

На правах рукописи



Родионов Илья Анатольевич

**ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
КВАНТОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 2.2.3. Технология и оборудование для производства
материалов и приборов электронной техники
Специальность 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и
наноэлектроники, квантовых устройств

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2026

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

Научный консультант: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, **Андряш Александр Викторович.**

Официальные оппоненты: **Колачевский Николай Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук», врио директора.

Никитов Сергей Аполлонович, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук», врио директора.

Торопов Алексей Акимович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «24» сентября 2026 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, улица 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1.

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

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте bmstu.ru. Телефон для справок +7 (499) 263-66-33 доб. 3625.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.331.16,
кандидат технических наук



Сырицкий А.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Современные системы обработки информации являются одним из ключевых научно-технических достижений XX века, сформировавших мировую экономику и общество в целом. Они построены на распределенной архитектуре, в которой обработка данных реализована на микроэлектронной элементной компонентной базе (ЭКБ), а их передача – на лазерных, СВЧ, радиотехнических и фотонных технологиях. Физические принципы работы полупроводниковых устройств обработки и хранения информации основаны на электростатическом управлении зарядами в твердом теле и транзисторной логике интегральных схем (ИС). Более 65 лет эти технологии динамично развиваются, а степень интеграции ИС выросла на порядки, превысив 1 триллион транзисторов в специальных процессорах для искусственного интеллекта. Физико-технологическими ограничениями роста их производительности и степени интеграции являются флуктуации концентрации и поверхностная диффузия легирующих примесей, изменение механизма транспорта зарядов, превышение максимально допустимых полей на единицу объема вещества, снижение динамики роста тактовой частоты, предельные условия теплоотвода и т.п. Решение этих фундаментальных проблем требует радикального роста сложности и стоимости технологий полупроводниковой ЭКБ: новых материалов (SiGe, Ge), 3D-конструкций элементов (например, кольцевые полевые транзисторы, gate-all-around field emission transistor), оборудования и технологий субнанометровой точности (литография в экстремальном УФ, атомно-слоевое травление, метрология атомного разрешения и т.п.).

И хотя бурное развитие полупроводниковых технологий в ближайшие двадцать лет, несомненно, продолжится (технологии суб-1нм ИС, специальные сопроцессоры и т.п.), всё большее внимание в мире уделяется исследованию новых подходов обработки информации на основе квантовых, нейроморфных, оптических, сверхпроводниковых, матричных и графовых ускорителей. Формируется гибридная парадигма обработки информации, при которой основная логика алгоритмов реализуется на полупроводниковой платформе, а наиболее длительные для классических архитектур вычислительные операции – на сопроцессорах или ускорителях на альтернативных физических принципах и архитектурах.

Появление фотонной вычислительной ЭКБ может решить проблему гетерогенной интеграции и создания единой среды распределенной обработки информации (сбор, обработки и передача). Фотоны являются практически идеальными носителями информации, обеспечивая ее сверхбыструю обработку и передачу с малыми перекрестными помехами. Оптические вычислители на основе фотонных интегральных схем (ФИС) могли бы также ускорить классические вычислители. Однако, критическими ограничениями их внедрения для реализации высокопроизводительных вычислителей являются низкая степень интеграции и малая нелинейность материалов ФИС. Одним из перспективных путей решения этих фундаментальных проблем является использование поверхностных волн – плазмонов, возникающих на границе металл-диэлектрик. В последние годы мировыми научными группами доказана возможность локализации света в объемах нанометрового масштаба с протеканием сверхбыстрых процессов (до сотен ТГц) в устройствах квантовой плазмоники. Однако высокие омические потери материалов и требования к нанометровой точности изготовления плазмонных устройств

препятствуют их бурному развитию. Создание технологий ФИС с нелинейными компонентами для гибридной обработки информации имеет фундаментальное значение и колоссальный потенциал внедрения в реальном секторе экономики.

С другой стороны, некоторые критические ограничения вычислительных систем могут быть преодолены при внедрении устройств квантовой обработки информации (квантовых сопроцессоров), идея и принципы работы которых предложены в СССР в 1980 году Ю.И. Маниным. Единицей информации и базовым блоком этих устройств является квантовый бит (кубит) – квантовый аналог КМОП транзисторной ячейки. За прошедшие 40 лет группами Д. Мартиниса, М. Деворе, Я. Накамуры, Р. Шелкопфа, Х. Муй, Д. Кларка, Л. Ди Карло, А. Китаева, Д. О’Браена, М. Липсон, Т. Киппенберга, А. Холево, К. Монро, Х. Цирака, П. Цоллера, М. Симмонс и др. сформированы научные основы создания квантовых вычислителей на сверхпроводниковой, полупроводниковой, ионной и фотонной платформах. При этом принципы и эффективность устройств хранения квантовой информации (памяти) остаются недостаточно изученностью областью физики и инженерии. Высокоточные квантовые сопроцессоры продемонстрированы на базе сверхпроводниковых (до 156 кубитов), фотонных (до 20 кубитов) и кремниевых (до 12 кубитов) интегральных схем, а также ионов в планарных интегральных ловушках (до 98 кубитов). В 2019 году группой Д. Мартиниса впервые для тестовой задачи на суперкомпьютере «Summit» показано преимущество гибридных вычислений с квантовыми сопроцессорами на базе сверхпроводниковых джозефсоновских интегральных схем (СДС) над классическими расчетами.

Несмотря на то, что физическая платформа универсальных квантовых компьютеров в мире не определена, наибольшее распространение получили сверхпроводниковые квантовые сопроцессоры и симуляторы благодаря их точности и масштабируемости. Их практическое внедрение ограничено рядом научно-технологических проблем: низкие времена когерентности кубитов и точности квантовых логических операций, недостатки архитектуры (низкая связанность и точность считывания кубитов), недостаточный уровень развития методов коррекции и смягчения ошибок, а также квантовых алгоритмов. Одной из ключевых проблем являются потери и перекрестные помехи в многокубитных схемах. Внутренние источники потерь связаны с конструкцией, материалами и технологиями изготовления кубитов, определяющими количество и степень взаимодействия кубитов с двухуровневыми дефектами (two-level system, TLS); а внешние – с архитектурой и конструкцией кубитов, алгоритмами их калибровки, внешним паразитным излучением, масштабируемостью криогенной и управляющей систем. Несмотря на масштабные исследования в мире, механизмы и источники потерь остаются недостаточно изученной областью физики и технологий. Многофакторность этой проблемы, наличие разнородных механизмов потерь, их совместное, зачастую взаимосвязанное воздействие, отсутствие методов их системного анализа сдерживает развитие сверхпроводниковых устройств квантовой обработки информации.

При этом можно уверенно констатировать, что создание систем оптической и квантовой обработки информации нового поколения является одним из необходимых условий устойчивого развития Российской Федерации. Это делает актуальной решаемую в работе **научно-технологическую проблему** создания фундаментальных основ, материалов, методов проектирования, технологий сверхпроводниковых джозефсоновских интегральных схем, квантовой элементной компонентной базы и

конструктивно-технологической платформы для отечественных гибридных систем квантово-классической обработки информации.

Целью работы является разработка физико-технологических основ создания материалов, технологий квантовой ЭКБ и конструктивно-технологической платформы интегральных устройств гибридной квантово-классической обработки информации на сверхпроводниковой и фотонной платформах.

Для достижения поставленной цели решены следующие **основные задачи**:

1. Разработка архитектуры и конструктивно-технологической платформы гибридной системы квантово-классической облачной обработки информации с гетерогенной интеграцией сверхпроводниковых квантовых сопроцессоров.
2. Исследование физических основ и методов формирования эпитаксиальных металлов и ультратонких оксидов с предельно малыми потерями, их экспериментальное внедрение при создании сверхпроводниковых и оптических интегральных устройств квантовой обработки информации.
3. Исследование материалов и технологических методов воспроизводимого изготовления высококогерентных СДС и квантовой ЭКБ на их основе.
4. Исследование и разработка физико-технологических основ создания интегральной квантовой памяти на основе высокодобротных сверхпроводящих микроволновых копланарных резонаторов.
5. Разработка конструктивно-технологических основ создания широкополосных криогенных параметрических усилителей (ШПУ) с собственными шумами на уровне стандартного квантового предела (СКП).
6. Разработка базовых ячеек многокубитных сверхпроводниковых сопроцессоров с точностью квантовых логических операций выше 99%.
7. Создание технологий российских многокубитных сверхпроводниковых квантовых сопроцессоров и симуляторов для экспериментальной реализации серии квантовых алгоритмов.

Объекты и предмет исследований. Объектами исследований являются интегральные устройства квантовой обработки информации: оптические (источники когерентного излучения и одиночных фотонов) и сверхпроводниковые (копланарные микроволновые резонаторы, кубиты, широкополосные криогенные параметрические усилители, квантовая память, квантовые сопроцессоры и симуляторы). Предметом исследований являются физико-технологические основы создания материалов и конструктивно-технологические методы управления воспроизводимостью ключевых характеристик интегральных устройств квантовой обработки информации.

Научная новизна работы

1. Впервые предложен и описан механизм эпитаксиального роста тонких пленок металлов в условиях высокого вакуума, отличающийся двухстадийным подходом, при котором первая стадия проводится в условиях квантования толщины островков металла и нарастания стресса их кристаллической решетки, а на второй стадии реализуется рост сплошной пленки металла в условиях самокристаллизации при пониженных барьерных энергиях на границах «металл-подложка» и длине диффузионного пробега адатомов за счет контролируемой релаксации стресса кристаллической решетки островков.
2. Впервые экспериментально реализован комплекс методов осаждения сплошных тонких пленок металлов с управлением кинетикой их роста на основе квантово-размерного эффекта, позволяющий осуществить термодинамическое управление

осаждением атомарно гладких эпитаксиальных пленок металлов на согласованные подложки с плазмонными, оптическими и электрофизическими свойствами близкими к теоретическому пределу для объемных материалов.

3. Разработан оригинальный метод управления качеством интегральных устройств квантовой плазмоники, в основе которого лежит совместное использование процесса осаждения эпитаксиальных пленок серебра по пункту 2, формирование наноструктур трехуровневым профилированием дозы экспонирования при электронно-лучевой литографии и двухэтапное плазмохимическое травление, позволяющий до двух порядков повысить ключевые параметры ряда оптических устройств квантовой обработки информации.

4. Открыт механизм селективного окисления тонких пленок металлов внутри многослойных наносистем, отличающийся методом управления транспортом атомов кислорода на границе оксид-металл посредством генерации кристаллических дефектов сфокусированным пучком ионов неона диаметром от 0,3 до 30 нм с дозой облучения в диапазоне от 1×10^{11} до 5×10^{14} ион/см² без повреждения выше лежащих тонких пленок, позволяющий для джозефсоновских туннельных переходов (ДТП) Al/AlO_x/Al управлять толщиной их оксида с точностью $\pm 0,2$ Å.

5. Разработаны конструктивно-технологические методы создания микроволновых копланарных резонаторов, отличающиеся способами осаждения эпитаксиальных и структурированных металлических пленок базового слоя, изотропного травления подложки кремния в зазорах резонаторов с их последующей ультразвуковой микроподрезкой и создания сверхпроводящих микроструктур выравнивания потенциала земли (СП перемычек), позволяющие повысить внутреннюю добротность резонаторов до 10 млн. в однофотонном режиме.

6. Впервые предложены оригинальные конструктивно-технологические методы создания многокубитных СДС, включая оптимизацию конструкции кубитов, изготовление базового слоя СДС по п. 2 и п. 5, методы минимизации шероховатости поверхности и края нижних электродов джозефсоновских переходов и динамического окисления при высоком давлении кислорода, метод подстройки частоты кубитов после их изготовления по п. 4, позволяющие повысить времена релаксации и когерентности кубитов, точность задания их частоты и точность квантовых логических операций.

7. Создан ряд российских широкополосных криогенных параметрических усилителей гигагерцового диапазона с коэффициентом усиления не менее 15 дБ неравномерностью АЧХ не более ± 3 дБ при средней мощности насыщения более -107 дБм в полосе пропускания 600 МГц и шумовой температуре на уровне СКП.

8. Разработаны технологии кристаллов первых российских квантовых сопроцессоров с точностью двухкубитных операций выше 99% и симуляторов (до 25 кубитов), внедрением которых подтверждена перспектива развития отечественных систем гибридной квантово-классической обработки информации на сверхпроводниковой платформе.

Новизна и приоритет предложенных в диссертации методик, технических решений и алгоритмов подтверждены патентами, ноу-хау и публикациями в изданиях, индексируемых международными базами данных WoS и Scopus.

Теоретическая и практическая значимость работы

Проведенный в работе анализ направлений научно-технического развития, материалов, интегральных устройств и технологических платформ формирует облик научной инфраструктуры для реализации в РФ устройств гибридной обработки

информации следующего поколения. На ее основе реализованы два крупных инфраструктурных проекта – два научно-производственных кластера замкнутого цикла МГТУ им. Н.Э. Баумана и ФГУП «ВНИИА». Созданные инфраструктура, оборудование и разработанные технологии сформировали научно-технологический задел развития сверхпроводниковых и оптических интегральных устройств обработки информации.

Предложенные в работе теоретические подходы и механизмы осаждения тонких пленок формируют основу нового направления современного материаловедения – термодинамического управления кинетикой роста на микроскопическом уровне. Впервые предложено описание механизма макроскопического управления кинетикой, транспортом адатомов на масштабах порядка 10-200 нм и кристаллизацией в процессе роста тонких пленок, а также разработана технология многостадийного осаждения эпитаксиальных тонких пленок плазменных металлов. Для них экспериментально подтверждены предельные (теоретически предсказанные в литературе) оптические и плазменные поверхностные свойства, созданы плазменный узкополосный нанолазер (совместно с ИСАН РАН), а также сверхъяркие источники одиночных фотонов (совместно с Purdue University). Эти методы, материалы и научные результаты вносят значительный вклад в развитие направления квантовой плазмоники, а достигнутые параметры материалов и устройств превосходят опубликованные в мире результаты.

Создана технологии СДС и квантовая ЭКБ мирового уровня: кубиты-трансмоны с максимальным временем когерентности до 550 пкс и копланарные резонаторы с внутренней добротностью до 10 млн. в однофотонном режиме. Разработаны две линейки широкополосных криогенных параметрических усилителей для считывания сверхслабых (-130...-190 дБм) сигналов широкого класса сверхпроводниковых устройств при температурах ниже 20 мК: на основе трансформаторов импеданса и бегущей волны. Более чем в 10 раз повышена эффективность сверхпроводниковой интегральной квантовой памяти. Впервые реализована сверхпроводниковая интегральная квантовая память с доступом по запросу и эффективностью $57,5 \pm 0,4\%$. Разработаны технологии создания семейства кристаллов сверхпроводниковых квантовых сопроцессоров с точностью однокубитных операций выше 99,9% и двухкубитных – до 99,4%, а также квантовых симуляторов до 25 кубитов. Изготовлены чипы первых российских квантовых сопроцессоров, с применением которых продемонстрированы решения алгоритма Гровера, систем линейных уравнений (Хассидим-Харроу-Ллойда (HHL)), уравнения теплопроводности вариационным алгоритмом и симуляция спиновой модели Изинга. Впервые в открытый облачный доступ запущены российские высокоточные (до 99,94%) сверхпроводниковые 4- и 8-кубитные квантовые сопроцессоры, на которых учеными четырех стран запущено более 50000 алгоритмов. Разработанные квантовая платформа и оборудование с параметрами мирового уровня сформировали конструктивно-технологический базис для развития устройств квантовой обработки информации в РФ.

Внедрение результатов работы. Результаты внедрены в МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» ГК «Росатом», г. Москва в НИОКР и проектах (шифры «Тайга», «Лиман», «Прибой», «Криостат», «Наноплазмоника», «Модулятор», «Гибрид24», «Усилитель24», «Детектор» и др.) и в учебный процесс подготовки дипломированных специалистов и аспирантов МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты вносят существенный вклад в повышение научно-технологического

суверенитета РФ, развитие национальных проектов в области квантовых технологий и фотоники. Внедрение подтверждается актами, приложенными к диссертации.

Методология и методы исследования

Для теоретических исследований использованы САПР расчета электрических цепей и микроволновых ИС в статическом и динамическом режиме. Для расчетов сосредоточенных элементов СДС разработаны маршрут и средства проектирования. Для экспериментальных исследований использованы прецизионные методы электронной, просвечивающей, оптической и атомно-силовой микроскопии, рефлектометрии, спектроскопической эллисометрии, дифракции отраженных электронов, стилусной профилометрии, электрических зондовых измерений и рентгеноструктурного анализа, в том числе подтверждающие высокоточные исследования проведены в Birck Nanotechnology Center (США), Asylum Research (Германия) и Bruker Corporation (Германия). Сверхпроводниковая ЭКБ и устройства исследованы посредством электрофизических измерений на постоянном токе и в импульсном режиме при температурах ниже 20 мК.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Наиболее эффективными материалами для перспективных устройств квантовой плазмоники являются сплошные эпитаксиальные тонкие пленки серебра, полученные методом осаждения с термодинамическим управлением кинетикой роста и формированием на первой стадии атомарно гладких (RMS до 60 пм) островков, а на второй – эпитаксиальным ростом сплошной тонкой пленки металла в условиях преимущественного транспорта адатомов с островков на подложку. Разработанный комплекс вакуумного оборудования, эпитаксиальных материалов и нанотехнологических процессов позволяют до 10 раз повысить параметры перспективных плазмонных устройств для систем оптических квантовых вычислений и одномолекулярной сенсорики, в том числе в 1685 раз повысить локальную эмиссию однофотонного излучения одиночных дефектов в гексагональном нитриде бора.
2. Изготовление сверхпроводниковых многокубитных квантовых сопроцессоров с точностью подстройки частоты кубитов ± 17 МГц без снижения когерентности, управлением нормальным сопротивлением ДП в диапазоне 2-37% от номинального значения без их структурных повреждений, а также улучшением коэффициента вариации нормального сопротивления до $\pm 0,86\%$ по кристаллу площадью до 25×25 мкм² возможно обеспечить введением предложенной в работе локальной (диаметр воздействия 5-10 нм) постобработки ДП фокусированным пучком ионов неона.
3. Реализация кубитов-трансмонов с временами релаксации (T_1) и когерентности (T_2) более 300 мкс, ошибкой задания частоты кубитов не хуже $\pm 0,4\%$, двухкубитных блоков с точностью однокубитных операций до 99,9% и двухкубитных до 99,4%, а также ячеек многокубитных сверхпроводниковых сопроцессоров с точностью квантовых логических операций выше 99% возможна посредством внедрения предложенных конструктивно-технологических методов комплексного снижения потерь, а также подстройки частоты кубитов фокусированным пучком ионов по п. 2.
4. Внедрение разработанного комплекса методов повышения внутренней добротности копланарных резонаторов и разработка новых архитектур обеспечивает создание сверхпроводниковой интегральной квантовой памяти с постоянным временем хранения и эффективностью $58 \pm 6\%$ в однофотонном и $75 \pm 8\%$ в многофотонном режимах, а также

интегральной квантовой памяти с доступом по запросу, эффективностью $57,5 \pm 0,4\%$ в однофотонном режиме и рабочей частотой выше 660 кГц.

5. Реализация широкополосных криогенных параметрических усилителей бегущей волны и усилителей с многосекционными трансформаторами импеданса с шумовой температурой порядка СКП (0,19 – 0,43 К), позволяющих реализовать системы высокоточного считывания (до $97,75 \pm 0,45\%$) квантовых сопроцессоров и квантовой памяти, возможна внедрением разработанных конструктивно-технологических методов проектирования топологий и изготовления джозефсоновских интегральных схем с плоскопараллельными конденсаторами с предельно малыми потерями $\text{tg}(\alpha)_{\text{SP}} = 8,6 \times 10^{-5}$ в однофотонном режиме при температуре ниже 20 мК.

6. Совокупность разработанных подходов, материалов, средств производства и конструктивно-технологических методов позволяет реализовать системы гибридной квантово-классической обработки информации с гетерогенной интеграцией сверхпроводниковых квантовых вычислителей с параметрами мирового уровня.

Достоверность результатов подтверждена на основе сравнительного анализа с результатами теоретических расчетов и экспериментальными данными, а также сопоставление полученных результатов с литературными данными. Исследования проведены в кооперации с ведущими научно-исследовательскими группами, а результаты работы прошли экспериментальную апробацию во ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», МИСИС, ИСАН РАН, ЦКТ МГУ, ИТПЭ РАН, ИФТТ РАН, МФТИ, Purdue University, University of Southern Denmark, University of Illinois at Urbana-Champaign, CAPP IBS различных стран (РФ, США, Дания, Корея).

Апробация результатов работы: Основные положения и результаты работы представлены в 44 докладах на конференциях, форумах и симпозиумах, в том числе международных конференциях: Progress In Electromagnetic Research Symposium в 2016 и 2017 годах, Days of Diffraction в 2017 году, SPIE Optics and Photonics в 2017 году, Applied Nanotechnology and Nano-science International Conference в 2017 году, SPIE Photonics Europe в 2018 году, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) в 2018, 2019 и 2020 годах, International Conference on Metamaterials and Nanophotonics в 2018 и 2020 годах, Laser Optics ICLO в 2018 году, Micro Nano Engineering в 2018 году, Nanophotonics and Micro/Nano Optics International Conference в 2018 году, CLEO Europe в 2019, 2022 и 2023 годах, International Conference on Quantum Technologies в 2019 и 2023 годах, Single-Molecule Sensors and NanoSystems International Conference в 2019 году и APS March Meetings в 2019, 2020 и 2024 годах; международных форумах «Техноюнити-ЭЛТМ» в 2017 году и «Микроэлектроника» в 2020, 2022, 2023, 2024 и 2025 годах, а также международном симпозиуме «Нанозлектроника и наноэлектроника» в 2020, 2022, 2023, 2024 и 2025 годах.

Личный вклад автора состоит в разработке единой концепции развития технологий интегральных устройств для гибридной обработки информации с квантовыми сопроцессорами; разработке концепций, технологий, оборудования, конструктивно-технологических решений и создании двух нанотехнологических кластеров НОЦ «ФМНС» и Квантум Парк; проектировании оригинального вакуумного оборудования (электронно-лучевого испарения тонких пленок для устройств квантовой плазмоники и кластера для осаждения тонких пленок СДС); автор является главным конструктором российских криогенных комплексов получения сверхнизких температур замкнутого цикла (ОКР «Криостат») двух типов: для устройств квантовой обработки

информации на фотонной (0,4-1,4 К) и сверхпроводниковой (суб-20 мК) платформах; автором предложена идея, описан механизм роста и разработана технология формирования эпитаксиальных металлов с предельно малыми потерями; автором предложена идея, описан механизм и разработана технология селективного окисления тонких пленок металлов внутри многослойных наносистем; сформулированы идеи экспериментов, разработаны технологии сверхпроводниковой и фотонной платформ создания устройств квантовой обработки информации, анализе и обобщении полученных результатов. Автор принимал личное участие в разработке экспериментальных установок и методик измерений квантовой ЭКБ и квантовых сопроцессоров на сверхпроводниковой платформе. Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии.

Публикации результатов работы. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 151 научном труде, из которых 65 статей в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, и 32 статьи в ведущих российских рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. По результатам диссертации получены 11 патентов РФ и 5 ноу-хау, поданы 3 заявки на патенты США и 2 заявки на патенты КНР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения и списка использованных источников. Объем диссертации составляет 399 страницы, в том числе 365 страниц основного текста. Список использованных источников содержит 425 наименования и приведен на 34 страницах.

Краткое содержание работы

Во введении обоснованы актуальность решаемой научной проблемы, тема и цель работы, перечислены основные решенные задачи, объекты и предмет исследований, обоснована научная новизна, обсуждаются теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследований, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, подтверждена достоверность и апробация результатов работы.

В Главе 1 обосновывается парадигма высокопроизводительной гибридной обработки информации с гетерогенной интеграцией пост-КМОП сопроцессоров. На основании сопоставительного анализа направлений развития КМОП ЭКБ в долгосрочной перспективе выдвигается гипотеза о высокой вероятности фундаментальных изменений фон Неймановской архитектуры и использования булевой логики в системах обработки информации пост-эксафлопсного класса (Рис. 1).

По критериям производительности, энергоэффективности, масштабируемости и технологичности обосновываются преимущества оптических и квантовых технологий для создания перспективных вычислительных комплексов моделирования сложных физических систем, новых материалов и молекул; систем глобальной криптографической защиты, искусственного интеллекта и автономного транспорта; фундаментальных исследований генома человека, климатических моделей Земли и дальнего космоса. Подчеркивается особое место квантовых вычислений, развивающихся параллельно на ряде физических платформ. За прошедшие 25 лет ведущие из них преодолели путь от теории построения кубитов до макетов пост-КМОП узлов (до 100-1000X кубитов) гибридных квантово-классических вычислителей. По особенностям архитектуры, классам квантовых алгоритмов и областям применения они делятся на цифровые квантовые сопроцессоры, аналоговые и цифровые квантовые симуляторы.

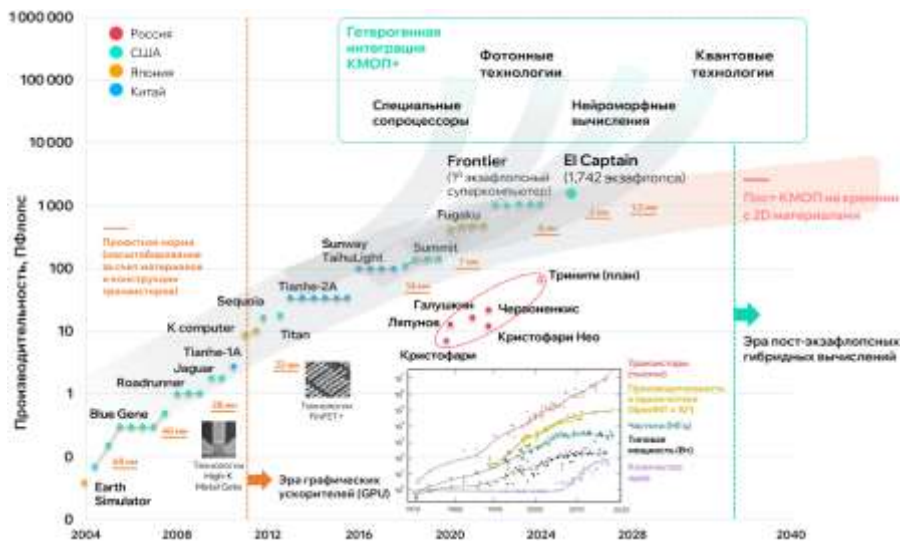


Рис. 1. Перспективы развития систем гибридной обработки информации пост-эксафлопсного класса с гетерогенной интеграцией пост-КМОП ЭКБ

Несмотря на активное развитие физических платформ квантовых вычислений, проблема создания физико-технологических основ и технологий практически полезных квантовых вычислений в мире не решена. По оценкам ряда мировых экспертов расчеты с практическим полезным квантовым превосходством могут быть реализованы на распределенных квантовых вычислителях с 10 000 – 1 000 000 физических кубитов, построенных на 100 – 1000 кубитных локальных цифровых квантовых сопроцессорах (ячейках), объединенных квантовыми шинами данных. Эти ячейки для реализации кодов квантовой коррекции ошибок должны обеспечивать высокие точности считывания, инициализации и сброса состояний кубитов (99,5-99,9%), а также выполнения однокубитных (99,98-99,998%) и двухкубитных (99,9-99,97%) квантовых операций. При этом необходимо обеспечить максимально возможную связанность кубитов (до все-со-всеми) в ячейке и скорость выполнения квантовых логических операций. В мире к этим параметрам начинают приближаться цифровые квантовые сопроцессоры на ионной и сверхпроводниковой платформах, разработанные в США и Китае (Рис. 2).

Однако, прямое сравнение их производительности затруднено ввиду отсутствия общепринятых мировым сообществом набора критериев и алгоритмических тестов. Принимая во внимание критерии Ди Винченцо, тенденции развития квантовой ЭКБ, архитектур и алгоритмов, для оценки качества цифровых квантовых сопроцессоров в работе предложен набор из 18 параметров трех групп: масштабируемость квантовых сопроцессоров, качество и скорость вычислений. По результатам сравнения 46 ведущих квантовых сопроцессоров выделены ионная и сверхпроводниковая платформы, отмечается уникальность последней по критериям масштабируемости, качества и скорости 100 кубитных сопроцессоров, и массовости их апробации (3,6 трлн. запусков).

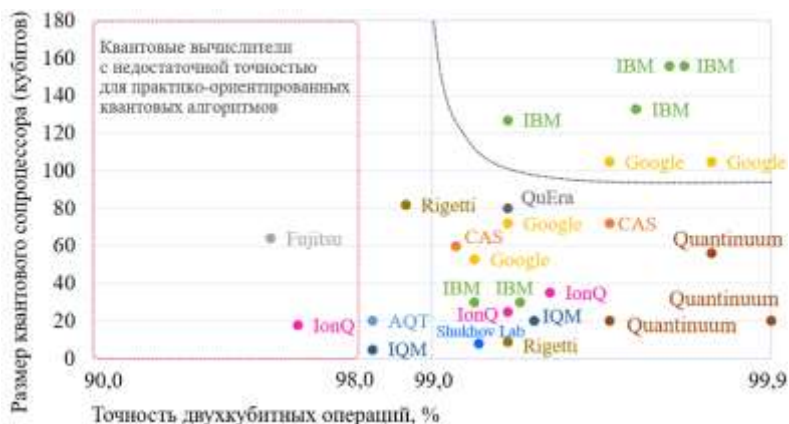


Рис. 2. Сравнительный анализ наиболее продвинутых цифровых квантовых сопроцессоров: количество физических кубитов и точности двухкубитных операций

Кроме того, выделяется фотонная платформа как по вычислительному потенциалу, так и возможностям интеграции с другими платформами для создания распределенных квантовых вычислителей. Особо отмечается кремниевая квантовая платформа по ее потенциалу масштабирования на базе КМОП технологий.

Обоснованы структурные схемы вычислительных узлов (Рис. 3) со сверхпроводниковыми квантовыми сопроцессорами для гибридных систем квантово-классической обработки информации, систематизированы ключевые проблемы их практической реализации. Разработана аппаратно-программная платформа гибридной системы обработки информации со сверхпроводниковыми локальными квантовыми сопроцессорами, определены приоритеты развития их компонент: 1) высокие точности для базовых ячеек с 20-100 кубитами; 2) масштабирование до 100-1000 кубитов с сохранением точностей; 3) скорость квантовых вычислений; 4) связанность кубитов. При современных аппаратных возможностях таких локальных вычислителей особую роль занимают квантовые алгоритмы и методы, позволяющие преодолеть их ограничения: масштабируемость (до 200 кубитов), низкую связанность кубитов (от 1:1 до 10:1) и точность двухкубитных операций (99,5%). Речь идет о подходах с разбиениями или аналогами свертки длинных алгоритмов, к которым относятся вариационные (эвристические) алгоритмы и методы сшивания результатов квантовой обработки информации.

Таким образом, обоснована парадигма гибридной обработки информации с гетерогенной интеграцией пост-КМОП сопроцессоров и особое место квантовой сверхпроводниковой платформы. В заключении сформулирована постановка цели и основных задач, решаемых в диссертации.

В Главе 2 показано, что потенциал развития и параметры квантовой ЭКБ определяются возможностью применения эпитаксиальных тонких пленок металлов и ультратонких оксидов внутри многослойных наноструктур с предельно малыми электрическими, оптическими и плазмонными потерями. Исследованы физические основы и механизмы их роста. На основе предложенных в работе механизмов роста разработаны

масштабируемые методы формирования пленок эпитаксиальных (эпи-) металлов и оксидов туннельных барьеров, которые внедряются при создании оптических устройств квантовой обработки информации и СДС с размерами нанометрового диапазона и параметрами мирового уровня.



Рис. 3. Аппаратно-программная платформа квантово-классической обработки информации с гетерогенной интеграцией пост-КМОП сопроцессоров

В работе впервые предложен двухстадийный механизм эпитаксиального роста тонких пленок металлов: на первой стадии (до 100 монослоев) при повышенной температуре (Рис. 4,а,в) формируется согласованный с подложкой затравочный слой из напряженных атомарно гладких двумерных (АГ 2D) островков одинаковой толщины за счет квантования ее значений осцилляциями энергии электронного газа подложки равномерно по всей ее площади; рост затравочного слоя останавливается перед 2-й стадией (Рис. 4,б) в точке его оптимального стресса (высоты потенциального барьера на границе островков-подложка) и изменяются условия кинетики роста для обеспечения нисходящего транспорта адатомов с АГ 2D островков на подложку, что обеспечивает двумерный рост затравочного слоя до формирования сплошной пленки металла (Рис. 4,г).

На основе предложенного механизма разработан метод осаждения широкого спектра атомарно гладких пленок эпи-металлов электронно-лучевым испарением толщиной ниже порога перколяции (от 10-40 нм), которые формируют материальную платформу НКБ квантовой плазмоники и высококогерентных СДС (Ag, Au и Al). Подтверждена экспериментально возможность макроскопического управления процессом осаждения на стандартных высоковакуумных установках (высокая производительность и низкая стоимость) посредством контроля стресса, поверхностной диффузии и потока адатомов.

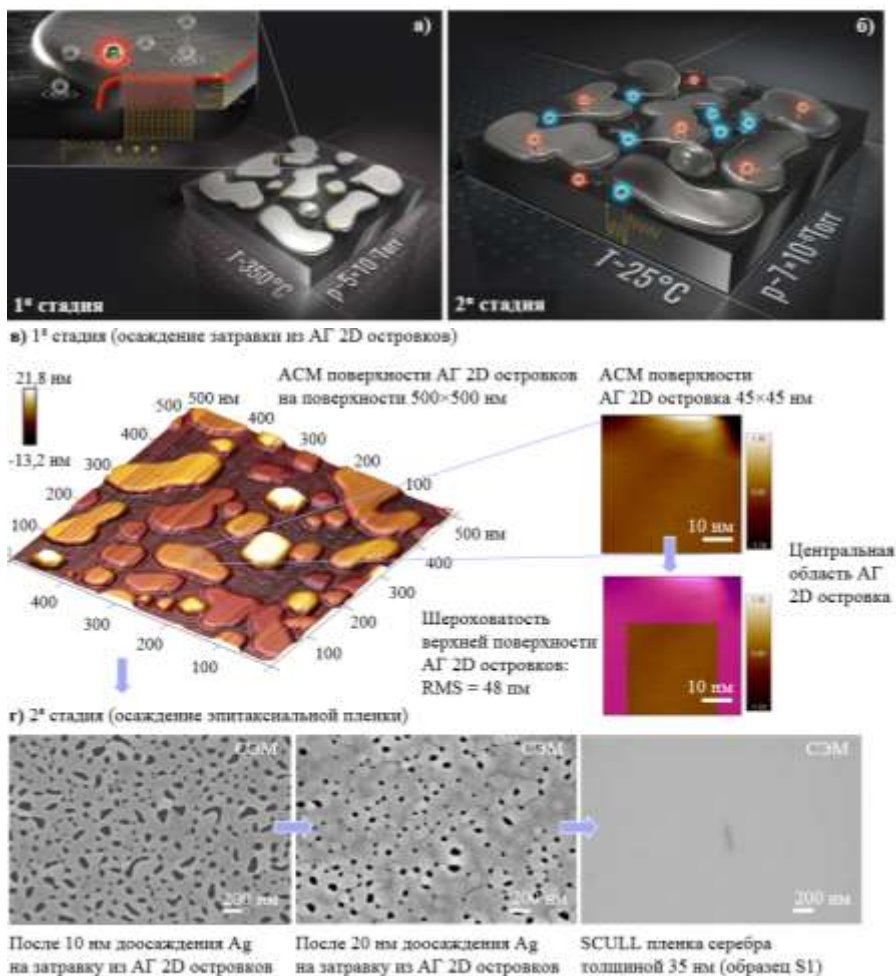


Рис. 4. Двухстадийный механизм эпитаксиального роста и метод осаждения атомарно гладких тонких пленок металлов

Для тонких пленок серебра и золота, наиболее эффективных материалов для устройств квантовой плазмоники, экспериментально подтверждены предельно низкие оптические потери ($\epsilon_2 < 0,1$ для $\lambda = 370-600$ нм) и теоретически предсказанные длины распространения поверхностных плазмонных волн (до 200 и 50 мкм для пленок Ag и Au, для $\lambda = 780$ нм). Результаты внедрены при создании нанолакизованных источников когерентного излучения, датчиков флуоресцентных молекул, а также

источников одиночных фотонов на основе NV-центров в наноалмазах, параметры которых в 10-100 раз превысили ранее опубликованные значения.

В работе впервые предложен и описан механизм роста ультратонких оксидов при релаксации кристаллических дефектов на границе оксид-металл, на основе которого разработан метод селективного окисления тонких пленок металлов фокусированным ионным пучком внутри многослойных наноструктур. Результатами молекулярно-динамического моделирования ДП ($\text{Al/a-AlO}_x/\text{Al}$) и проведенных экспериментов показано, что в основе механизма роста ультратонких оксидов лежит диффузия радиационно-индуцированных кристаллических дефектов на границу оксид-металл. При воздействии ионами вдоль их траектории формируются каскады столкновений (Рис. 5,а), что приводит к аморфизации материала с последующей его быстрой (десять пикосекунд) рекристаллизацией. В результате происходит образование дефектов, которые диффундируют по направлению к интерфейсам с вероятностью обратно пропорциональной квадрату расстояния до них (Рис. 5,б), где они релаксируют, приводя к реструктуризации материалов вдоль интерфейсов. При попадании каскада смещений в оксидный слой происходит вынос кислорода, приграничный с ним слой алюминия плавится, образуя аморфную область, куда диффундирует кислород из a-AlO_x . Но в течение ~ 10 пс происходит отжиг, в результате которого алюминий в приграничном слое рекристаллизуется. В основном изменения происходят на расстоянии до 2-4 периодов решетки (8-15 Å). В результате происходит локальная перестройка интерфейса с релаксацией дефектов и селективным окислением металла. Принимая во внимание ключевые физические явления, лежащие в основе предложенного и описанного механизма активации кристаллических дефектов, он назван «iDEA» (ion-beam-induced DEfect Activation), а разработанный метод – iDEA отжига.

Экспериментальная апробация iDEA отжига проведена (Рис. 5,в,г) для различных ионов (He^+ , Ne^+) и доз облучения (от 0,15 до $1,30 \cdot 10^{13}$ ионы/ см^2) на 12 536 туннельных ДП ($\text{Al/a-AlO}_x/\text{Al}$) площадью от 0,04 мкм^2 до 0,13 мкм^2 . Доказана возможность селективного формирования туннельного оксида ДП через верхние слои Al толщиной 35-60 нм (Рис. 5,д) для управления их комнатным сопротивлением в диапазоне 2-37% от номинального значения (Рис. 5,г). Обработку при этом проводят локально фокусированным ионным пучком диаметром 3-30 нм с шагом сканирования 0,5-20 нм по требуемой топологии. Глубину проникновения ионов контролируют энергией пучка (Рис. 5,д,е), что позволяет осуществлять выбор обрабатываемого скрытого оксидного слоя по глубине залегания от поверхности многослойного стека. iDEA метод позволяет проводить обработку одиночных ДП, выделенных ДП в СКВИДах и цепочках ДП, что особенно важно для различных типов сверхпроводниковых устройств и невозможно ни одним из опубликованных в мире методов.

В завершении методом просвечивающей электронной микроскопии подтверждено, что облучение в заданном диапазоне доз обработки ионами не приводит к изменению структуры туннельных барьеров ДП. Полученные результаты позволяют перейти к исследованию методов воспроизводимого изготовления ЭКБ для гибридных систем обработки информации со сверхпроводниковыми квантовыми сопроцессорами.

В Главе 3 задаются требования к ЭКБ и проводится комплексное исследование источников декогеренции СДС; разрабатываются конструктивно-технологические методы повышения добротности квантовой ЭКБ и воспроизводимости изготовления высококогерентных СДС, которые направлены на снижение вклада внутренних (тунне-

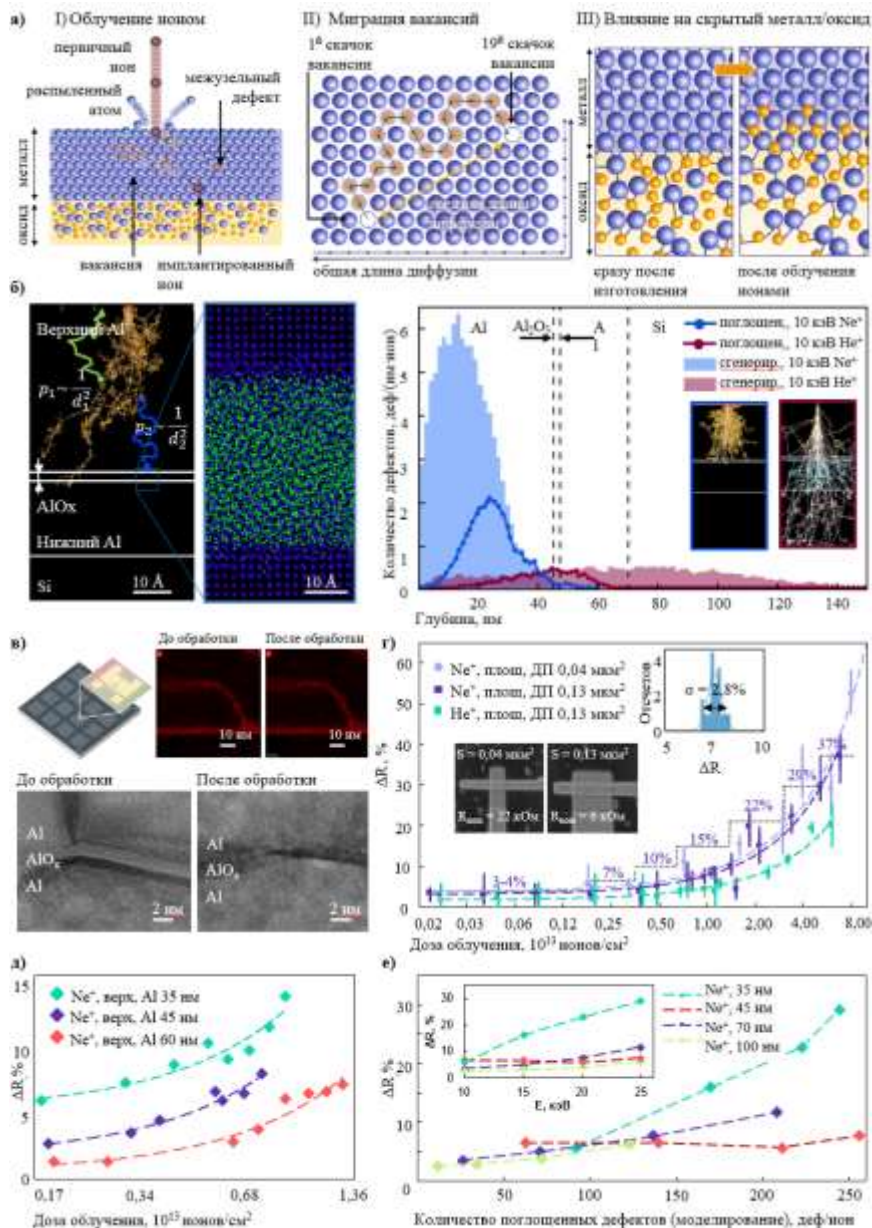


Рис. 5. Механизм роста и метод селективного формирования ультратонких оксидов фокусированным ионным пучком внутри многослойных наноструктур

лирование квазичастиц, магнитные вихри, двухуровневые системы и др.) и внешних (зарядовые и потоковые шумы, спонтанное излучение, потери в подложке, эффект Парселла и др.) источников декогеренции, а также разброса электрофизических параметров ДП с нанометровыми размерами на пластинах диаметром 100 мм.

В качестве доминирующих источников декогеренции СДС, вызывающих снижение добротности квантовой ЭКБ (Q), в диссертации рассматриваются внешнее излучение, диэлектрические потери подложки (Q_{Sub}) и вклад интерфейсов «металл-подложка» (Q_{SM}), «металл-воздух» (Q_{MA}), «подложка-воздух» (Q_{SA}):

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{T_1 \omega} = \sum_i p_i \tan \delta_i + \Gamma_0, \quad (1)$$

где p_i – коэффициенты участия, определяемые как отношение энергии электрического поля в i -ой области, к полной энергии; $\tan \delta_i$ – тангенс потерь каждого диэлектрического или объемного диэлектрического участка i -го материала; Γ_0 – скорость релаксации, вызванная недиэлектрическими потерями; T_1 – время релаксации, ω – рабочая частота. Добротность системы с учетом диэлектрических потерь каждого из интерфейсов определяется как:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{SM}} + \frac{1}{Q_{SA}} + \frac{1}{Q_{MA}} + \frac{1}{Q_{Sub}}, \quad (2)$$

А коэффициенты участия могут быть найдены из соотношения:

$$p_i = \frac{U_i}{U_{tot}} = \frac{\int_i \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} |E_i|^2}{\int_V \frac{\epsilon \epsilon_0}{2} |E|^2}, \quad (3)$$

где U_i – энергия электрического поля в i -ой области; U_{tot} – полная энергия; E – локальное электрическое поле; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

Систематически исследуется вклад отдельных интерфейсов в общие потери СДС на основании моделирования конструкций и экспериментальных измерений параметров более 200 заземленных (Xmon) и плавающих (Floating) кубитов-трансмонов, изготовленных по трем технологиям: 1) планарная технология однослойных СДС; 2) технология СДС с разделением базового слоя, ДП и СП переключками; 3) технология высококогерентных СДС на основе базовых слоев (Al, эпи-Al и α -Ta) с травлением подложки, ультразвуковой микроподрезкой и iDEA отжигом (Рис. 7).

В результате проведенных экспериментов показано, что повышение добротности с 10^5 до 10^6 достигается снижением диэлектрических потерь интерфейса «SM» базового слоя, ДП (Рис. 8) и СВЧ корпусирования СДС; повышение с 10^6 до 2×10^6 обусловлено снижением диэлектрических потерь интерфейсов «SM» и «МА» (внедрение технологии с разделением базового слоя и ДП) и выравнивания потенциала земли (СП переключки). При этой технологии добротность 5×10^6 достигается снижением коэффициентов участия конструкций ЭКБ и влияния внешнего излучения криогенной установки. Достигнутая добротность 10^7 при внедрении технологии высококогерентных СДС (снижение диэлектрических потерь интерфейсов «SM», «SA», «МА») и конструкций ЭКБ (p_i , «Sub») позволит приступить к разработке квантовой ЭКБ, реализующей минимальные необходимые требования для алгоритмов квантовой коррекции ошибок.

Установлено, что добротности СДС более 10^7 могут быть получены методом, включающим 6 основных технологических этапов: (1) формирование базового слоя, в качестве которого исследуются поликристаллический (поли-Al), эпитаксиальный

алюминий (эпи-Al, см. Главу 2) и тантала альфа-фазы (α -Ta). Экспериментально и теоретически обосновывается механизм формирования α -Ta на подложках кремния, разрабатывается метод осаждения тонких пленок α -Ta для СДС. Полученные данные позволяют сделать вывод о высоком потенциале СДС на основе базовых слоев эпи-Al и α -Ta; (2) ультразвуковая микроподрезка дефектных областей базового слоя; (3) теневого осаждение ДП $Al/AlO_x/Al$.



Рис. 7. Исследование методов повышения добротности СДС и сравнение результатов измерений кубитов-трансмонов с достижениями ведущих мировых групп

Для создания широкого спектра сверхпроводниковых устройств разрабатывается технология ДП с критическими размерами от 90 нм до 1 мкм, критическими токами от 10 нА до 10 мкА и плотностями критических токов от 0,05 кА/см² до 3 кА/см². Подтверждаются оптимальные режимы теневого осаждения и окисления ДП по критериям качества морфологии, структуры и коэффициенты вариации критического тока (Рис. 8). Исследуются конструктивно-технологические методы снижения разброса линейных размеров (± 15 нм (3 σ) для ДП с минимальными размерами от 90 до 580 нм на чипах площадью 20×20 мм²), коэффициентов вариации критического тока ($\pm 4\%$ для наиболее часто применяемых площадей 150×200 нм² и 150×600 нм² и $\pm 8\%$ для ДП нанометрового диапазона 100×100 нм²); (4) формирование бандажей для обеспечения электрического контакта базового слоя и ДП; (5) формирование сверхпроводящих переключателей выравнивания потенциала; (6) ионный iDEA отжиг.

После достижения требуемой добротности СДС для реализации многокубитных сопроцессоров исследуются методы повышения воспроизводимости изготовления ДП и кубитов на их основе. Разрабатывается модель процесса теневого осаждения ДП, учитывающая изменение угла осаждения от точечного источника по площади

пластины, и метод SEBi коррекции (Shadow Evaporation Bias Correction) топологии ДП, позволяющий значительно повысить воспроизводимость площади и нормального сопротивления ДП ($CV_{RN} == \sigma_{RN}/(R_N)$).

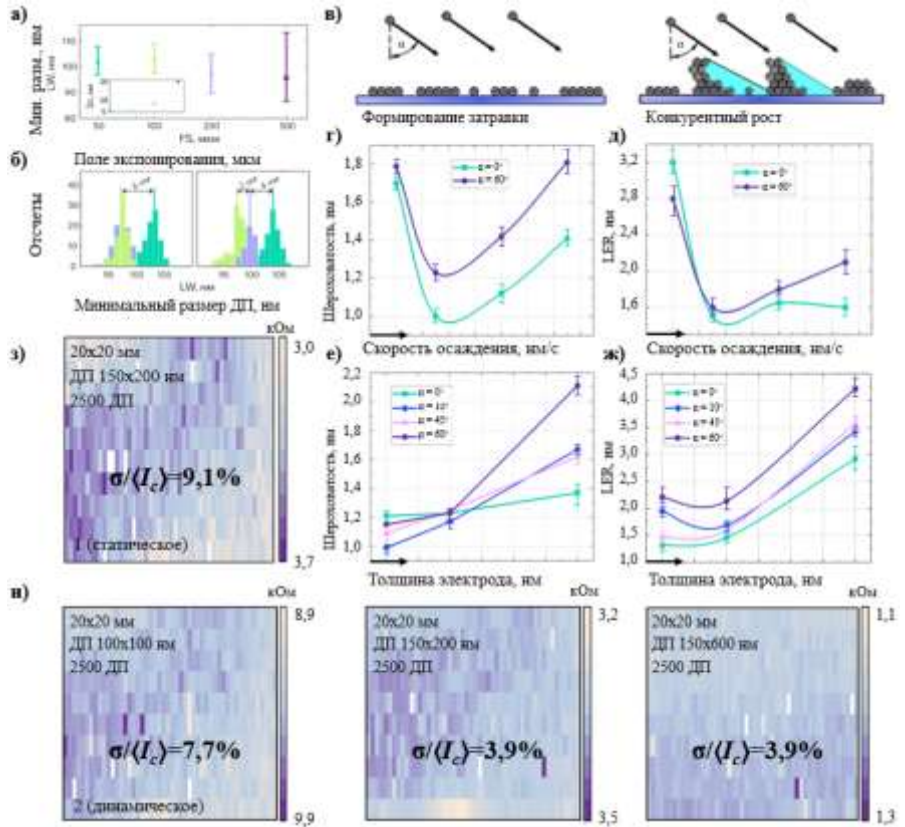


Рис. 8. Исследование методов формирования ДП: а-б) процесса электронно-лучевой литографии на размеры ДП нанометрового диапазона, измерено более 1200 джозефсоновских переходов; в-ж) процесса теневого осаждения нижних электродов ДП; з-и) процесса окисления ДП на коэффициенты вариации критического тока

Показано, что SEBi коррекция позволяет добиться CV_{RN} ниже 6% для ДП площадью 0,025 $\mu\text{м}^2$ и 4% - площадью 0,09 $\mu\text{м}^2$ в рабочем поле $70 \times 70 \text{ мм}^2$ на 100 мм пластинах (Рис. 9,а). Введение постобработки iDEA отжигом позволяет снизить CV_{RN} по кристаллу площадью $25 \times 25 \text{ мм}^2$ до 0,86%. При этом обеспечивается точность подстройки частоты кубитов-трансмонов $\pm 17 \text{ МГц}$ (эквивалентно неравномерности эффективной толщины туннельного барьера ДП равной $\pm 0,17 \text{ \AA}$ (σ)), что в сочетании с локальностью обработки не имеет аналогов в мире. Эффективность iDEA отжига подтверждается его апробацией на 25 кубитах-трансмонах, в т.ч. в многокубитных квантовых сопроцессорах (Рис. 9).

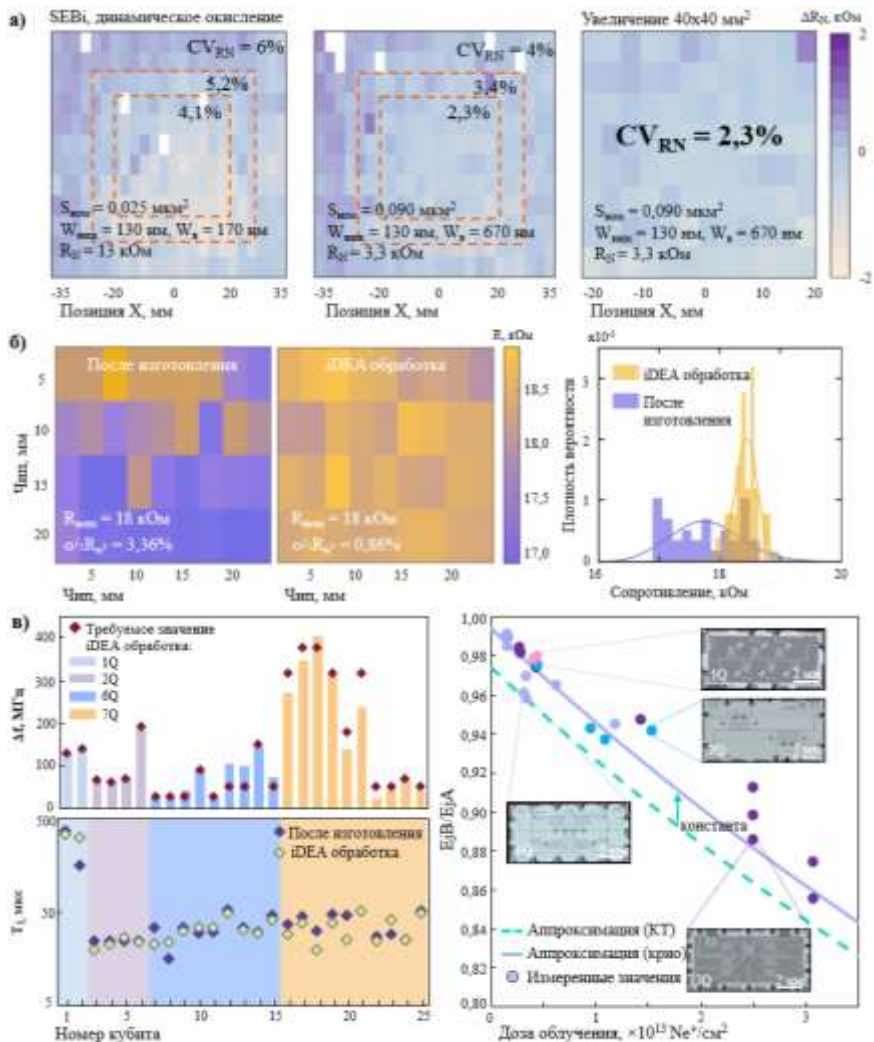


Рис. 9. Результаты экспериментальной апробации: а) снижение CV_{RN} в рабочем поле $70 \times 70 \text{ мм}^2$ на 100 мм пластинах при SEBi коррекции; б) дополнительное снижение CV_{RN} постобработкой iDEA отжигом; в) подстройка частоты одиночных кубитов-трансмонов и многокубитных квантовых сопроцессоров iDEA отжигом

Экспериментально доказано, что ионная постобработка (iDEA отжиг) не влияет на квантовые системы на основе туннельных ДП, а кубиты-трансмоны сохраняют (в ряде случаев улучшают) когерентность, демонстрируя времена релаксации и дефазировки

выше 300 мкс (среднее значение во времени, 10 часов). Для лучших кубитов-трансмонов показаны времена релаксации до 502 мкс и дефазировки до 568 мкс. Разработанные технологические методы изготовления высококогерентных СДС и конструктивно-технологические методы создания высокودобротной квантовой ЭКБ позволяют перейти к созданию устройств квантовой обработки информации на сверхпроводниковой платформе.

Глава 4 посвящена исследованию методов повышения внутренней добротности сверхпроводящих копланарных резонаторов гигагерцового диапазона в однофотонном режиме, которые являются ключевой ЭКБ СДС, квантовых сопроцессоров и детекторов, квантовой памяти, а также разработке архитектуры и экспериментальной апробации сверхпроводниковой интегральной многорезонаторной квантовой памяти. Обобщаются особенности архитектур сверхпроводниковой интегральной квантовой памяти микроволнового диапазона, анализируются их конструктивно-технологические ограничения, которые не позволяют создать устройств с произвольным доступом, а также требуемыми полосой пропускания и эффективностью хранения до 100%. Отмечается, что их реализация возможна при разработке новых архитектур на основе эффекта спинового эха и многорезонаторных систем с высокой внутренней добротностью.

Подтверждена эффективность разработанных методов проектирования и изготовления сверхпроводниковых копланарных резонаторов на кремниевых подложках (материалы базовых слоев (поли-Al, эпи-Al и α -Ta) и технология СДС) - достигнута экспериментально внутренняя добротность до 10,9 млн. в однофотонном и до 24,9 млн. в многофотонном режимах (Рис. 10). В ходе исследования измерены при температуре менее 20 мК более 2000 четвертьволновых резонаторов в диапазоне частот от 2,85 до 7,5 ГГц.

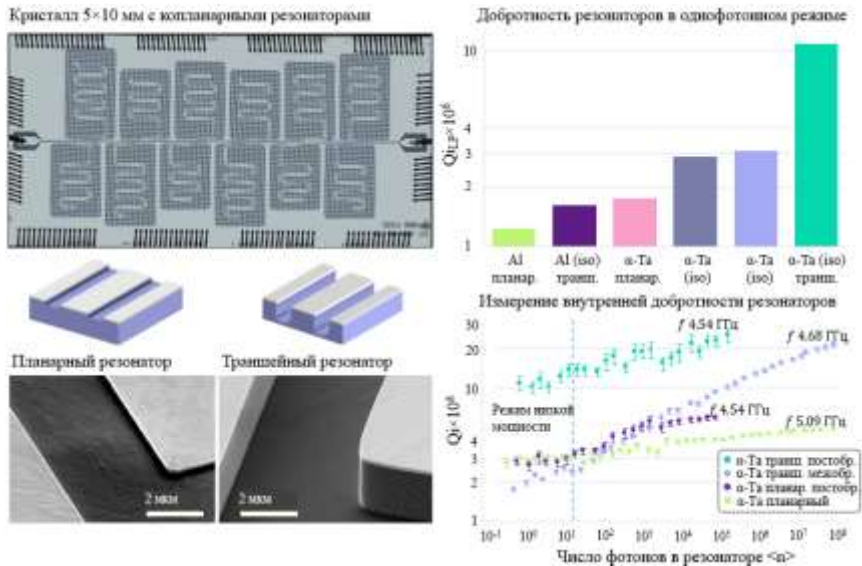


Рис. 10. Оптическое изображение кристалла и СЭМ-изображения областей планарного и траншейного резонаторов (слева); резонаторы с лучшей внутренней добротностью для различных материалов, конструкций и технологий (справа)

На их основе апробирована концепция создания сверхпроводниковой интегральной многорезонанторной квантовой памяти (Рис. 11). На первом этапе разработана архитектура и создана интегральная квантовая память с постоянным временем хранения 277 нс и эффективностью $58 \pm 6\%$ в однофотонном и $75 \pm 8\%$ в многофотонном режимах. На втором этапе предложена новая архитектура и создана интегральная квантовая память с доступом по запросу, циклом хранения 1,51 мкс (рабочая частота 662 кГц) и эффективностью $57,5 \pm 0,4\%$ в однофотонном режиме. Для обоих типов квантовой памяти показано кратное превышение эффективности хранения над опубликованными ранее результатами 6% и 21% соответственно.

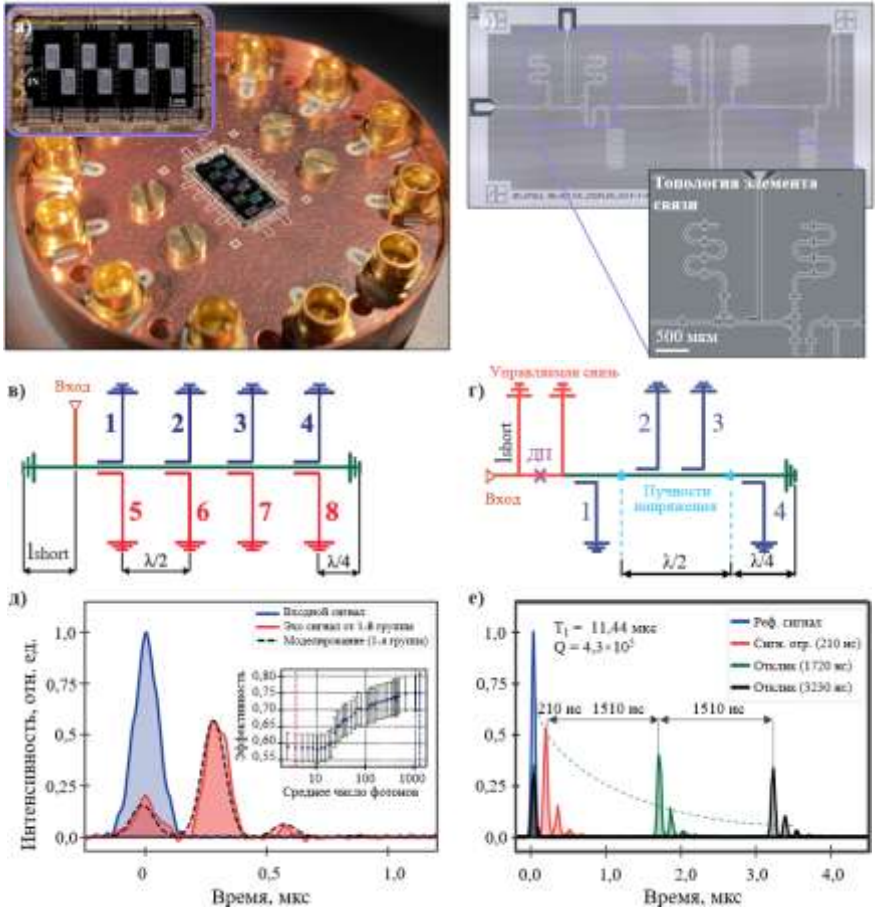


Рис. 11. Многорезонанторная квантовая память с постоянным временем хранения (слева) и с доступом по запросу (справа). а-б) Изображения держателя и кристаллов памяти; в-г) схемы принципиальные; д-е) гетеродинные криогенные измерения эффективности ячеек квантовой памяти; е) сигналы первых трех периодов хранения

Предложена архитектура интегральной квантовой памяти высокой эффективности с доступом по запросу (Рис. 11,б,г,е), которая состоит из общего резонатора (Рис. 11,г, зеленым), связанного емкостным образом с ячейками памяти из резонаторов (Рис. 11,г, синим), подключенного к внешнему порту через управляемый элемент гальванической связи (Рис. 11,г, красным). При этом возможны управляемая запись, хранение и извлечение квантового состояния из ячеек памяти. Для записи силу связи задают из условия согласования импеданса ($\kappa = 2\pi \frac{q^2}{\Delta}$). На этапе хранения связь с входным портом отключают (и поддерживают силу связи $\kappa \sim 0$), при этом в общем резонаторе периодически генерируются темное или хранимое состояние. Для извлечения квантового состояния в требуемый момент времени на n -м периоде хранения задают высокую связь и согласованный импеданс с внешним портом. Расчётная эффективность хранения для данной архитектуры ограничена лишь технологическими факторами и составляет 100%.

В завершении сформулированы ограничения и дальнейшие направления исследований для практического применения сверхпроводниковой интегральной квантовой памяти в гибридных системах обработки информации и квантовых сенсорах.

В Главе 5 проводится комплексный анализ подходов к созданию широкополосных криогенных параметрических усилителей с собственными шумами на уровне стандартного квантового предела. Отмечается «особая роль» ШПУ бегущей волны и ШПУ с трансформаторами импеданса в многокаскадных системах считывания сигналов низкой мощности (-130...-190 дБм) широкого класса сверхпроводниковых квантовых устройств, что позволяет обеспечить критически важный переход («сигнал-шум») из области преобладания тепловых шумов Джонсона-Найквиста в область квантовых шумов. Исследованы методики расчета, конструкции, материалы и разработаны технологии создания ШПУ с двухсекционными микрополосковыми и многосекционными (на сосредоточенных элементах) трансформаторами импеданса с собственными шумами порядка СКП, а также перспективные ШПУ бегущей волны.

Предложенные подход и конструкции криогенных ШПУ с микрополосковыми трансформаторами импеданса не имеют аналогов, позволяют существенно упростить технологию, снизить время и стоимость изготовления. По результатам криогенных измерений семейства ШПУ с двухсекционными трансформаторами импеданса из кремниевых микрополосковых структур достигнуты параметры (Рис. 12), необходимые для считывания 5-10 кубитов: коэффициент усиления выше 15 дБ при средней мощности насыщения -105 дБм в полосе пропускания 270 МГц на центральной частоте 6,4 ГГц и шумовой температуре порядка СКП. В качестве недостатка данного семейства ШПУ следует выделить недостаточную полосу пропускания (до 400 МГц) и мощность насыщения (до -95 дБм), зависимость параметров от импеданса входного порта и высокую неравномерность АЧХ в полосе пропускания ± 10 дБ.

Расширение полосы пропускания и снижение неравномерности АЧХ реализуют увеличением порядка согласующего контура в многосекционных трансформаторах импеданса, что невозможно в микрополосковых ШПУ ввиду низкой степени интеграции. Для повышения степени интеграции (10^3 - 10^4) широкого класса криогенных устройств с собственными шумами близкими к СКП разработана технология СДС на сосредоточенных элементах (планарные катушки с индуктивностью от 120 пГн до 0,4 нГн и микроконденсаторы емкостью от 0,2 пФ до 8,0 пФ) с предельно малыми потерями в однофотонном режиме ($\text{tg}(\alpha)_{\text{sp}} = 8,6 \times 10^{-5}$) при температуре ниже 20 мК.

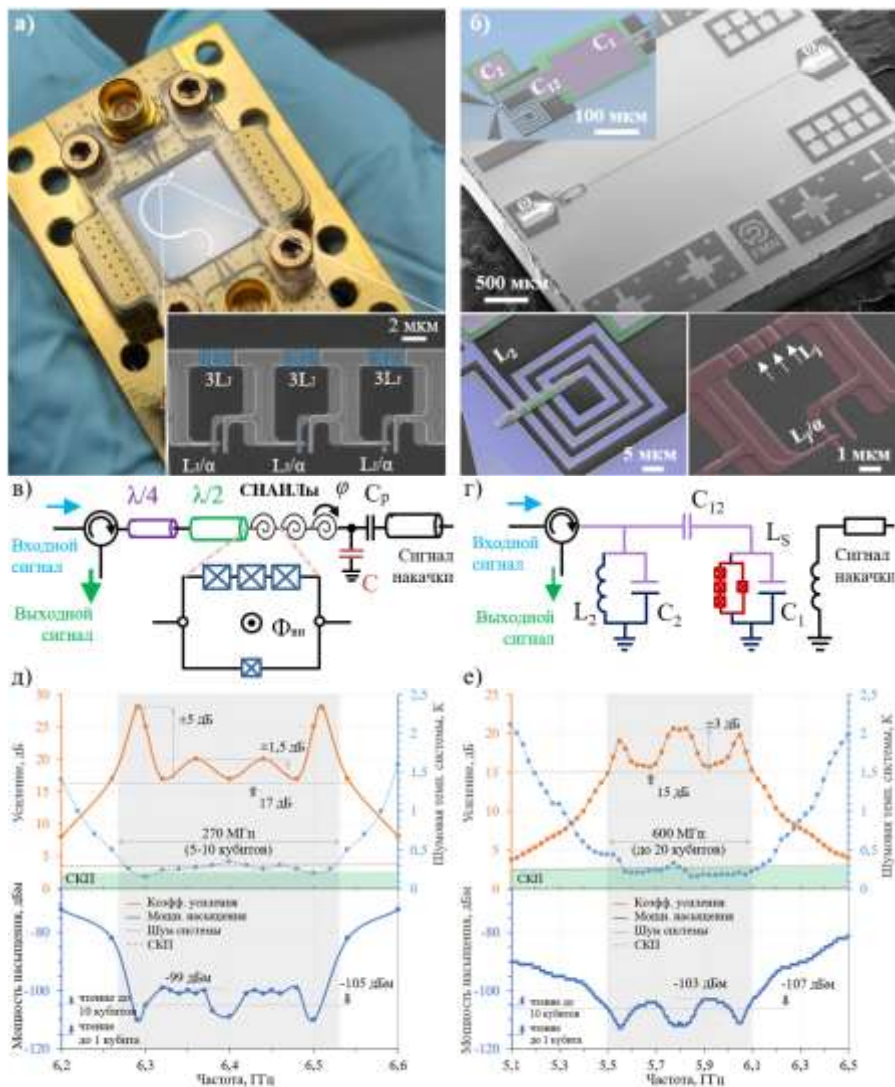


Рис. 12. ШПУ с двухсекционным микрополосковым (слева) и на сосредоточенных элементах (справа) трансформатором импеданса: а-б) изображения держателя и кристаллов; в-г) схемы принципиальные; д-е) результаты криогенных измерений параметров ШПУ при температуре 20 мК

По результатам криогенных измерений ШПУ с двухсекционным трансформатором импеданса на сосредоточенных элементах достигнуты параметры (Рис. 12), необходимые для считывания до 20 кубитов: коэффициент усиления выше 15 дБ при неравномерности АЧХ ± 3 дБ и средней мощности насыщения -107 дБм в полосе 600 МГц на центральной частоте 5,75 ГГц и шумовой температуре порядка СКП.

Апробирована оригинальная методика расчета топологий сверхпроводниковых сосредоточенных элементов, эффективность и практическая значимость которой подтверждена результатами криогенных измерений ШПУ. С применением разработанной методики спроектированы топологии ШПУ с согласующими контурами до 4-го порядка, реализации которых в мире не представлено. Разработанные методы и технологии создания ШПУ с трансформаторами импеданса апробированы в системах считывания сверхпроводниковых многокубитных квантовых сопроцессоров с высокой точностью квантовых логических операций (99,9%) и интегральной квантовой памяти с доступом по запросу рекордной эффективности.

В завершении представлены результаты разработки конструкции ШПУ бегущей волны на основе 700 элементарных ячеек с нелинейными асимметричными индуктивными элементами для согласования импеданса посредством управления нелинейностью Керра. Реализована возможность перестройки рабочего диапазона ШПУ посредством изменения параметров сигнала накачки. С учетом конструктивно-технологических ограничений разработана технология изготовления ШПУ бегущей волны на основе плоскопараллельных микроконденсаторов (Al/a-Si/Au). По результатам криогенных измерений подтверждены следующие параметры: коэффициент усиления 8-18 дБ при средней мощности насыщения -85 дБм в полосе пропускания 3 ГГц на центральной частоте 5,9 ГГц и шумовой температуре от 2 до 8 СКП.

Полученные результаты позволяют перейти к проблеме создания систем гибридной квантово-классической обработки информации со сверхпроводниковыми квантовыми вычислителями, приступить к реализации масштабируемых 20-100 кубитных ячеек с высокими точностями квантовых логических операций и квантовых симуляторов.

В Главе 6 разработана и апробирована конструктивно-технологическая платформа для систем гибридной обработки информации со сверхпроводниковыми квантовыми сопроцессорами. Предложена методика и разработаны средства для характеристики качества и производительности многокубитных квантовых сопроцессоров. Проведена экспериментальная апробация разработанных сверхпроводниковых сопроцессоров со средней точностью квантовых логических операций выше 99%, а также технологий кристаллов квантовых симуляторов для фундаментальных физических исследований.

Разработаны технологии изготовления первых российских высокоточных 2-кубитных сверхпроводниковых квантовых сопроцессоров на основе кубитов различных типов (трансмонов и флаксониумов) со средней точностью однокубитных операций выше 99,9% и двухкубитных операций выше 99,4%. Разработаны архитектура и созданы масштабируемые 4-кубитные ячейки (Т-топологии) с перестраиваемыми кубитами-трансмонами и управляемыми элементами связи, на базе которых реализовано семейство универсальных квантовых сопроцессоров «Подснежник» (далее SnowDrop, Рис. 13). Разработаны и внедрены в конструкциях кристаллов сопроцессоров методы снижения перекрестных помех по постоянному и переменному току высокой частоты.

Snowdrop 4Q



Точность 1Q: $99,68 \pm 0,095\%$
 Точность 2Q: $99,12 \pm 0,089\%$
 Точность считывания: $95,75 \pm 1,42\%$

УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭЛЕМЕНТ СВЯЗИ

ФИЛЬТР ПАРСЕЛЛА

В открытом облачном доступе

Snowdrop 4Q (2025)



Точность 1Q: $99,93 \pm 0,008\%$
 Точность 2Q: $99,26 \pm 0,087\%$
 Точность считывания: $96,88 \pm 0,91\%$

МАСШТАБИРУЕМЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭЛЕМЕНТ СВЯЗИ

Snowdrop 8Q

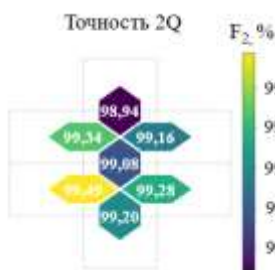
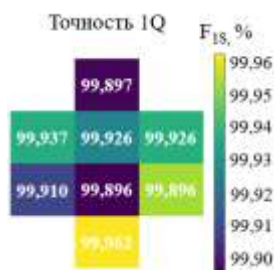


Точность 1Q: $99,94 \pm 0,011\%$
 Точность 2Q: $99,21 \pm 0,16\%$
 Точность считывания: $97,75 \pm 0,45\%$

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ

СНИЖЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМОХ ПО СВЧ И ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

НОВАЯ МАТЕРИАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА



Архитектура сопроцессоров с плотной 2D сеткой кубитов

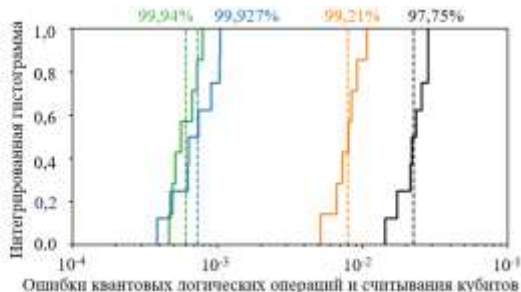
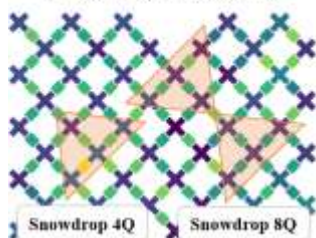


Рис. 13. Разработка и криогенная характеристика сверхпроводниковых 4- и 8-кубитных квантовых сопроцессоров на базе архитектуры SnowDrop

Созданы первые российские высокоточные сверхпроводниковые 4- и 8-кубитные квантовые сопроцессоры со средней точностью однокубитных операций $99,932 \pm 0,008\%$ и $99,940 \pm 0,011\%$, двухкубитных CZ операций выше $99,262 \pm 0,087\%$ и $99,21 \pm 0,16\%$, и одновременного считывания выше $96,88 \pm 0,91\%$ и $97,75 \pm 0,45\%$. На них выполнена серия квантовых алгоритмов для решения задач материаловедения: симуляция

динамики намагниченности спинов (модель Изинга) и вариационный алгоритм решения уравнения теплопроводности. Проведено экспериментальное сравнение выполнения этих алгоритмов с квантовыми сопроцессорами IBM Sherbrook 127Q, Osaka 127Q и Kyoto 127Q, которые показали паритетные результаты. В завершении проведена экспериментальная апробация разработанных технологий при изготовлении российских 11- и 25-кубитных СДС для создания и исследований особенности физики беспорядка в квантовых метаматериалах.

Таким образом, экспериментально доказана эффективность разработанной конструктивно-технологической платформы для создания высокоточных квантовых вычислителей и подтверждена перспективность развития отечественных систем гибридной квантово-классической обработки информации на сверхпроводниковой платформе.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы. В работе решена научно-технологическая проблема создания фундаментальных основ, материалов с предельно малыми потерями, методов проектирования, технологий сверхпроводниковых джозефсоновских ИС, квантовой ЭКБ и конструктивно-технологической платформы для отечественных гибридных систем квантово-классической обработки информации.

1. Обоснована парадигма гибридной обработки информации для создания перспективных вычислительных комплексов пост-эксафлопсного класса с гетерогенной интеграцией пост-КМОП сопроцессоров, среди которых особо выделены оптические и квантовые устройства обработки информации по критериям производительности, энергоэффективности, масштабируемости и технологичности.

2. Обоснованы структурные схемы перспективных квантово-классических вычислительных узлов и аппаратно-программная платформа гибридной системы обработки информации с гетерогенной интеграцией сверхпроводниковых локальных квантовых сопроцессоров в облачном доступе. Сформулирована концепция развития распределенных квантовых вычислителей, которые должны быть построены на масштабируемых сопроцессорных ячейках – 100-1000-кубитных локальных квантовых сопроцессорах, объединенных квантовыми шинами данных. Обоснованы приоритеты развития масштабируемых ячеек: 1) качество (реализация 20-100-кубитных базовых ячеек с высокой точностью считывания и сброса состояний кубитов (99,5-99,9%), однокубитных (99,98-99,998%) и двухкубитных (99,9-99,97%) операций); 2) масштабирование (реализация 100-1000-кубитных квантовых сопроцессоров с сохранением точностей); 3) повышение скорости квантовых вычислений; 4) повышение связанности кубитов.

3. На основе предложенных механизмов роста разработаны новые методы формирования сплошных атомарно гладких тонких пленок эпитаксиальных металлов (SCULL метод) и ультратонких оксидов внутри многослойных наноструктур (iDEA метод) с предельно малыми потерями, электрофизическими, оптическими и плазмонными свойствами близкими к теоретически достижимым значениям. Эффективность SCULL и iDEA методов экспериментально подтверждена при создании интегральных устройств квантовой обработки информации с параметрами, определившими мировой уровень.

4. Разработаны конструктивно-технологические методы и средства воспроизводимого изготовления высококогерентных СДС, включая оригинальные методы травления подложки кремния с ультразвуковой микроподрезкой базового слоя Al, а также формирования, SEBi коррекции и ионного iDEA отжига ДП. Их внедрение позволило

реализовать СДС с добротностью до 10^7 , кубитами-трансмонами со средним временем релаксации и дефазировки выше 300 мкс (максимальные времена релаксации 502 мкс и когерентности до 568 мкс на частоте 4,089 ГГц), а также воспроизводимостью нормального сопротивления ДП $CV_{R_N} = \sigma_{R_N}/(R_N) \pm 6,0\%$ для ДП площадью 0,025 мкм² и до $\pm 4,0\%$ - 0,09 мкм² в рабочей зоне 70×70 мм² (49 см²) по пластине 100 мм.

5. Разработан метод постобработки ДП высококогерентных СДС методом iDEA отжига, что позволяет кратно улучшить CV_{R_N} и проводить высокоточную подстройку частоты кубитов-трансмонов после их изготовления. Экспериментально доказана возможность изменения нормального сопротивления ДП в диапазоне от 2% до 37% от номинального значения без структурных повреждений и снижения когерентности, улучшения CV_{R_N} до 0,86% с точностью подстройки частоты кубитов-трансмонов ± 17 МГц по кристаллу площадью 25×25 мм², что эквивалентно неравномерности эффективной толщины туннельного барьера ДП равной $\pm 0,17$ Å (σ) и в сочетании с локальностью обработки (диаметр ионного пучка 2-10 нм) не имеет аналогов в мире.

6. Разработаны конструктивно-технологические методы создания сверхпроводниковых микроволновых копланарных резонаторов с внутренней добротностью до $1,1 \times 10^7$ ($Q_{ILP} = 10,9$ млн.) в однофотонном режиме и до $2,49 \times 10^7$ ($Q_{INR} = 24,9$ млн.) в многофотонном режиме на частоте 4,54 ГГц. В ходе исследований методов повышения внутренней добротности спроектированы, изготовлены и экспериментально охарактеризованы (при температуре ниже 20 мК) более 2000 копланарных четвертьволновых резонаторов различных конструкций, изготовленные на основе базовых слоев из Al, эпи-Al и Ta с применением различных технологических подходов.

7. Разработаны физико-технологические основы, архитектура, изготовлены образцы и экспериментально подтверждена предложенная концепция многорезонаторной интегральной квантовой памяти с постоянным временем хранения (300 нс) и эффективностью $58 \pm 6\%$ для одиночных микроволновых фотонов, а также $75 \pm 8\%$ в многофотонном режиме. Эффективность квантовой памяти подтверждена криогенными гетеродинными измерениями и методом квантовой томографии процесса хранения.

8. Предложена новая архитектура и экспериментально реализована интегральная многорезонаторная квантовая память с доступом по запросу, обеспечивающая цикл хранения 1,51 мкс (рабочая частота 662 кГц) и эффективность $57,5 \pm 0,4\%$ хранения в течение первого периода в однофотонном режиме, которая существенно превышает ранее опубликованные ведущими мировыми научными группами значения.

9. Разработана конструкция и технология криогенных ШПУ на основе кремниевых микрополосковых структур, на основе которых создано семейство ШПУ с двухсекционными трансформаторами импеданса коэффициентом усиления выше 15 дБ, неравномерностью АЧХ ± 10 дБ и средней мощностью насыщения не хуже -95 дБм в полосе пропускания 400 МГц на центральной частоте 6,4 ГГц с собственными шумами на уровне стандартного квантового предела. ШПУ имеют оригинальную конструкцию, что позволяет существенно снизить сложность технологии изготовления (один цикл электронно-лучевой литографии) и реализовать считывание до 5-10 кубитов.

10. Разработаны конструктивно-технологические основы создания криогенных джозефсоновских устройств на сосредоточенных элементах с собственными шумами на уровне СКП, включая технологию диэлектрика для микроконденсаторов (Al/a-Si/Al) с малыми потерями ($\text{tg}(\alpha)_{SP} = 8,6 \times 10^{-5}$ в однофотонном режиме), конструкции, методику расчета топологий и технологию изготовления ШПУ с трансформаторами

импеданса с многосекционными согласующими контурами (4-го порядка и выше). На их основе создано семейство криогенных ШПУ с двухсекционными трансформаторами импеданса с коэффициентом усиления выше 15 дБ, неравномерностью АЧХ ± 3 дБ и средней мощностью насыщения не хуже -107 дБм в полосе пропускания 600 МГц на центральной частоте 5,75 ГГц при шумовой температуре порядка СКП. ШПУ имеют оригинальную конструкцию и позволяют реализовать считывание до 20 кубитов.

11. Разработаны конструктивно-технологические основы создания перспективных криогенных ШПУ бегущей волны на основе нелинейных асимметричных индуктивных элементов с коэффициентом усиления от 8 дБ до 18 дБ и высокой мощностью насыщения не хуже -85 дБм в полосе пропускания 3000 МГц на центральной частоте 5,79 ГГц при шумовой температуре в 2-8 раз выше СКП. ШПУ бегущей волны имеют высокий потенциал при реализации 100-1000-кубитных квантовых сопроцессоров.

12. Разработанные криогенные ШПУ апробированы в системах считывания высокоточных многокубитных квантовых сопроцессоров (до 8-ми кубитов-трансмонов) и мультирезонаторной квантовой памяти.

13. Разработана технология и изготовлены кристаллы 2-кубитной базовой ячейки сверхпроводниковых сопроцессоров на основе кубитов-флаксоиумов и управляемых элементов связи с точностью одновременных однокубитных операций $99,97 \pm 0,003\%$ и двухкубитных CZ операций $99,23 \pm 0,03\%$.

14. Разработаны архитектура, технология и создана 2-кубитная базовая ячейка сверхпроводниковых сопроцессоров на основе перестраиваемых кубитов-трансмонов и управляемых элементов связи с точностью одновременных однокубитных операций $99,76 \pm 0,011\%$ и двухкубитных CPhase операций $99,48 \pm 0,048\%$.

15. Разработаны архитектура, технология и создана масштабируемая 4-кубитная ячейка с перестраиваемыми кубитами-трансмонами в T-топологии и управляемыми элементами связи с точностью одновременных однокубитных операций $99,932 \pm 0,008\%$, двухкубитных CZ операций $99,262 \pm 0,087\%$ и одновременного считывания кубитов $96,88 \pm 0,91\%$.

16. Разработаны архитектура, технология и создана масштабируемая 8-кубитная ячейка с перестраиваемыми кубитами-трансмонами и управляемыми элементами связи с точностью одновременных однокубитных операций $99,940 \pm 0,011\%$, двухкубитных CZ операций $99,21 \pm 0,16\%$ и одновременного считывания кубитов $97,75 \pm 0,45\%$. Разработанные конструктивно-технологические решения высокоточных базовых ячеек могут быть масштабированы при реализации 20-100-кубитных сверхпроводниковых квантовых сопроцессоров.

17. Предложена методика и разработаны аппаратно-программные средства для количественной оценки качества многокубитных квантовых сопроцессоров.

18. Разработаны технологические средства, предусматривающие выбор режимов технологических и контрольно-диагностических операций, а также изготовление кристаллов 11- и 25-кубитного квантовых симуляторов для фундаментальных исследований модели Су-Шриффера-Хигера и физики беспорядка в квантовых метаматериалах.

19. Разработана новая конструктивно-технологическая платформа российской системы гибридной квантово-классической обработки информации с пост-КМОП сопроцессорами, на основе которой реализовано семейство сверхпроводниковых высокоточных 4- и 8-кубитных универсальных квантовых сопроцессоров. Система апробирована на серии квантовых алгоритмов для решения задач материаловедения, а также запущена в

открытый облачный доступ в 4 странах мира. Результаты внедрены в МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» ГК «Росатом», г. Москва в НИОКР и проектах (шифры «Тайга», «Лиман», «Прибой», «Криостат», «Наноплазмоника», «Модулятор», «Гибрид24», «Усилитель24», «Детектор» и др.), а также в учебный процесс подготовки дипломированных специалистов и аспирантов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Superconducting integrated on-demand quantum memory with microwave pulse preservation / I.A. Rodionov [et al.] // *Physical Review Letters*. 2026. V. 136, P. 060808. (0,44 п.л./0,15 п.л.).
2. Integrated Electro-Optic Absorption Modulator for Silicon Nitride Platform / I.A. Rodionov [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2026. V. 128, 061102. (0,38 п.л./0,1 п.л.).
3. An engineering guide to superconducting quantum circuit shielding / I.A. Rodionov [et al.] // *Applied Physics Reviews*. 2025. V. 12, P. 031334. (1,5 п.л./0,5 п.л.).
4. Subangstrom ion beam engineering of buried ultrathin oxides for scalable quantum computing / I.A. Rodionov [et al.] // *Science Advances*. 2025. V. 11, P. eads9744. (0,62 п.л./0,35 п.л.).
5. Wafer-scale uniformity improvement of Dolan-bridge Josephson junction by shadow evaporation bias correction / I.A. Rodionov [et al.] // *Scientific Reports*. 2025. V. 15 (1), P. 28097. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
6. Mutual control of critical temperature, residual resistance ratio, stress, and roughness for sputtered Nb films / I.A. Rodionov [et al.] // *Surfaces and Interfaces*. 2025. V. 72, P. 107266. (1,38 п.л./0,5 п.л.).
7. Lumped-element SNAIL parametric amplifier with two-pole matching network / I.A. Rodionov [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2024. V. 125 (16), P. 164003. (0,81 п.л./0,4 п.л.).
8. Aluminum Josephson junction microstructure and electrical properties modified by thermal annealing / I.A. Rodionov [et al.] // *Scientific Reports*. 2024. V. 14 (1), P. 26066. (0,38 п.л./0,25 п.л.).
9. Wiring surface loss of a superconducting transmon qubit / I.A. Rodionov [et al.] // *Scientific Reports*. 2024. V. 14 (1), P. 7326. (0,44 п.л./0,25 п.л.).
10. Sputtered NbN films for ultrahigh performance superconducting nanowire single-photon detectors / I.A. Rodionov [et al.] // *APL Materials*. 2024. V. 12 (2), P. 021127. (0,69 п.л./0,25 п.л.).
11. Silicon Nitride Integrated Photonics from Visible to Mid-Infrared Spectra / I.A. Rodionov [et al.] // *Laser & Photonics Reviews*. 2024. V. 18 (2), P. 2400508. (2,0 п.л./0,5 п.л.).
12. Anharmonicity of quantum meta-atoms due to dynamic anapole state / I.A. Rodionov [et al.] // *Physical Review B*. 2024. V. 110 (3), P. 035157. (0,38 п.л./0,05 п.л.).
13. Low-loss silicon nitride photonic ICs for near-infrared wavelength bandwidth / I.A. Rodionov [et al.] // *Optics Express*. 2023. V. 31 (10). (1,0 п.л./0,25 п.л.).
14. Robust cryogenic matched low-pass coaxial filters for quantum computing applications / I.A. Rodionov [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2023. V. 123 (20), P. 204001. (0,31 п.л./0,2 п.л.).
15. Toward Highly Efficient Multimode Superconducting Quantum Memory / I.A. Rodionov [et al.] // *Physical Review Applied*. 2023. V. 19 (3), P. 034011. (0,88 п.л./0,25 п.л.).

16. High-Q trenched aluminum coplanar resonators with an ultrasonic edge microcutting for superconducting quantum devices / I.A. Rodionov [et al.] // Scientific Report. 2023. V. 13 (1), P. 15536. (0,38 п.л./0,25 п.л.).
17. Improving Josephson junction reproducibility for superconducting quantum circuits: junction area fluctuation / I.A. Rodionov [et al.] // Scientific Reports. 2023. V. 13 (1), P. 6772. (0,81 п.л./0,4 п.л.).
18. Optimization of shadow evaporation and oxidation for reproducible quantum Josephson junction circuits / I.A. Rodionov [et al.] // Scientific Reports. 2023. V. 13 (1), P. 4174. (0,81 п.л./0,4 п.л.).
19. Evolutionary selection growth of silver films for low-loss nanophotonic devices / I.A. Rodionov [et al.] // Surfaces and Interfaces. 2023. V. 39, P. 102897. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
20. Coupler Microwave-Activated Controlled-Phase Gate on Fluxonium Qubits / I.A. Rodionov [et al.] // PRX Quantum. 2023. V. 4 (4), P. 040321. (0,69 п.л./0,05 п.л.).
21. Greatly Enhanced Emission from Spin Defects in Hexagonal Boron Nitride Enabled by a Low-Loss Plasmonic Nanocavity / I.A. Rodionov [et al.] // Nano Letters. 2023. V. 23(1). (0,56 п.л./0,05 п.л.).
22. Broadband SNAIL parametric amplifier with microstrip impedance transformer / I.A. Rodionov [et al.] // Applied Physics Letters. 2022. V. 121 (23), P. 232601. (0,81 п.л./0,25 п.л.).
23. ITO film stack engineering for low-loss silicon optical modulators / I.A. Rodionov [et al.] // Scientific Reports. 2022. V. 12 (1), P. 6321. (0,69 п.л./0,35 п.л.).
24. Cavity-QED simulation of a quantum metamaterial with tunable disorder / I.A. Rodionov [et al.] // Physical Review A. 2022. V. 105 (3), P. 033519. (0,75 п.л./0,05 п.л.).
25. Topological excitations and bound photon pairs in a superconducting quantum metamaterial / I.A. Rodionov [et al.] // Physical Review B. 2021. V. 103 (22), P. 224520. (1,25 п.л./0,05 п.л.).
26. Photon Transport in a Bose-Hubbard Chain of Superconducting Artificial Atoms / I. A. Rodionov [et al.] // Physical Review Letters. 2021. V. 126 (18), P. 180503. (0,81 п.л./0,05 п.л.).
27. Cross Coupling of a Solid-State Qubit to an Input Signal due to Multiplexed Dispersive Readout / I.A. Rodionov [et al.] // Physical Review Applied. 2020. V. 14 (5), P. 054059. (0,81 п.л./0,05 п.л.).
28. Epitaxial Silver Films Morphology and Optical Properties Evolution over Two Years / I.A. Rodionov [et al.] // Coatings. 2020. V. 10 (10), P. 911. (0,81 п.л./0,5 п.л.).
29. Light dressing of a diatomic superconducting artificial molecule. Physical Review A / I.A. Rodionov [et al.] // 2020. V. 102 (1), P. 013707. (1,13 п.л./0,05 п.л.).
30. Machine Learning for Optical Gas Sensing: A Leaky-Mode Humidity Sensor as Example / I.A. Rodionov [et al.] // IEEE Sensors journal. 2020. V. 20 (13), P. 9026912. (0,63 п.л./0,15 п.л.).
31. Ultrafast quantum photonics enabled by coupling plasmonic nanocavities to strongly radiative antennas / I.A. Rodionov [et al.] // Optica. 2020. V. 7 (5). (0,38 п.л./0,05 п.л.).
32. A wideband cryogenic microwave low-noise amplifier / I.A. Rodionov [et al.] // Beilstein Journal Nanotechnology. 2020. V. 11 (1), P. 1484–1491. (0,5 п.л./0,05 п.л.).
33. Quantum Engineering of Atomically Smooth Single-Crystalline Silver Films / I.A. Rodionov [et al.] // Scientific Reports. 2019. V. 9 (1), P. 12232. (0,56 п.л./0,5 п.л.).

34. Planar Architecture for Studying a Fluxonium Qubit / I.A. Rodionov [et al.] // JETP Letters. 2019. V. 110 (8). (0,38 п.л./0,05 п.л.)
35. State-of-the-art plasmonic crystals for molecules fluorescence detection / I.A. Rodionov [et al.] // Optical Material Express. 2019. V. 9 (3). (0,44 п.л./0,15 п.л.)
36. Silver-based plasmonics: golden material platform and application challenges / I.A. Rodionov [et al.] // Optical Material Express. 2019. V. 9 (2). (1,94 п.л./1,2 п.л.)
37. Ultrabright Room-Temperature Sub-Nanosecond Emission from Single Nitrogen-Vacancy Centers Coupled to Nanopatch Antennas / I.A. Rodionov [et al.] // Nano Letters. 2018. V. 18 (8). (0,5 п.л./0,05 п.л.)
38. Toward a theoretically limited SPP propagation length above two hundred microns on an ultra-smooth silver surface / I.A. Rodionov [et al.] // Optical Material Express. 2018. V. 8 (11). (0,5 п.л./0,15 п.л.)
39. Plasmonic nanolaser for intracavity spectroscopy and sensorics / I.A. Rodionov [et al.] // Applied Physics Letters. 2017. V. 11 (21). (0,34 п.л./0,1 п.л.)
40. Structural and Optical Properties of Single and Bilayer Silver and Gold Films / I.A. Rodionov [et al.] // Physics of the Solid State. 2016. V. 58 (12). (0,5 п.л./0,15 п.л.)

Патенты РФ и свидетельства

41. Монокристаллические пленки металлов: а.с. 2691432 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 29.12.2017, опублик. 13.06.2019. Бюл. №17.
42. Способ изготовления массивов регулярных субмикронных отверстий в тонких металлических пленках на подложках: а.с. 2703773 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 02.04.2019, опублик. 22.10.2019. Бюл. №30.
43. Способ физического осаждения тонких пленок металлов из газовой фазы: а.с. 2697313 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 02.04.2019, опублик. 13.08.2019. Бюл. №23.
44. Способ изготовления массивов регулярных субмикронных металлических структур на оптически прозрачных подложках: а.с. 2706265 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 02.04.2019, опублик. 15.11.2019. Бюл. №32.
45. Сверхпроводниковый однофотонный детектор: а.с. 2796914 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 10.05.2022, опублик. 29.05.2023. Бюл. №16.
46. Способ изготовления глубокопрофильных многоуровневых микроструктур в кварцевом стекле: а.с. 2804791 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 26.05.2023, опублик. 05.10.2023. Бюл. №28.
47. Способ изготовления сверхпроводниковых кубитов с отжигом фокусированным ионным пучком: а.с. 2813743 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 29.09.23, опублик. 16.02.24. Бюл. №5.
48. Микрофлюидный тепловой сенсор потока жидкости: а.с. 2813117 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 26.05.2023, опублик. 06.02.2024. Бюл. №4.
49. Интегральный электрооптический модулятор: а.с. 2841350 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 26.12.2024, опублик. 06.06.2025. Бюл. №16.
50. Модуль рециркуляции гелия для криостата сверхнизких температур: а.с. 238008 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 28.06.2025, опублик. 16.10.2025. Бюл. №29.
51. Высококогерентный сверхпроводниковый кубит и способ его изготовления: а.с. 2851672 РФ / И.А. Родионов [и др.] // заявл. 26.12.2024, опублик. 26.11.2025. Бюл. №33.

**Публикации в изданиях материалов международных НТК,
индексируемых в международных БД WoS и Scopus**

52. Nanoscale postfabrication treatment for a wafer-scale precise qubits frequency control / I.A. Rodionov [et al.] // APS March Meeting Abstracts. V. 2024. P. 01-005.
53. Highly-efficient multimode superconducting integrated quantum memory / I.A. Rodionov [et al.] // APS March Meeting Abstracts. V. 2024. EE02-009.
54. Решение уравнений теплопроводности на сверхпроводниковом квантовом сопроцессоре Snowdrop 4Q / И.А. Родионов [и др.] // Международная конференция «Mathematical Modeling and Computational Physics» (MMCP'2024). 2024.
55. Greatly Enhanced Emission from Spin Defects in Hexagonal Boron Nitride Enabled by a Low-Loss Plasmonic Nano-Cavity / I.A. Rodionov [et al.] // APS March Meeting Abstracts. V. 2023, P. T72-009.
56. Enhancing the performance of coupled cavity-antenna plasmonic nanostructures for ultrafast quantum photonics / I.A. Rodionov [et al.] // CLEO: QELS_Fundamental Science. Optica Publishing Group. 2020. P. FM4C.3.
57. Ultrathin film deposition for nanoelectronic device manufacturing / I.A. Rodionov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2020. V. 781.1. P. 012021.
58. Optical modification of cavity-antenna plasmonic nanostructures for brighter and faster single-photon emission / I.A. Rodionov [et al.] // Quantum 2.0. Optica Publishing Group. 2020. P.QM4B.5.
59. Machine Learning for Optical Sensing with Grating Nanostructures / I.A. Rodionov [et al.] // 32nd European Modeling and Simulation Symposium (EMSS). 2020. P.330-335.
60. Ultra low-loss single-crystalline material platform for high-Q quantum devices / I.A. Rodionov [et al.] // APS March Meeting. 2019, C29.014.
61. Intracavity Spectroscopy and Sensorics with Plasmonic Nanolaser / I.A. Rodionov [et al.] // European Quantum Electronics Conference. Optica Publishing Group. 2019. P. eh_p_5.
62. Controlled Assembly of an Ultrafast Single-Photon Source / I.A. Rodionov [et al.] // CLEO: QELS_Fundamental Science. Optica Publishing Group. 2019. P. FM1M.5.
63. Spin Coherence in Single NV Centers Coupled to Controllably Assembled Nanopatch Antennas / I.A. Rodionov [et al.] // Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). IEEE. 2019. P. 1-2.
64. Optical spectroscopy of Ag/Py based magneto-plasmonic crystals / I.A. Rodionov [et al.] // International Conference Laser Optics (ICLO). St. Petersburg, Russia. 2018. P. 8435279.
65. Ultrabright Room-Temperature Emission from Single Plasmon-Enhanced Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond / I.A. Rodionov [et al.] // Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose, California, USA. IEEE. 2018. P. 8426778.
66. Highly Reflective Mirror Based on Noble Metal 2D Babinet Metasurface / I.A. Rodionov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2018. V. 1092 (1), P. 012062.
67. Wood's anomaly for plasmonic biosensor based on 1D magneto-optical nanostructure / I.A. Rodionov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2018. V. 1092 (1), P. 012134.
68. Highly directional plasmonic nanolaser based on high-performance noble metal film photonic crystal / I.A. Rodionov [et al.] // Nanophotonics VII. SPIE. 2018. P. 106724D.

69. Crystalline structure dependence on optical properties of silver thin film over time / I.A. Rodionov [et al.] // Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS). IEEE. 2017. P. 1497-1502.
70. Mass production compatible fabrication techniques of single-crystalline silver metamaterials and plasmonics devices time / I.A. Rodionov [et al.] // Metamaterials, Metadevices, and Metasystems. SPIE. San Diego, USA. 2017. P. 1034337.
71. Metal-dielectric resonances in tip silicon metasurface and SERS based nanosensors / I.A. Rodionov [et al.] // Plasmonics: Design, Materials, Fabrication, Characterization, and Applications XV. SPIE. 2017. P. 103460C.
72. Single and bilayer films of silver and gold for active plasmonics: Structural properties, dielectric permittivities and radiation resistance / I.A. Rodionov [et al.] // Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). IEEE. 2016. P. 1831-1836.