работы зарядового кубита, а в 2019 году компанией Google показано преимущество квантового компьютера над классическим суперкомпьютером при решении специфической задачи. Однако для решения практически полезных задач необходимы квантовые процессоры с сотнями надежных, связанных между собой логических кубитов. Ключевыми препятствиями на пути создания сверхпроводниковой элементной базы для квантовых вычислений являются малые времена когерентности, в течение которых могут выполняться логические операции, а также высокие требования к воспроизводимости критических размеров наноструктур. Поиск материалов, конструкций и технологических процессов для многокубитных высококогерентных схем являются актуальными задачами, работа над которыми ведется как в рамках государственных программ развития (США, Китай, Франция, Россия, Австралия, Великобритания), так и в исследованиях крупнейших ИТ-компаний (IBM, Google, Intel, Microsoft).

Состояние проблемы. Основной вклад в развитие физических принципов и конструкций сверхпроводниковых квантовых схем внесли научные группы под руководством М. Деворе (M. Devoret), Д. Мартиниса (J. Martinis), Р. Шелкова (R. Schoelkopf), Л. Дикарло (L. DiCarlo) и А. Вальрафа (A. Wallraff). В основе работы таких схем лежит эффект Джозефсона – явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика толщиной менее 2 нм, разделяющий два сверхпроводника. Эта структура называется джозефсоновским переходом и является важнейшим элементом сверхпроводниковых кубитов, нелинейность которого позволяет выделить два рабочих энергетических уровня для проведения логических операций. Энергия системы зависит от резонансной частоты кубита, которая определяется параметрами джозефсоновских переходов –

толщиной слоя диэлектрика и его площадью. В многокубитных схемах предъявляются высокие требования к воспроизводимости резонансных частот кубитов, и соответственно, точности изготовления линейных размеров джозефсоновских переходов. Изготовление наноструктур осуществляется методом взрывной литографии, включающим операции электронно-лучевой литографии для формирования двухслойной резистивной маски и теневого осаждения металла. По состоянию на 2021 г. наилучшая повторяемость изготовления Al-AlO_x-Al джозефсоновских переходов достигнута научными группами из университетов Беркли (Berkeley) и Чалмерс (Chalmers), которые продемонстрировали стандартное отклонение электрического сопротивления менее 7% для переходов площадью от 0,01 до 0,04 мкм². Однако в работах получены малые времена когерентности относительно стандартной мостовой технологии, а также рассмотрен узкий диапазон площадей джозефсоновских переходов. Кроме того, используемый в джозефсоновских переходах аморфный диэлектрик AlO_x с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь (более 6×10^{-4}) вносит вклад до 34% в суммарные диэлектрические потери схем. В 2006 г. научной группой Д. Папаса показано, что использование кристаллического диэлектрика в фазовом кубите позволяет снизить диэлектрические потери схемы на 80%, однако для формирования такого диэлектрика необходимы высокие температуры нагрева подложки, что может быть обеспечено только с использованием неорганических масок. Ведущими группами под руководством Ю. Накамура, В. Оливера и Д. Ву были предложены подходы к изготовлению неорганических масок, однако ни один из них не позволил получить высококогерентные сверхпроводниковые кубиты. Поэтому задачи поиска новых материалов и методов формирования неорганических масок, а также разработки методов повторяемого изготовления джозефсоновских переходов в широком диапазоне площадей от 0,008 до 0,25 мкм² являются актуальными.

Целью работы является исследование и разработка методов повышения точности изготовления линейных размеров джозефсоновских переходов и снижения тангенса угла диэлектрических потерь в многокубитных сверхпроводниковых схемах. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ современного состояния нанотехнологических методов создания джозефсоновских переходов, применяемых технологических процессов, материалов и оборудования, а также методов снижения диэлектрических потерь в сверхпроводниковых схемах.
2. Разработана математическая модель процесса электронно-лучевой литографии в двухслойной резистивной маске на основе полиметилметакрилата и проведены исследования зависимости поглощенной дозы от топологических размеров элементов вблизи джозефсоновского перехода.
3. Выполнен конструктивно-технологический анализ процесса теневого осаждения через двухслойную резистивную маску для изготовления джозефсоновских переходов площадью от 0,01 до 100 мкм².

4. Разработаны тестовые кристаллы для измерения линейных размеров, электрического сопротивления и тангенса угла диэлектрических потерь сверхпроводниковых кубитов-трансмонов.
5. Проведено экспериментальное исследование влияния технологических режимов электронно-лучевой литографии и теневого осаждения на точность изготовления линейных размеров джозефсоновских переходов.
6. Разработан технологический процесс изготовления джозефсоновских переходов с использованием двухслойной неорганической маски.
7. Проведена экспериментальная апробация разработанных методов формирования джозефсоновских переходов в составе многокубитных сверхпроводниковых схем различных типов.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика формирования наноструктур джозефсоновских переходов с малой систематической погрешностью, отличающаяся выбором материалов и топологических размеров двухслойной резистивной маски на основе разработанной математической модели процесса электронно-лучевой литографии, анализе ограничений оборудования с частотой генератора шаблонов равной 50 МГц и обработке массива экспериментальных данных.
2. Сформулированы критерии выбора параметров технологической операции теневого осаждения с использованием стандартной мостовой технологии, а именно толщин двухслойной резистивной маски, азимутального и полярного углов осаждения в плоскости осаждения и кремниевой подложки, что позволяет сформировать джозефсоновские переходы площадью от $0,01 \text{ мкм}^2$ до $0,25 \text{ мкм}^2$ с малым стандартным отклонением электрического сопротивления в составе многокубитных схем.
3. Разработана методика и решена проблема формирования ультрагладких алюминиевых слоев, отличающаяся предложенными материалами двухслойной неорганической маски и маршрутом технологического процесса изготовления, что позволило сформировать сплошные монокристаллические пленки алюминия в области джозефсоновских переходов с характерными размерами до 80 нм.

Практическая значимость:

1. Результаты работы были использованы при изготовлении первых сверхпроводниковых схем в РФ для развития в области квантовых вычислений (двухкубитный процессор для реализации алгоритма Гровера, кубиты-флаксоны с малой вероятностью ошибок, кубиты-трансмоны со временем релаксации более 150 микросекунд, симуляторы до 25 кубитов), а также в области биосенсорики (одnofотонный источник, сверхчувствительные датчики для детектирования липопротеинов низкой плотности и флуоресценции молекул).
2. Разработанная неорганическая маска позволяет существенно расширить технологические допуски для формирования высококачественных кристаллических пленок металла и диэлектрика в области джозефсоновских переходов, что может быть использовано при создании твердотельного квантового процессора с ультранизким уровнем шумов и сверхчувствительных магнитометров.

Результаты внедрения. Разработанные методики и режимы работы технологического оборудования внедрены в НИР, проводимые ФГУП «ВНИИА» и МГТУ им. Н.Э. Баумана, в том числе научно-исследовательские проекты фонда перспективных исследований «Лиман», «Наноплазмоника» и «Прибой». Предложенные модели и методика процесса электронно-лучевой литографии внедрены в учебный процесс кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе проведен анализ современного состояния нанотехнологических методов создания джозефсоновских переходов и проведены экспериментальные исследования, выполненные по плану полного факторного эксперимента. Результаты экспериментальных исследований обработаны методами дисперсионного анализа. Для анализа полученных сверхпроводниковых устройств выбраны следующие методы измерения параметров сверхпроводниковых устройств: оптическая и сканирующая электронная микроскопия для контроля поверхности и измерения линейных размеров изготовленных устройств, измерение четырех зондовым методом для оценки электро-физических параметров изготовленных устройств, спектральная рефлектометрия для измерения толщины резистивных пленок, стилусная профилометрия для определения толщины и среднеквадратичной шероховатости металлического слоя и характеристика в рефрижераторе растворения для оценки шума.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы обусловлена использованием современного поверенного измерительного оборудования и стандартизованных методик измерения, контрольными измерениями с ведущими мировыми лабораториями, а также корректным использованием методов статистического анализа при обработке достоверного объема данных за длительный период и положительной оценкой на научных международных конференциях. Подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований и результатами внедрения разработанных методик и режимов работы технологического оборудования в НИР и ОКР, проводимых ФГУП «ВНИИА» и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Технологический процесс изготовления джозефсоновских переходов с малым стандартным отклонением номинальных размеров менее ± 5 нм обеспечивается методом электронно-лучевой литографии за счет контроля поглощенной дозы в резистивной маске в диапазоне от 0,2 до 0,3 относительно базового значения, коррекции ширины моста Долана, выбора ускоряющего напряжения не менее 50 кэВ, размера рабочего поля и шага экспонирования.

2. Предложенный метод изготовления джозефсоновских переходов через двухслойную резистивную маску, отличающийся выбором толщин нижнего (500 нм) и верхнего (300 нм) слоев резистивной маски, углов осаждения менее 45° и области переосаждения равной 100 нм, позволяет обеспечить высокую повторяемость

электрического сопротивления джозефсоновских переходов площадью от 0,008 мкм² с допуском не более $\pm 0,1$ относительно номинального значения.

3. Разработанные методы формирования джозефсоновских переходов позволяют изготовить сверхпроводниковые схемы различных типов с тангенсом угла диэлектрических потерь не более 10^{-6} за счет выбора направления потока осаждаемого металла вдоль оси отверстий резистивной маски и увеличения ширины металлических дорожек между джозефсоновским переходом и схемой более 1 мкм.

4. Разработанный технологический процесс с использованием неорганической маски позволяет формировать Al-AlO_x-Al джозефсоновские переходы с характерными размерами до 80 нм и среднеквадратической шероховатостью поверхности пленки нижнего электрода алюминия не более 1,1 нм.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах ФГУП «ВНИИА». Москва, 2020-2022 и МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, 2019-2022, а также международных конференциях: PIERS–Progress in electromagnetics research symposium. Санкт-Петербург, 2017; MNE–44th International conference on micro and nanoengineering. Копенгаген (Дания), 2018; SPIE–International society for optics and photonics. Страсбург (Франция), 2018; MNE–45th International conference on micro and nanoengineering. Родос (Греция), 2019; ICQT–5th International conference on quantum technologies. Москва, 2019; QTS–4th International school of quantum technologies. Сочи, 2020; APS–American physical society march meeting. Денвер (Колорадо), 2020; MNE–Micro and nanoengineering conference. Турин (Италия), 2021.

Публикации. По теме работы опубликованы 12 научных публикаций, из которых 8 – в изданиях Scopus, 7 – РИНЦ, а также получен 1 патент РФ.

Личный вклад Пищимовой А.А. состоял в постановке задач, выборе материалов, конструировании базовых элементов, разработке математических моделей зависимостей свойств элементов от технологических параметров, получении и обработке экспериментальных данных. Разработала режимы электронно-лучевой литографии для формирования наноструктур в чувствительном к электронному излучению резистивном слое с характерными размерами от 0,08 до 100 мкм с допуском на линейный размер не более ± 12 нм и период не более ± 15 нм. Предложила альтернативный маршрут технологического процесса изготовления субмикрометровых структур при высоких температурах нагрева подложки, руководила выполнением всех операций в рамках предложенного процесса. Лично провела все расчеты, получила результаты моделирования и подготовила все графические иллюстрации, представленные в диссертационной работе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 168 страницах, содержащих 139 рисунков, 22 таблицы и список литературы из 144 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность решения поставленных в диссертации задач, сформулирована цель и задачи исследования, обоснована научная новизна, показано место джозефсоновских переходов (ДП) в многокубитных схемах и роль технологических методов их изготовления.

В первой главе проведен анализ современного состояния и тенденций развития нанотехнологических методов создания сверхпроводниковых квантовых схем. Отмечено, что одна из ключевых проблем сверхпроводниковых схем – малое время релаксации – объясняется наличием двухуровневых дефектов, источниками которых могут быть любые диэлектрические загрязнения атомарных размеров, такие как молекулы водорода, гидроксогруппы, отдельные электроны, точечные дефекты кристалла и другие. На основе проведенного сравнительного анализа выбраны материалы и оборудование, а также рассмотрены методы уменьшения диэлектрических потерь за счет оптимизации конструкций отдельных элементов схемы и технологических процессов. Наиболее перспективными являются кубиты-трансмоны, которые отличаются масштабируемостью и низкой чувствительностью к флуктуациям заряда, в том числе за счет малых площадей ДП от $0,01 \text{ мкм}^2$. Сложность изготовления таких элементов обусловлена зависимостью резонансной частоты кубита от площади ДП, что особенно критично в случае многокубитных схем с неперестраиваемой связью (Рис. 1, а). Чтобы определить требуемый допуск на линейный размер ДП, был проведен расчет резонансной частоты кубита для различных плотностей критического тока p при шунтирующей емкости 80 фФ (Рис. 1, б). Верхний предел рабочего диапазона частот обусловлен ограничением используемой СВЧ электроники, нижний – возможностями электронно-лучевой литографии, поскольку с уменьшением размера увеличивается чувствительность к его изменению.

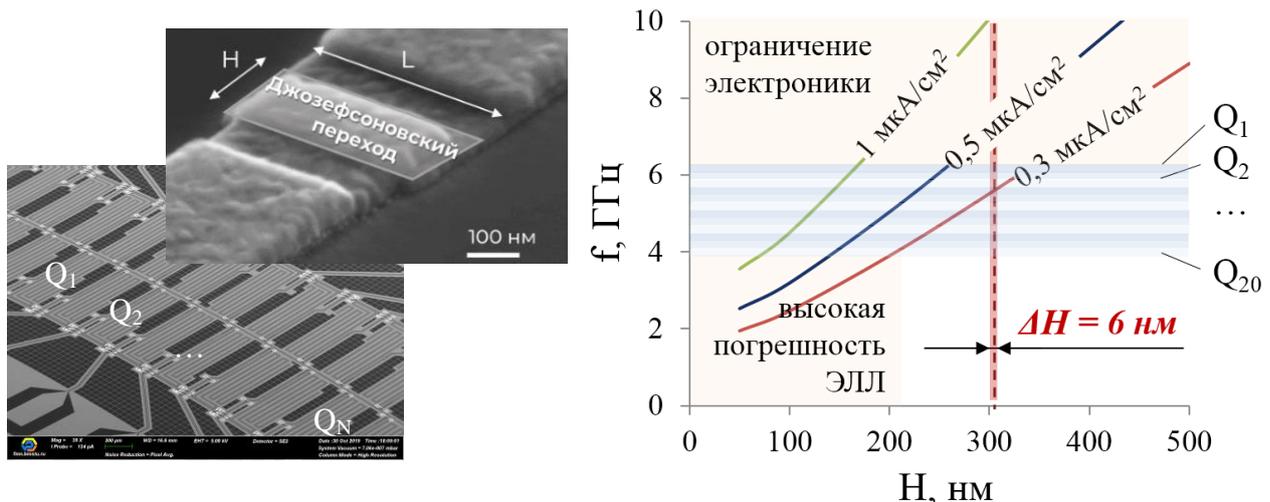


Рис. 1. Многокубитные сверхпроводниковые схемы:

- а) изображения схемы и перехода под углом, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа, б) расчет резонансной частоты кубита-трансмона

Увеличение линейного размера может быть достигнуто за счет уменьшения плотности критического тока, однако при значении j_c менее $0,3 \text{ мкА/см}^2$ формируется тонкий трудно контролируемый слой диэлектрика, что может привести к короткому замыканию. С учетом ограничений СВЧ электроники и литографии, ширина рабочего диапазона резонансных частот кубитов составляет менее 3 ГГц, а значит, чтобы сформировать схему, содержащую не менее 25 кубитов, допуск на линейный размер должен быть менее 10 нм.

Традиционная технология изготовления Al-AlO_x-Al джозефсоновских переходов заключается в осаждении первого слоя алюминия через двухслойную резистивную маску, оксидировании и осаждении второго слоя металла. Важно учитывать, что площадь ДП зависит от большого количества технологических факторов (Рис. 2). Во-первых, ширина отверстий определяется процессом электронно-лучевой литографии, которая позволяет формировать топологический рисунок в чувствительном к электронному излучению резистивном слое. Взаимодействие потока электронов с резистом приводит к систематической погрешности, а иногда и разрыву в области хрупкой подвесной структуры – моста Долана.

Кроме того, абберрации и некорректный выбор режимов литографии сопровождаются

увеличением диапазона рассеивания линейных размеров, а значит и резонансной частоты кубита.

Во-вторых, ширина осажденного металла представляет собой «тень» маски на подложке, что приводит к необходимости учета

трехмерной конфигурации маски и увеличения шероховатости края переходов. В-третьих, промежуточные операции подготовки поверхности, такие как физическое распыление ионами аргона или кислорода, могут приводить к изменению линейных размеров сформированных отверстий в резистивной маске, что также должно учитываться в технологической корректировке.

Все существующие маршруты технологического процесса (МТП) формирования многокубитных сверхпроводниковых схем могут быть реализованы в один, два или три литографических цикла, причем в качестве маски могут быть использованы резистивные или неорганические слои. Проведенный сравнительный анализ технологических процессов выявил необходимость разработки операции электронно-лучевой литографии для МТП в один цикл, который ввиду значительного сокращения количества операций позволяет сократить стоимость изделий и временные издержки, в три цикла – для

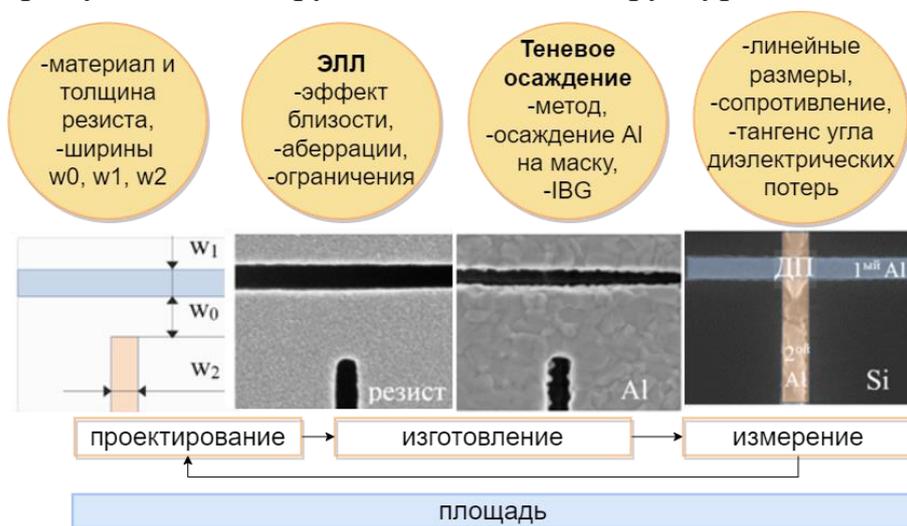


Рис. 2. Анализ факторов, определяющих площадь джозефсоновских переходов

увеличения времени релаксации схем за счет формирования качественных интерфейсов, а также разработки технологического процесса изготовления неорганической маски для формирования субмикрометровых Al-AlO_x-Al структур с высоким качеством металлических и диэлектрических пленок.

Далее в работе рассмотрены методы измерений морфологических, геометрических и электрофизических характеристик джозефсоновских переходов. Поскольку требуется обработка статистически значимого количества измерений размеров, была разработана методика автоматических измерений с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), позволяющая на порядок сократить время измерений. Ввиду низкой прочности резистивной маски, было предложено проводить измерения не отверстий в маске, а соответствующей им ортогонально осажденной металлической структуры. Измерение проводится посредством обработки сигнала, полученного с детектора вторичных электронов, максимумам интенсивности сигнала соответствуют границы осажденной структуры. Точность полученных измерений зависит от корректной настройки электронно-оптической системы, позиционирования образца и алгоритма обработки сигнала. По результатам измерений строится столбиковая диаграмма линейных размеров. Наиболее часто оценку воспроизводимости резонансной частоты проводят посредством измерения электрического сопротивления ДП методом ван дер Пау. С учетом определения плотности критического тока, измерение электрического сопротивления позволяет также косвенно получить значение площади перехода, что было использовано в работе. Заключительная стадия характеристики ДП заключалась в оценке диэлектрических потерь, вносимых разработанным процессом изготовления. Для этого были проведены измерения резонансной частоты и времени релаксации в рефрижераторе растворения и рассчитан тангенс угла диэлектрических потерь.

Вторая глава посвящена проектированию двухслойного резистивного слоя для формирования ДП с учетом особенностей технологического процесса теневого осаждения. Электронно-лучевая литография служит инструментом для формирования структур с разрешением менее 10 нм, однако велика систематическая погрешность, вызванная рассеянием электронов в резистивной маске (эффектом близости). Чтобы определить влияние топологического рисунка вблизи ДП на его линейный размер, была разработана математическая модель зависимости поглощенной дозы в двухслойной резистивной маске на основе полиметилметакрилата (ПММА). Был проведен расчет функции распределения электронов методом Монте Карло для выбранных ускоряющего напряжения 50 кэВ, диаметра пучка равного 3 нм и 10³ траекторий, двух слоев резиста толщиной 500 и 300 нм. Полученное распределение поглощенной дозы соответствует действительному изображению структуры, различным цветам соответствуют энергии в диапазоне от 0,2 до 1,3 относительно номинальной дозы экспонирования (Рис. 3, а). Для количественной оценки влияния энергии на линейный размер джозефсоновских переходов были изготовлены и измерены 49 структур с различной поглощенной дозой. Полученная зависимость линейного размера изготовленной структуры от рассчитанной поглощенной дозы

представлена на Рис. 3, б, коэффициент детерминации равен 0,95. Согласно полученным результатам максимальный вклад оказывает контактная площадка, изменение ширины H_{pad} которой сопровождается увеличением поглощенной энергии до 15%. Уменьшение этого влияния может быть достигнуто за счет увеличения ширины моста Долана w_0 до 500 нм или выбора резиста с высокой чувствительностью к электронному излучению.

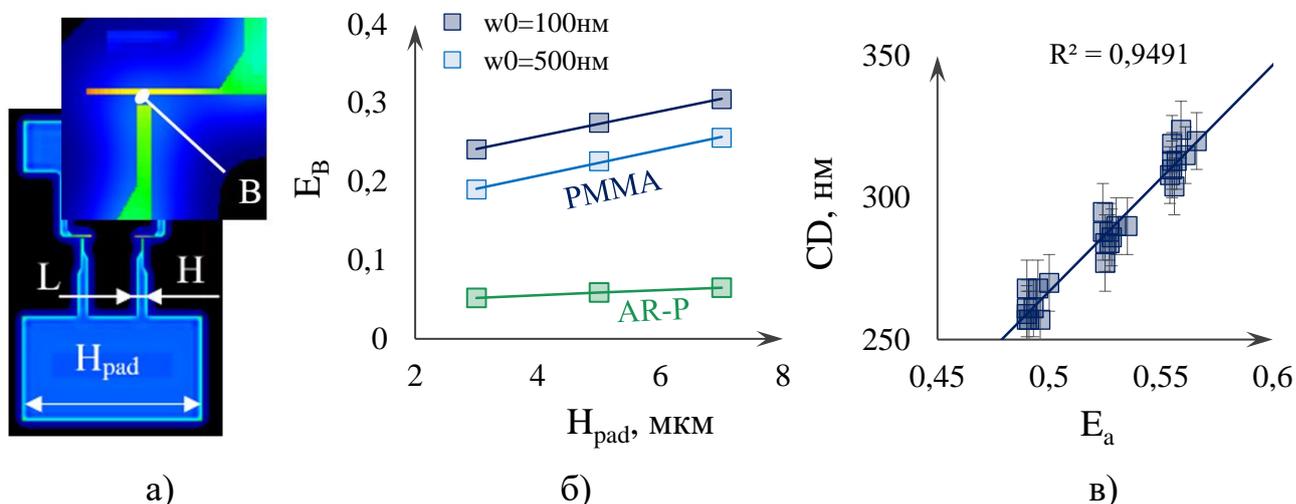


Рис. 3. Эффект близости в двухслойной резистивной маске:
 а) распределение поглощенной дозы, б) зависимость поглощенной дозы от ширины контактных площадок, моста Долана и материалов, в) зависимость ширины переходов от поглощенной дозы

В процессе теневого осаждения ширина ДП определяется «тенью» резистивной маски, что приводит к необходимости учета трехмерной конфигурации маски. Проведенный анализ литературы выявил, что все ДП могут быть изготовлены двумя методами: с использованием мостовой и безмостовой схемы осаждения (таблица 1). Первый метод может быть реализован с использованием трех конструкций резистивной маски, а второй – с использованием квадратных «4» и прямоугольных «5» отверстий. В результате простейших геометрических вычислений были выявлены технологические факторы, определяющие ширину h и длину l ДП, а именно углы осаждения $\alpha_{1,2}$, толщины нижнего и верхнего резистов $d_{1,2}$, ширины моста и отверстий в резистивной маске $w_{0,1,2}$. В результате проведенного анализа существующих методов формирования джозефсоновских переходов сформулированы рекомендации по выбору схем осаждения для различных типов кубитов: третий тип может быть использован для изготовления массива переходов N_{max} в потоковых кубитах; используемые в фазовых кубитах большие площади S_{max} до 100 мкм^2 могут быть получены по безмостовой технологии «5», а наиболее распространенные кубиты-трансоны, предъявляющие высокие требования к стабильности технологии изготовления, могут быть изготовлены с использованием второй схемы осаждения. Как видно из Таблицы 1, в зависимости от схемы осаждения количество факторов, определяющих площадь ДП, может варьироваться от 4 до 8 шт.

Таблица 1.

Классификация методов изготовления ДП в зависимости от схемы осаждения

№	мостовая			безмостовая	
	1	2	3	4	5
СЭМ					
схема					
ф-ла	$h = 2d_1 \tan \alpha_1 - w_0, l = w_2$			$h(l)$	$h = w_1, l = w_2,$
	$h = w_1 - d_2 \tan \alpha_2$			$= w_{1,2} - \frac{d_1}{\tan \alpha_{1,2}}$	$\alpha_{1,2} > \tan^{-1} \frac{w_{1,2}}{d_1}$
	$l = w_2 - d_2 \tan \alpha_1$				
S	1,5 мкм ²			100 мкм ²	0,15 мкм ²
N	1 шт.	1 шт.	> 100 шт.		

Была предложена и описана схема осаждения, которая позволяет снизить чувствительность к изменению технологических параметров. Так, при формировании области переосаждения Δ отклонения в толщине резиста до 50 нм или угле осаждения до 3° оказывают влияние на изменение длины этой области, а не самой площади перехода (Рис. 4, а). Для проверки гипотезы были изготовлено 2 тестовых кристалла: с использованием стандартной и предложенной схемы осаждения, каждый из которых содержал по 2500 структур.

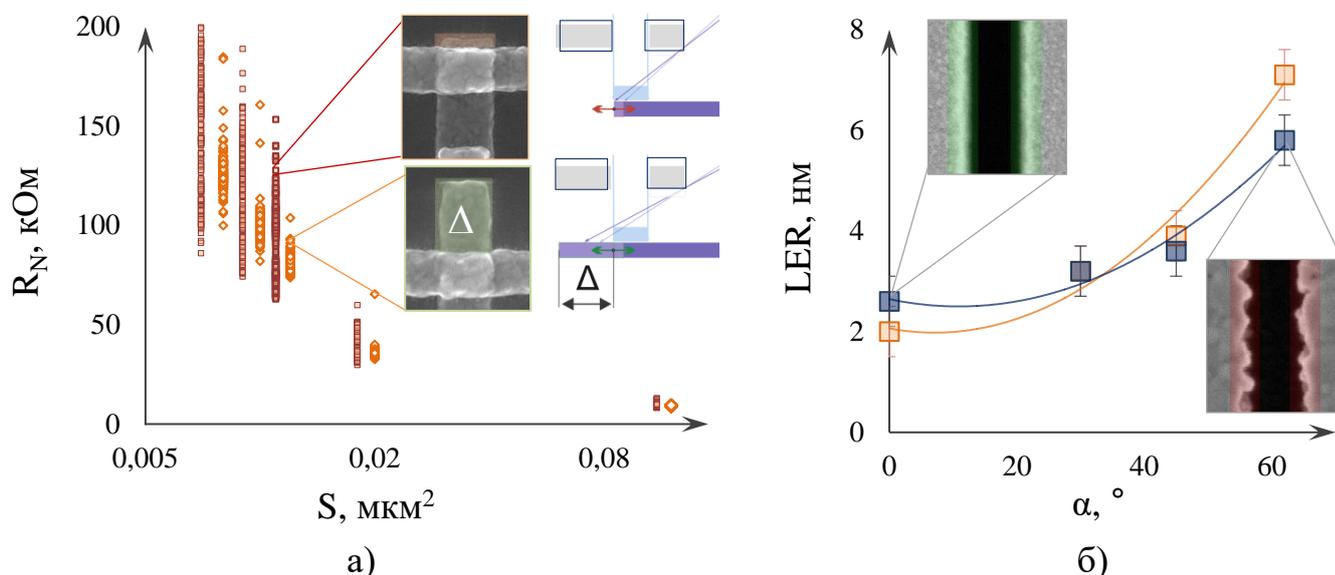


Рис. 4. Измерение джозефсоновских переходов:

- а) диаграмма рассеивания электрического сопротивления ДП для двух схем осаждения, б) зависимость шероховатости края маски от угла осаждения

Измерения электрического сопротивления R_N с использованием четырехзондового метода продемонстрировали, что наличие области переосаждения позволяет уменьшить стандартное отклонение сопротивления более, чем в 2 раза во всем диапазоне площадей S джозефсоновских переходов от 0,008 до 0,120 мкм². Другой особенностью теневого осаждения является то, что металл осаждается на торцы маски, а значит, шероховатость перехода зависит от режима осаждения. Экспериментально было получено уменьшение среднеквадратичной шероховатости края маски LER от 7 до 3,2 нм за счет выбора угла осаждения α менее 45° (Рис. 4, б).

По результатам проведенного моделирования эффекта близости в резистивной маске, анализа факторов для различных схем осаждения и экспериментального исследования влияния угла осаждения на шероховатость края были сформулированы рекомендации по выбору технологических параметров при изготовлении ДП площадью от 0,01 до 0,25 мкм² в составе сверхпроводниковых схем. Так, эффект близости зависит от материала резиста и накладывает ограничения на ширину моста Долана. Слишком малая ширина приводит к увеличению поглощенной дозы, и как следствие, разрыву подвесной структуры. Напротив, при чрезмерном увеличении ширины поглощенной энергии недостаточно для удаления нижнего резистивного слоя под мостом Долана, в результате чего металл осаждается на маску, а в области ДП наблюдается разрыв металлической пленки. Малые толщины нижнего резистивного слоя и угла осаждения ограничивают ширину перехода значением менее 100 нм, большие – приводят к увеличению шероховатости края ДП. Таким образом, толщина нижнего слоя резиста d_l должна лежать в диапазоне от 350 до 500 нм, ширина моста Долана w_0 – от 150 до 400 нм, угол осаждения α – от 15 до 45° (Рис. 5).

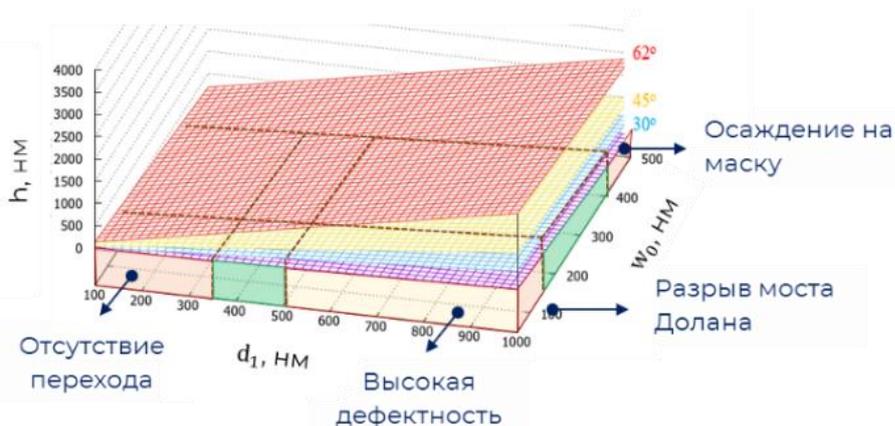


Рис. 5. Конструктивно-технологические ограничения процесса теневого осаждения через двухслойную резистивную маску

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния режимов электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) и теневого осаждения на выходные параметры сверхпроводниковых схем. Одним из основных параметров ЭЛЛ является ток экспонирования. Чем выше ток экспонирования I – тем меньше длительность процесса t и больше минимальный шаг пучка SS_{min} , что приводит к ухудшению точности изготовления (Рис. 6, а). Для уменьшения временных затрат

без ухудшения качества наноструктур были использованы режимы с малым и большим током при изготовлении сверхпроводниковой схемы по МТП в 1 литографический цикл. Затем было проведено экспериментальное исследование влияния режимов ЭЛЛ на линейный размер ДП. В качестве факторов были рассмотрены размер поля экспонирования в диапазоне от 50 до 500 мкм², шаг экспонирования – от 2 до 5 нм, алгоритм экспонирования – вдоль и поперек короткой стороны. При измерении учитывался линейный размер структур, общее количество структур более 500 шт. Для каждой группы структур были рассчитаны математическое ожидание CD и стандартное отклонение ширины осажденных металлических структур. Уменьшение размера рабочего поля FS от 0,25 до 0,01 мм² приводит к уменьшению стандартного отклонения линейного размера от 7 до 2 нм (Рис. 6, б), что может быть объяснено уменьшением влияния сферических aberrаций.

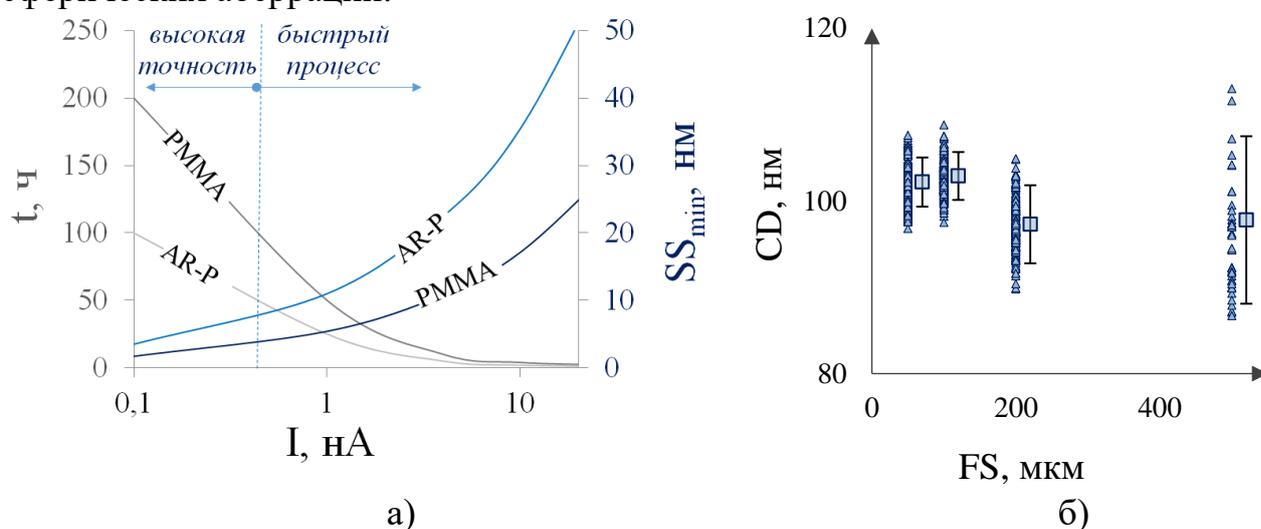


Рис. 6. Выбор режимов электронно-лучевой литографии:

а) теоретическое исследование влияния тока экспонирования на минимальный шаг и длительность процесса, б) экспериментальная зависимость ширины перехода от размера рабочего поля.

Обеспечение малого диапазона рассеяния линейного размера необходимо, но недостаточно для разработки воспроизводимого процесса, поскольку также должны быть обеспечены малые смещения ширины относительно номинального размера. Для этого было рассмотрено влияние шага и алгоритма экспонирования на линейные размеры структур шириной от 100 до 105 нм с изменением размера на 1 нм. Получено, что ширины 100, 103 и 105 нм могут быть реализованы шагом экспонирования 2 нм вдоль короткой стороны. Стандартное отклонение линейного размера по пластине площадью 5 см² составило менее 4 нм. Разработанные режимы были апробированы при изготовлении многокубитных сверхпроводниковых схем, наноплазмонных и биосенсорных устройств.

Чтобы оценить вклад линейных размеров в разброс электрического сопротивления ДП, был разработан и изготовлен тестовый кристалл площадью 5 см², содержащий ДП площадью 0,008, 0,02 и 0,12 мкм², по 500 структур каждого типа. В результате измерений линейных размеров было получено значение $3\sigma < 15$ нм во всем диапазоне размеров от 80 до 680 нм (Рис. 7, а). Измерения

сопротивления при комнатной температуре демонстрируют коэффициент вариации нормального сопротивления от 0,039 до 0,082, что соответствует лучшим мировым группам. Полученная зависимость электрического сопротивления от площади перехода хорошо аппроксимируется теоретической кривой по формуле Амбегаокара-Баратова и показывает, что для переходов малой площади такой диапазон рассеивания линейных размеров критичен.

В заключении главы проводятся измерения шумов в сверхпроводниковой схеме для комплексной характеристики разработанной технологии изготовления ДП (Рис. 7, б). Были изготовлены 6 экспериментальных образцов на кремниевых подложках с использованием МТП в 1 цикл, каждый из образцов содержал по 6 структур, изготовленных с использованием исходной и разработанной технологии. Измерения времени релаксации проводились в рефрижераторе растворения. При оценке учитывались значения тангенса угла диэлектрических потерь – комплексного параметра, независимого от резонансной частоты кубита.

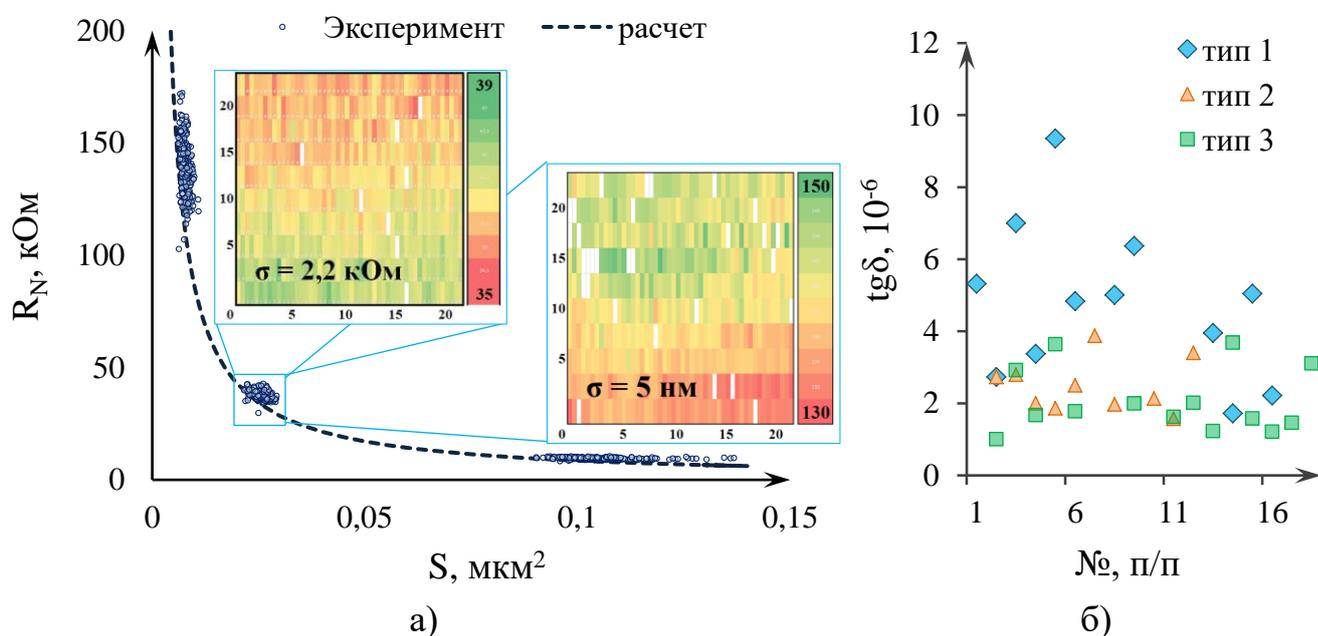


Рис. 7. Измерение джозефсоновских переходов в сверхпроводниковых схемах: а) зависимость электрического сопротивления от площади ДП, карты распределения линейных размеров и нормального сопротивления по пластине площадью 5 см², б) зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от типа структуры СКВИДа

Исходной структуре сверхпроводящего квантового устройства (СКВИД) соответствует тип 1. В качестве исследуемых факторов были выбраны ширина контактного электрода, соединяющего ДП и схему (тип 2) и направление потока осаждаемого металла относительно оси отверстия резистивной маски (тип 3). Было продемонстрировано, что предложенная схема осаждения и увеличение ширины дорожки до 1,2 мкм позволяют уменьшить тангенс угла диэлектрических потерь более чем в 3 раза, а значит, разработанные методы формирования ДП могут быть использованы при изготовлении многокубитных схем.

Таким образом, разработанные методы формирования ДП позволили существенно увеличить выход годных изделий сверхпроводниковых схем от 55 до

86% по критерию соответствия линейных размеров номинальному значению. Стандартное отклонение от номинальных ширины и длины ДП составило менее 10 нм (Рис. 8) для диапазона линейных размеров от 80 до 1200 нм. Количество образцов – более 300, количество измеренных структур ДП – более 2200 шт. Разработанные методы были использованы при изготовлении сверхпроводниковых схем различных типов.

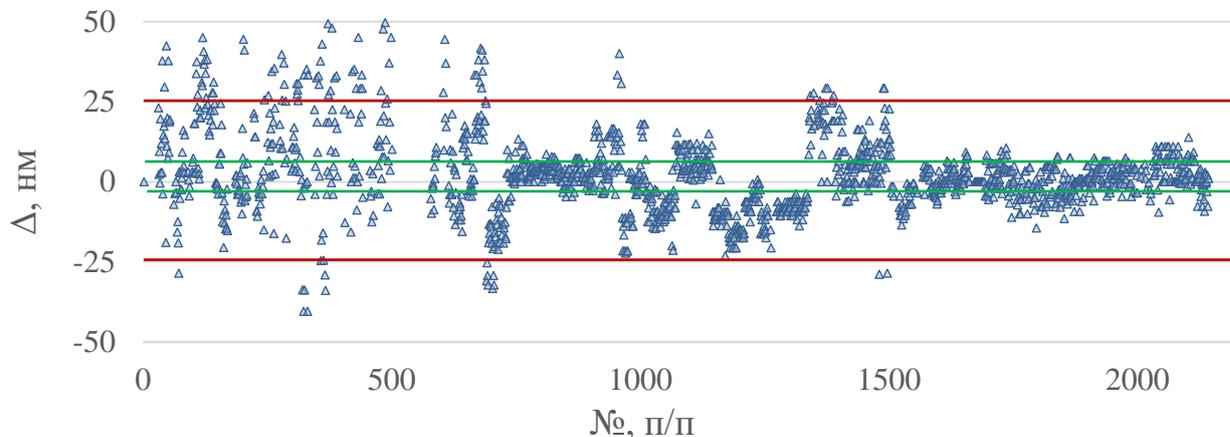


Рис. 8. Отклонение линейного размера джозефсоновского перехода от требуемого значения при изготовлении сверхпроводниковых схем

В четвертой главе представлен разработанный альтернативный маршрут технологического процесса изготовления ДП, необходимый для создания монокристаллического диэлектрика в туннельном слое ДП при высоких температурах нагрева подложки. По результатам проведенного сравнительного анализа материалов и оборудования выбраны материалы для неорганических масок (SiO_2 , Mo, Al и Nb), совместимые с изготовлением субмикрометровых Al-AlO_x-Al джозефсоновских переходов. Впервые был предложен и реализован технологический процесс изготовления двухслойной неорганической маски, совместимый с традиционными методами микроэлектроники и характерными размерами до 80 нм. Перечень базовых операций разработанного технологического процесса представлен на Рис. 9, операции предварительной и последующей обработки в химических реактивах пропущены.



Рис. 9. Схема технологических операций разработанного МТП:

- а) осаждение слоев, б) электронно-лучевая литография, в) реактивное ионное травление верхнего слоя, г) жидкостное травление нижнего слоя, д) теневое осаждение, е) удаление маски

Для отработки технологических операций был спроектирован тестовый кристалл, содержащий массив ДП с линейными размерами от 80 до 500 нм и контактные площадки. Контроль линейных размеров и морфологии пленки металла (вид сверху) и профиля (в скол) осуществлялся с использованием сканирующей электронной микроскопии, измерения шероховатости выполнены

на стилусном профилометре. Первый этап заключается в осаждении двух слоев неорганической маски требуемой толщины. Затем формируется скрытый рисунок в резистивном слое методом электронно-лучевой литографии и его удаление в органических растворителях. Важно отметить, что последующая операция травления осуществляется через сформированные отверстия в электронном резисте, поэтому важно обеспечить прямой профиль резиста на данном этапе. Для этого была проведена серия экспериментов по выбору времени проявления и дозы экспонирования. Операция реактивного ионного травления верхнего слоя обладает малой селективностью, что обуславливает высокое аспектное соотношение при травлении отверстий шириной менее 100 нм и затрудняет поступление травящего газа. Так, при большом аспектном соотношении в начале процесса травления происходит удаление только резистивного слоя. Напротив, с уменьшением толщины резистивного слоя увеличивается скорость травления верхнего слоя, но в случае слишком малой толщины наблюдается разрушение пленки. Экспериментально получен узкий рабочий диапазон толщин от 340 до 360 нм, который позволяет обеспечить равномерное травление со скоростью 100 нм/мин в широком диапазоне топологических размеров от 0,08 до 500 мкм. После удаления остаточной пленки резиста следует операция травления в парах плавиковой кислоты. Важно обеспечить контролируемое травление оксида кремния. Избыточное время может привести к разрушению структуры маски и прилипанию верхнего слоя маски к подложке, недостаточное – к нарушению сплошности формируемой на подложке металлической пленки. Были проведены серии экспериментальных исследований по определению зависимости скорости травления от температуры нагрева подложки и концентрации раствора плавиковой кислоты, структуры оксида кремния, наличия резистивного слоя, влияния обработки в изопропанол и деионизированной воде, а также уровня жидкости в установке. Были разработаны процессы со скоростью травления 5 нм/с для контролируемого травления нижнего слоя и более 500 нм/с для его удаления. При осаждении структур через сформированную неорганическую маску (Рис. 10, а-б) была использована SCULL технология (Патент РФ №20190618). В сочетании с разработанной операцией очистки была сформирована сплошная пленка высокого качества в области крупных контактных площадок (Рис. 10, в), однако в субмикрометровых ДП были обнаружены разрывы. Была проведена серия экспериментальных исследований по выбору температуры нагрева подложки до и после операции осаждения, а также изменению конструкции ДП, что позволило сформировать монокристаллическую пленку в области ДП (Рис. 10, г). Разработанная технология изготовления неорганической маски была использована для получения единичных ДП и сверхпроводниковых схем. Полученная суммарная шероховатость поверхности R_q двух слоев металла составляет 1,05 нм (Рис. 10, д), что меньше в 2 раза по сравнению с использованием стандартной резистивной маски.

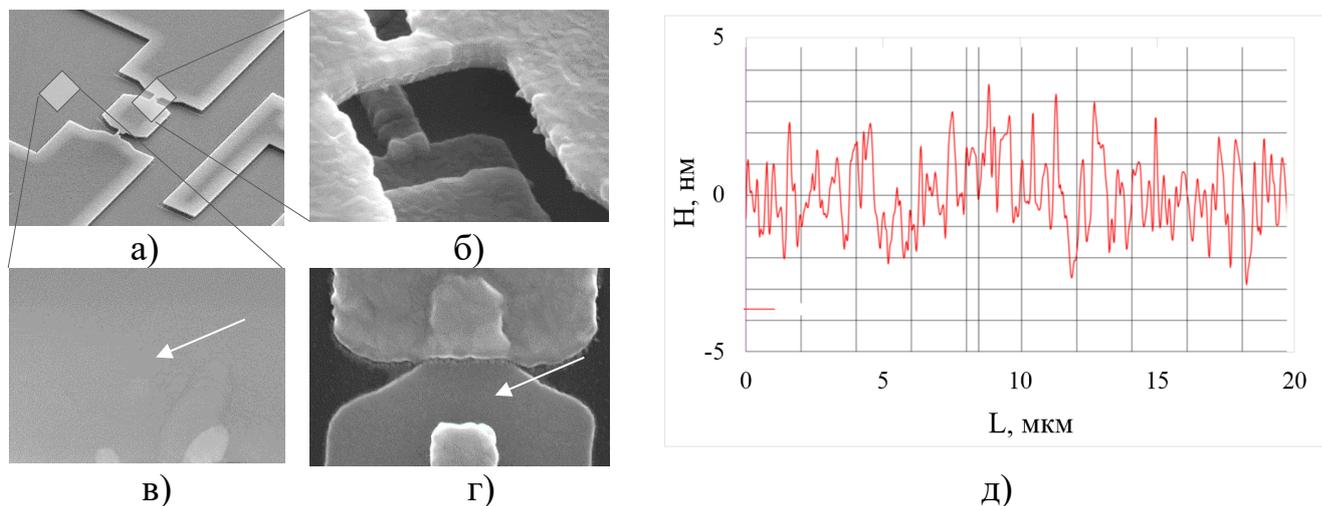


Рис. 10. Измерение структур, изготовленных с использованием неорганической маски: а) и б) СЭМ–изображения маски при увеличении 10^3 и 5×10^4 , в) и г) СЭМ–изображения области контактной площадки и ДП при увеличении 5×10^4 , д) измерение среднеквадратической шероховатости слоя Al-AlO_x-Al

Таким образом, впервые была разработана технология, которая позволяет формировать диэлектрические и металлические пленки в области джозефсоновских переходов с характерными размерами до 80 нм.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- В общих выводах сформулированы основные результаты, полученные в работе:
1. Проведен сравнительный анализ и выявлено влияние режимов электронно-лучевой литографии и теневого осаждения на воспроизводимость площади джозефсоновских переходов в сверхпроводниковых схемах.
 2. Разработана математическая модель процесса электронно-лучевой литографии в двухслойной резистивной маске, отличающаяся контролем поглощенной дозы на этапе проектирования, что позволило устранить дефекты типа короткое замыкание в джозефсоновских переходах.
 3. Экспериментально доказано, что формирование области переосаждения равной 100 нм позволяет уменьшить стандартное отклонение электрического сопротивления джозефсоновских переходов более чем в 2 раза во всем диапазоне площадей от 0,01 до 0,12 мкм².
 4. Экспериментально доказано, что угол осаждения не должен превышать 45° для обеспечения малой шероховатости края резистивной маски джозефсоновских переходов менее 4 нм.
 5. Сформулированы конструкционно-технологические ограничения процесса теневого осаждения через двухслойную резистивную маску для формирования джозефсоновских переходов площадью от 0,01 до 0,25 мкм²: толщина нижнего слоя резиста должна лежать в диапазоне от 350 до 500 нм, ширина моста Долана – от 150 до 400 нм, угол осаждения – от 15 до 45°.
 6. Разработаны режимы изготовления джозефсоновских переходов методом электронно-лучевой литографии с использованием двухслойной резистивной маски для базовых маршрутов технологического процесса изготовления

сверхпроводниковых схем со стандартным отклонением линейных размеров менее 4 нм.

7. Впервые разработан и изготовлен тестовый кристалл, содержащий 2500 джозефсоновских переходов площадью от 0,008 до 0,12 мкм² со стандартным отклонением линейного размера менее 5 нм и коэффициентом вариации сопротивления менее 0,08.

8. Экспериментально доказано, что осаждение потока металла вдоль оси отверстий резистивной маски и увеличение их ширины более 1 мкм позволяет уменьшить тангенс угла диэлектрических потерь более чем в 3 раза.

9. Разработан технологический процесс изготовления джозефсоновских переходов с использованием неорганических масок на кремниевых подложках: электронно-лучевая литография с критическим размером от 80 нм, травление верхнего слоя со скоростью травления 100 нм/мин, травление нижнего слоя на глубину 0,5 мкм и в ширину не более 1,5 мкм со скоростью травления от 5 до 500 нм/с.

10. С использованием неорганической маски были сформированы Al-AlO_x-Al джозефсоновские переходы со среднеквадратической шероховатостью пленки не более 1,1 с характерными размерами до 80 нм.

11. Разработанная в диссертации технология изготовления джозефсоновских переходов была апробирована при изготовлении зарядовых, фазовых и потоковых схем с тангенсом угла диэлектрических потерь не более 10⁻⁶.

По материалам и основному содержанию работы опубликованы следующие научные работы:

1. Planar architecture for studying a fluxonium qubit / Pishchimova A. A.[et al.] // JETP Letters. 2019. V. 110, №. 8. P. 574-579. (0,5 п.л./0,1 п.л.)

2. Cavity-QED simulation of a quantum metamaterial with tunable disorder / Pishchimova A. A.[et al.] // Physical Review A. 2022. V. 105, №. 3. P. 033519. (1,0 п.л./0,15 п.л.)

3. High fidelity two-qubit gates on fluxoniums using a tunable coupler / Pishchimova A. A.[et al.] // preprint arXiv:2203.16302. 2022. (1,1 п.л./0,2 п.л.)

4. Over-100μs tunable planar transmons: epitaxial Josephson Junctions and design optimization / Pishchimova A.A.[et al.] // Bulletin of the American Physical Society. 2020. V. 65. (0,1 п.л./0,07 п.л.)

5. Light dressing of a diatomic superconducting artificial molecule / Pishchimova A. A. [et al.] // Physical Review A. 2020. T. 102, №. 1. P. 013707. (1,5 п.л./0,15 п.л.)

6. Способ изготовления массивов регулярных субмикронных металлических структур на оптически прозрачных подложках: Патент 2706265 РФ / Родионов И.А.[и др.]; заявл.02.04.19; опубл.15.11.19.Бюлл.№3.

7. Interfering surface and localized plasmon: Tuning the Wood anomaly for biosensing / Pishchimova A. A.[et al.] // Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications. 2018. V. 32. P. 1-5. (0,4 п.л./0,08 п.л.)

8. Photoluminescence of two-dimensional plasmonic structures: enhancement, spectral and lifetime peculiarities below the lasing threshold / Pishchimova A. A.[et al.] // Optical Materials Express. 2020. V. 10, №. 10. P. 2643-2654. (0,7 п.л./ 0,1 п.л.)