Научная программа исследований, реализуемых на базе ОИ «Криоинтеграл»

1.1. Тема исследований: Разработка и создание новых интегральных сверхпроводниковых устройств на основе туннельных структур.

1.2. Цель исследований: Разработка, изготовление и апробация сверхпроводниковых приемных систем и сверхпроводниковых устройств с квантовой чувствительностью для новых радиоастрономических проектов и перспективных квантовых приборов.

1.3. Направление из Стратегии НТР РФ: Достижение основной цели предлагаемых исследований соответствует двум направлениям из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: «Н1 - Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта» и «Н6 - Связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики». Реализация предлагаемого исследований внесет существенный вклад в формирование индустрии наносистем и развитие чрезвычайно важных критических технологий РФ: «11 - Технологии диагностики наноматериалов и наноустройств» и «14 - Технологии наноустройств и микросистемной техники».

1.4. Перспективы: В настоящие время ведется модернизация и расширение состава УНУ «Криоинтеграл», которая позволит изготавливать туннельные приемные структуры субмикронных размеров для работы в области терагерцовых частот. Закупка современных систем ультрафиолетовой литографии и плазмохимического травления позволит формировать элементы субмикронных размеров в трехслойной туннельной структуре с высокой плотностью тока. Выполнение данной модернизации позволит изготавливать требуемые туннельные переходы в интересах как минимум 15 пользователей и создавать приемные устройства, предназначенные как для космической и наземной радиоастрономии, так и для систем двойного назначения.

1.5. Планы модернизации и программа исследований:

1.5.1 Развитие и оптимизация технологии изготовления сверхпроводниковых туннельные структуры субмикронных размеров.

Ключевым моментом, на который опирается исследования с использованием УНУ «Криоинтеграл», является технология изготовления сверхпроводниковых микросхем терагерцового диапазона с заданными и контролируемыми параметрами. Возможность создания туннельных переходов с высокой плотностью тока и чрезвычайно малой утечкой, не меняющих свои характеристики со временем, является важнейшим фактором, обеспечившим широкое распространение и практическое применение переходов на основе ниобия. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН успешно функционирует технологический комплекс (УНУ «Криоинтеграл») по изготовлению сверхпроводниковых структур на основе высококачественных туннельных переходов Nb-AlOx-Nb и Nb-AlN-NbN субмикронных размеров. В состав комплекса входят установка электронно-лучевой литографии «e_Line» фирмы Raith Gmbh (Германия) и сверхвысоковакуумная установка

магнетронного распыления кластерного типа модель KJLC CMS in-line Sputter Deposition System фирмы Kurt Lesker (Великобритания). Это позволяет провести все этапы предлагаемой работы в России без закупки оборудования и технологий за рубежом.

Для реализации сверхчувствительных приемных устройств и генераторов ТГц диапазона с предельными параметрами требуются сверхпроводниковых туннельные структуры субмикронных размеров с чрезвычайно высокой плотностью тока (выше 20 кА/см^2). Поэтому одной из задач исследований является создание и оптимизация воспроизводимой и надежной технологии изготовления субмикронных туннельных структур сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) с толщиной туннельного барьера порядка 1 нм с малыми токами утечки. Использование субмикронных туннельных переходов в качестве смесительных элементов позволит реализовать требуемый уровень накачки на частотах до 1 ТГц, а также возможность получения в терагерцовом диапазоне шумовой температуры смесителя, определяемой лишь квантовыми флуктуациями. Будет проведена разработка наноструктур для приемных элементов терагерцового диапазона на основе материалов с высокими значениями энергетической щели и малыми поверхностными потерями, таких как NbTiN, с новыми типами туннельных барьеров.

Одним из наиболее перспективных методов формирования сложных сверхпроводниковых структур субмикронных размеров представляется электронно-лучевая литография (с использованием процесса реактивного плазмо-химического травления). Этот метод позволяет получать туннельные переходы размером вплоть до 0.1 мкм^2, он будет использоваться для изготовления приемных структур терагерцового диапазона субмикронных размеров. Для исследования и тестирования сверхпроводниковых туннельных структур будет использована уже имеющаяся автоматизированная система измерения «IRTECON».

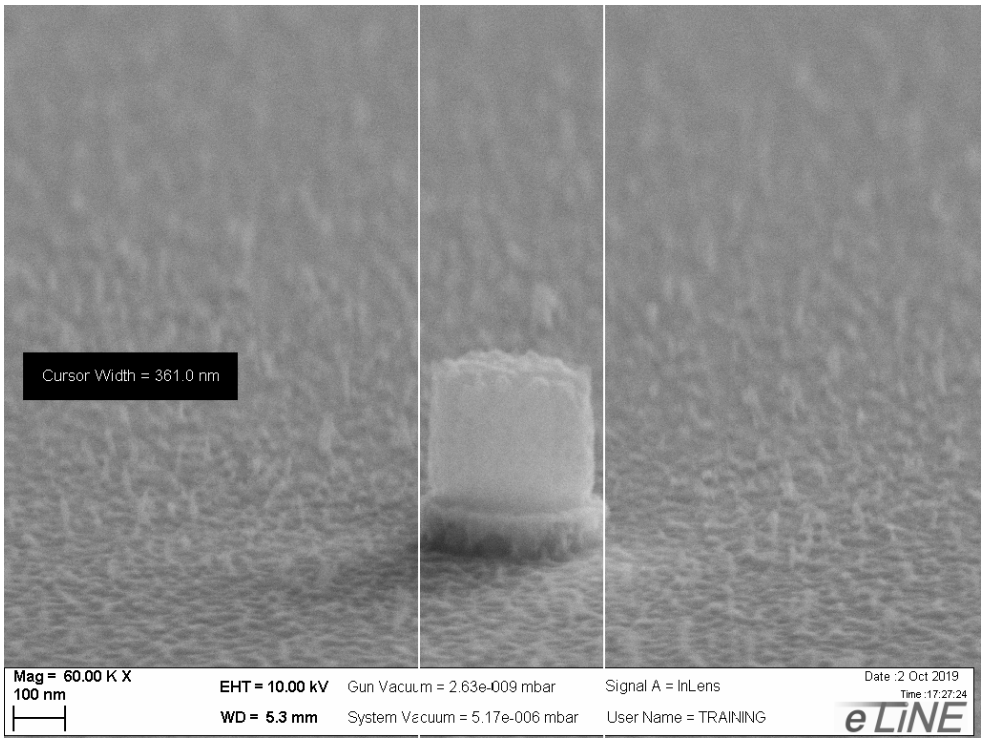

Рис. 1. Вид тестового перехода размером 0,3 мкм после плазмохимического травления по маске резиста в атмосфере SF6.

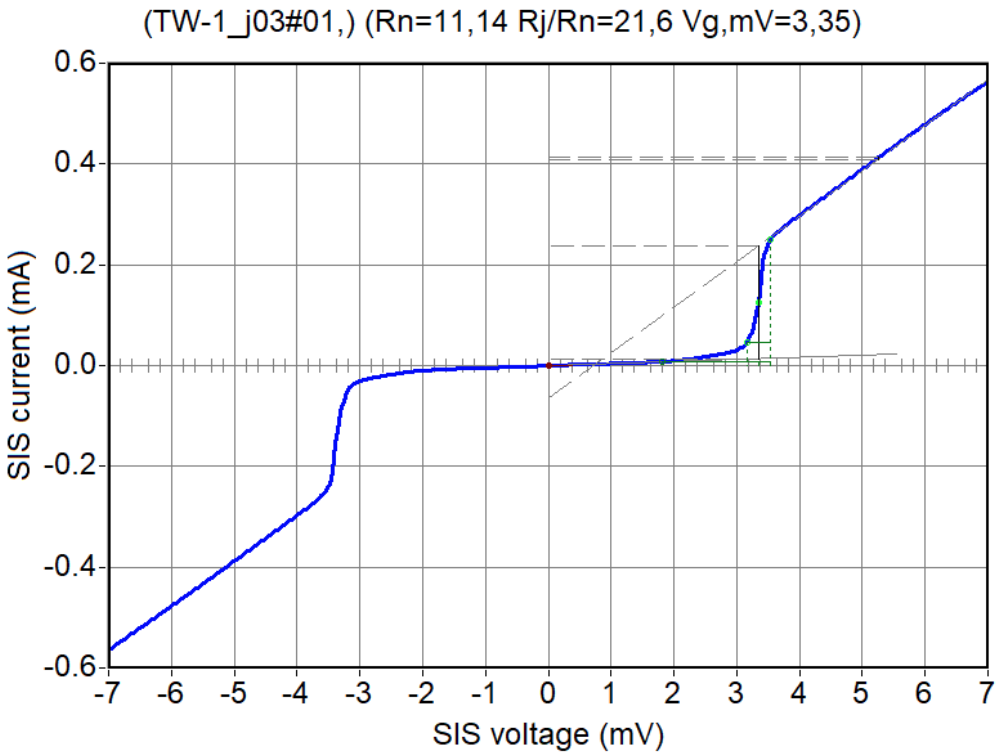

Рис. 2. ВАХ перехода Nb-AlN-NbN площадью 0.47 мкм^2 с плотностью тока 47 кА/см^2, изготовленного с помощью ЭЛЛ.

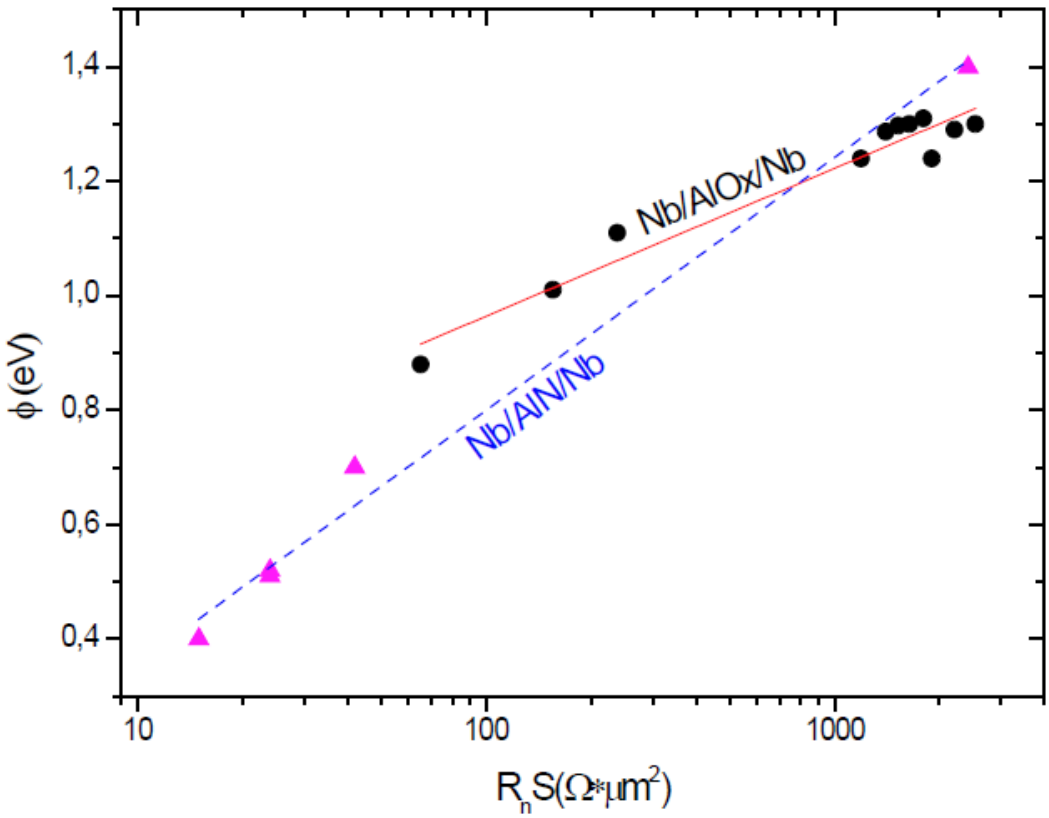

Рис. 3. Зависимость высоты туннельного барьера от значения удельного сопротивления RnS, точки – переходы Nb/AlOx/Nb, треугольники – переходы Nb/AlN/Nb. Сплошная и штриховая линии – линейные аппроксимации

1.5.2. Цикл работ по созданию супергетеродинных СИС приемников ТГц диапазона с квантовой чувствительностью для новых радиоастрономических проектов.

Основной научной проблемой является развитие терагерцовых технологий и создание СИС-приемников с квантовой чувствительностью и источников ТГц излучения для использования в радиотелескопах космического и наземного базирования. Эта проблема, безусловно, сохраняет свою актуальность, что было подтверждено недавно публикацией первого в истории «изображения» сверхмассивной черной дыры в центре галактики М 87. Черные дыры чрезвычайно компактны, поэтому для их наблюдения необходимо иметь предельно высокое угловое разрешение, которое будет реализовано в российском радиоинтерферометре Земля-Космос с базой в 1,5 млн. километров, создаваемого в рамках программы «Миллиметрон». Радиоастрономические наблюдения в диапазоне частот до 1 ТГц с помощью одиночных наземных телескопов в мире дают колоссальное количество научных результатов, что дополнительно стимулирует создание первого подобного телескопа и приемного комплекса для него на территории Российской Федерации.

Для реализации задач программы требуется разработка приемников субтерагерцового диапазона с квантовой чувствительностью и уникальным набором эксплуатационных параметров, эти работы были ранее успешно начаты. В частности, был создан и исследован СИС приемник диапазона 211-275 ГГц, работающий в двухполосном режиме (double side band, DSB). Однако для наиболее эффективной работы в составе интерферометра Земля-Космос требуется создание приемника с разделением боковых полос (2 SSB), постольку именно такие приемники будут использованы в наземных станциях интерферометра. При этом, необходимо существенно расширить полосу промежуточных частот (ПЧ) и оптимизировать конструкцию ПЧ тракта.

Анализ полученной радиоастрономами информации показал необходимость дальнейшего увеличения частоты принимаемого сигнала и создания СИС-приемников диапазона 275 – 373 ГГц, который находится в списке наиболее приоритетных полос приемника космической обсерватории «Миллиметрон». Этот диапазон соответствует седьмому частотному диапазона многоэлементного радиоинтерферометра ALMA на плато Атакама в Чили и является приоритетным при создании новых радиотелескопов для интерферометрии со сверхдлинной базой в рамках международного проекта по исследованию черных дыр («Телескоп горизонта событий» -Event Horizon Telescope, EHT).

Выполнение данных исследований будет способствовать существенному развитию научно-технического и технологического комплекса страны. Апробация сверхчувствительных приемников ТГц излучения на действующих радиотелескопах позволит оптимизировать создаваемые в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН приемные наноструктуры и даст возможность перейти к созданию в России новых видов научно-технической продукции для научных исследований (радиоастрономия, мониторинг атмосферы Земли, спектроскопия) и ряда практических приложений (медицинская диагностика, системы безопасности). Развитие технологий малошумящих ТГц детекторов и разработка сверхчувствительных приёмных систем обеспечит технологическую независимость России при разработке амбициозных наземных и космических радиоастрономических миссий, таких как проект «Суффа», LLAMA и программа «Миллиметрон».

Коллективом УНУ создан пакет прикладных программ для анализа сверхпроводниковых СВЧ элементов на основе квазичастичной нелинейности СИС-переходов в диапазоне частот от 100 до 700 ГГц («щелевой» частоты ниобия). Для проектирования элементов и устройств терагерцового диапазона была разработана

методика численного расчета и конструирования сверхпроводниковых интегральных микросхем с учетом поверхностных потерь в пленках микрополосковых линий вблизи щелевой частоты. Для расчетов используется модифицированная теория Маттиса-Бардина, учитывающая наличие внутрищелевых состояний для ниобия и его соединения, которые являются сверхпроводниками с сильной связью. Для экспериментального исследования отклика приемных СИС-структур разработаны и апробированы методы снятия детекторного отклика квазиоптических приемных элементов с помощью метода Фурье-спектроскопии.

Будут разработаны, изготовлены и апробированы приемники диапазона 211-275 ГГЦ, используемые для изучения сверхмассивных черных дыр с двухполосной шумовой температурой менее 20 К, что лишь в 1.5 раза превышает квартовый предел hf/kB и существенно ниже лучших известных к настоящему времени результатов. На рис. 4 показана фотография СИС-смесителя диапазона 211–275 ГГц. СИС переход вставлен в планарную структуру, образованную сегментами копланарных и микрополосковых линий Nb-SiO_2-Nb. Справа показан волноводный зонд. Будут созданы СИС смесители на основе туннельных переходов Nb/AlN/NbN, включенных в микрополосковую линию NbTiN/Al, для волноводных матричных приемников диапазона 790 - 950 ГГц. На этой основе будут созданы приемные структуры для ряда наземных радиотелескопов, в том числе для китайской терагерцовой обсерватории в Антарктиде (Dome A) и для приемника Champ II + (обсерватория APEX, Атакама, Чили) с рабочими частотами до 950 ГГц. На рис. 5 представлена ВАХ смесительного элемента Nb/AlN/NbN, включенного в полосовую линию NbTiN/Al, изготовленную на кварцевой подложке для телескопа APEX (площадь туннельного перехода A = 0,5 мкм^2, V_g = 3,22 мВ, J_g 30 кА/см^2); джозефсоновский сверхток подавляется магнитным полем (черная линия). ВАХ СИС смесителя, накачиваемого гетеродином на частоте 950 ГГц, показана красной линией.

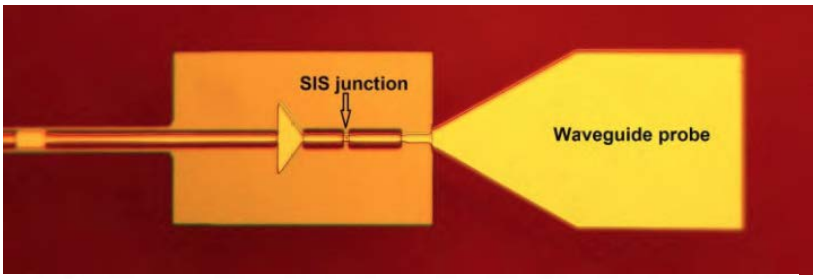

Рис. 4. Фотография СИС-смесителя диапазона 211–275 ГГц.

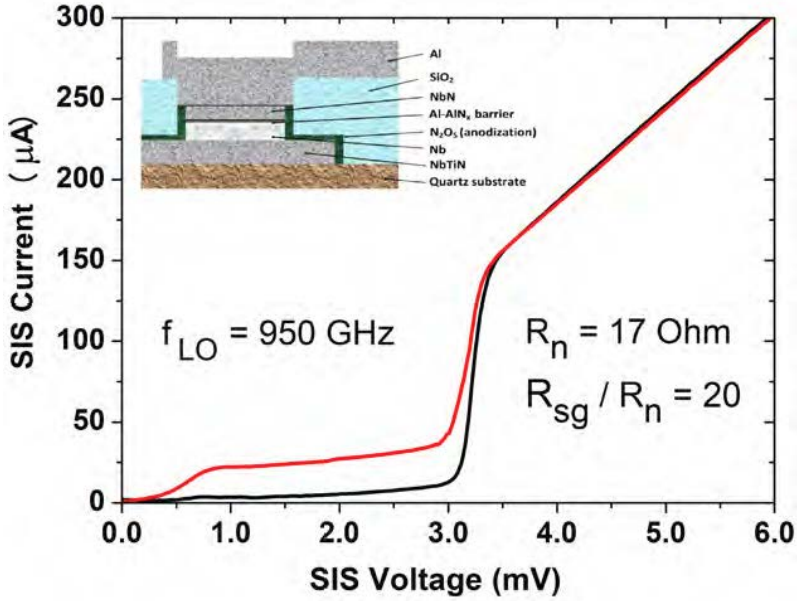

Рис. 5. ВАХ смесительного элемента Nb/AlN/NbN, включенного в полосовую линию NbTiN/Al, изготовленную на кварцевой подложке. Поперечное сечение смесительного элемента, включенного в микрополосковую линию NbTiN/Al, показано на вставке

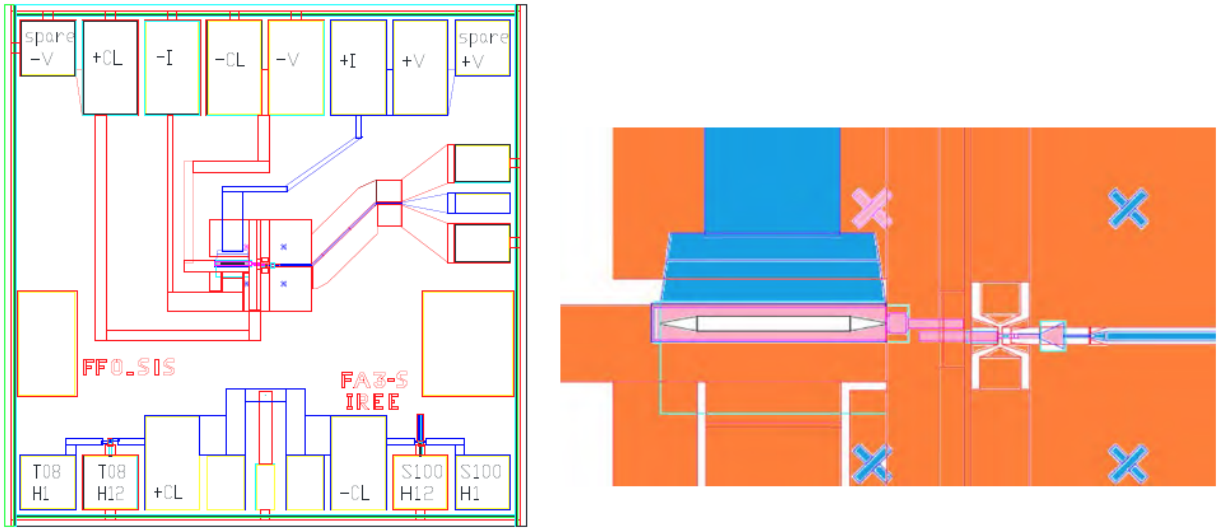

Рис. 6. (а) Чертеж микросхемы интегрального приемника на основе переходов Nb/AlN/NbN, встроенных в линию NbTiN/Al. (б) Топология центральной части микросхемы; пленка NbTiN показана оранжевым цветом, пленка Nb – синим, разводка из Al - розовым.

1.5.3. Создание и изучение джозефсоновских управляемых метаматериалов с различными функциями для использования в квантовых устройствах».

В настоящее время активно ведутся работы по созданию квантовых устройств (кубитов, детекторов с квантовым уровнем шумов, и т.д.), которые в силу своей природы работают при низких и сверхнизких температурах, на частотах до нескольких десятков ГГц. Поэтому весьма актуальным является создание различных функциональных метаматериалов (перестраиваемых фильтров, усилителей) работающих в этом же диапазоне частот и температур, которые позволяют управлять квантовыми устройствами или считывать с них информацию, а также усиливать слабые квантовые сигналы до необходимого уровня.

Практические параметры линейных полупроводниковых СВЧ усилителей достигли предельных значений и не позволяют получить полосу, усиление и шумы, требуемые для создания, системы считывания кубитов в квантовом компьютере, детекторов аксионов, усилителей промежуточной частоты радиоастрономических гетеродинных приемников и системы считывания матриц криогенных болометров с частотным разделением каналов. Применение джозефсоновских туннельных переходов позволяет реализовать нелинейную индуктивность без потерь и обеспечивает получение характеристик, недостижимых для диссипативных нелинейных элементов.

Планируется разработка нескольких типов Джозефсоновских метаметериалов: как активных (усилители), так и пассивных (перестраиваемые запрещённые зоны в спектре частот, фильтры). Будет разрабатываться и экспериментально исследоваться нелинейный метаматериал, которые работает как Джозефсоновский Параметрический Усилитель Бегущей Волны (ДПУБВ), а также (на более позднем этапе) новые перспективные метаматериалы. Планируется разработка широкополосного (до октавы) усилителя с шумовыми параметрами на порядок лучше, чем у полупроводниковых усилителей с высокой подвижностью электронов (HEMT) и сверхнизким уровнем рассеиваемой мощности (нановатты).

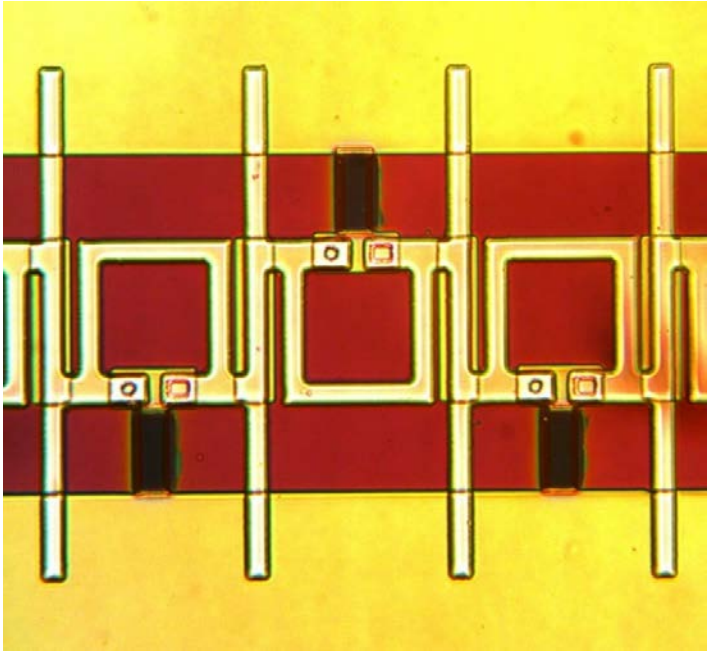

Рис. 6. Вид цепочки ВЧ СКВИДов в копланарной линии в качестве элемента ДПУБВ.

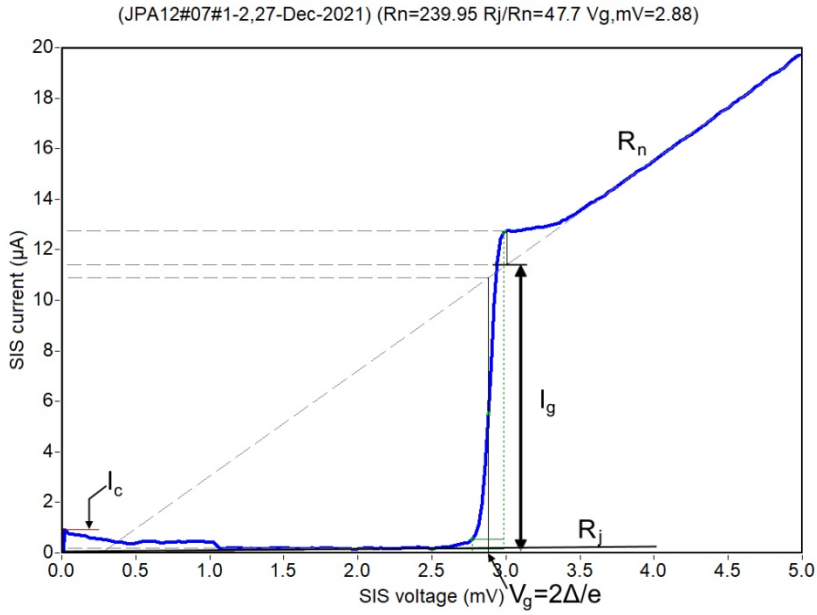

Рис 7. Вольтамперная-характеристика для одиночного ПТ СКВИДа в режиме задания напряжения с подавленным крит. током.

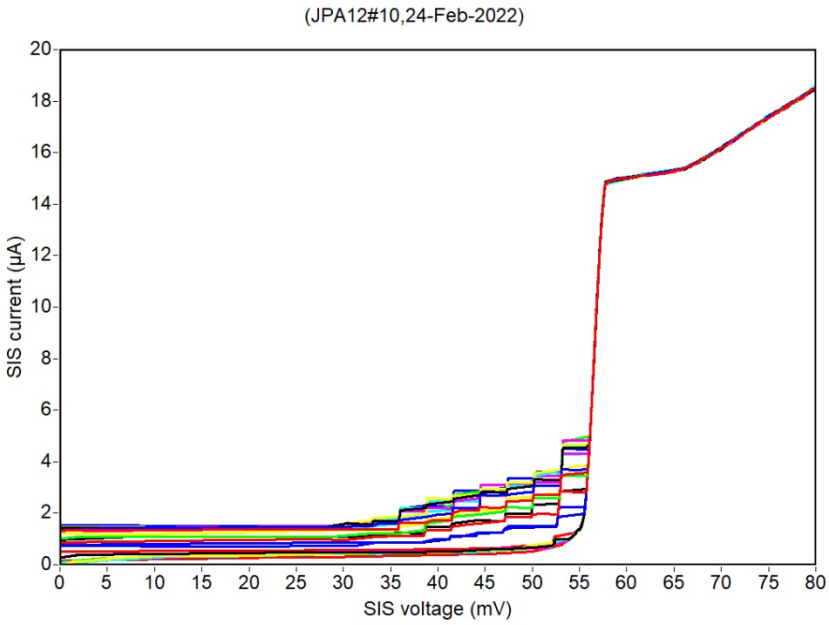

Рис 8. Вольтамперные характеристики цепочки из 20 ПТ СКВИДов снятые в режиме задания тока при различных значениях тока (0 – 1 mA) в управляющей линии.

1.5.4. Модернизация и расширение УНУ «Криоинтеграл».

Для изготовления сверхпроводниковых структур с требуемыми параметрами технологический комплекс будет существенно расширен и модернизирован, будут закуплены и введены в эксплуатацию:

а) Установка реактивного плазмохимического с интерферометром и принадлежностями; установка предназначена для прецизионного травления элементов субмикронных размеров в многослойных тонкопленочных структурах. Использование методов RIE /PE и ICP позволит оптимальным образом переносить геометрию структур, созданную в фоторезисте, в сверхпроводниковую тонкопленочную структуру с туннельными барьерными слоями. После закупки, монтажа и запуска в эксплуатацию установки реактивного плазмохимического травления будет проведена калибровка режимов травления с использованием методов RIE /PE и ICP.

б) Установка контактной ультрафиолетовой литографии с разрешением 0,6 мкм; установка будет использоваться для изготовления многослойных интегральных структур и приемных элементов субмикронных размеров. Установка представляет собой систему совмещения и экспонирования с использованием металлизированного фотошаблона для перенесения изображения с маски на пластину с фоторезистом. Она позволяет многократно производить экспозицию и изготовление образцов по уже отработанной технологии и топологии с высоким разрешением. Это особенно ценно для выполнения серийных заказов и изготовления больших партий образцов для стороннего заказчика. Использование этой установки в режиме вакуумного контакта позволит изготавливать матрицы приемных элементов с малым разбросом параметров по подложке и от цикла к циклу. После запуска в эксплуатацию установки контактной ультрафиолетовой литографии будет проведена отработка методики и режимов контактной ультрафиолетовой литографии с разрешением 0,6 мкм.

в) Установка безмасковой лазерной фотолитографии; эта система не требует предварительного изготовления фотошаблона и позволяет оперативно производить экспонирование с минимальным размером элемента 0.6 мкм со скоростью засветки от 10 мм^2 до 25 мкм^2 в минуту. Это особенно важно при отработке технологии новых структур, когда требуется оперативно изменить размеры структур, или дозы экспозиции в разных участках пластины. Наличие обзорной камеры позволяет легко и быстро находить метки совмещения на подложке и производить совмещение с точностью не хуже 0.5 мкм. Штатный автофокус обеспечивает точную фокусировку по всей площади пластины. Отсутствие механического контакта с фотошаблоном позволяет избежать искажений, связанных с наличием бортика фоторезиста на краях пластины после нанесения на центрифуге.

Дооснащение и модернизация УНУ по ряду параметров улучшит предельные характеристики оборудования до значений лучших существующих в мире установок. Существенная модернизация и расширение состава УНУ «Криоинтеграл» позволит изготавливать туннельные приемные структуры субмикронных размеров для работы в области терагерцовых частот. Закупка современных систем ультрафиолетовой литографии и плазмохимического травления позволит формировать элементы субмикронных размеров в трехслойной туннельной структуре с высокой плотностью тока.

Улучшение существующих параметров УНУ создаст условия для реализации устройств с параметрами лучше мировых аналогов. Будут разработаны, изготовлены и апробированы приемные элементы диапазона 211-275 ГГЦ с двухполосной шумовой температурой менее 20 К, что лишь в 1.5 раза превышает квартовый предел hf/k_B и существенно ниже лучших известных к настоящему времени результатов. Будут созданы приемные структуры для ряда наземных радиотелескопов, в том числе для китайской терагерцовой обсерватории в Антарктиде (Dome A) и для приемника Champ II + (обсерватория APEX, Атакама, Чили) с рабочими частотами до 950 ГГц. Выполнение намеченного цикла исследований позволит изготавливать требуемые туннельные переходы в интересах как минимум 15 пользователей и создавать приемники, предназначенные как для космической и наземной радиоастрономии, так и для систем двойного назначения.

Возросший технологический потенциал модернизированной УНУ будет способствовать увеличению возможностей по научному взаимодействию на национальном и мировом уровне и, соответственно, увеличению загрузки УНУ «Криоинтеграл». Будет проведен комплекс технических и административных мероприятий, который не только расширит технологические возможности УНУ и повысит ее востребованность, но и обеспечит доступность УНУ для проведения НИР и экспериментальных разработок, в том числе в интересах третьих лиц. В портфеле УНУ уже имеется ряд меморандумов и соглашений с российскими и зарубежными организациями; планируется заключить ряд новых договоров и соглашений с зарубежными партнерами.

Для повышения технологических возможностей и востребованности УНУ будет разработан ряд новых процессов и методик, направленных на получение сверхпроводниковых наноструктур и приемных устройств на их основе, обеспечивающих задачи космической и наземной радиоастрономии. По результатам этих работ будет получено не менее 10 РИД (изобретения и полезные модели, ноу-хау, и т.д.). Коэффициент загрузки УНУ составит не менее 88%; при этом не менее 20% времени оборудование УНУ будет работать в интересах третьих лиц.

Развитие технологии изготовления туннельных структур субмикронных размеров с высокой плотностью тока и разработка сверхпроводниковых элементов с уникальным набором параметров обеспечит технологическую независимость России при разработке ряда новых научных программ, в том числе в области квантовых технологий и квантовых измерений, а также для создания систем медицинской и промышленной диагностики, дистанционного контроля экологического состояния атмосферы, систем двойного назначения. Апробация сверхпроводниковых элементов и устройств даст возможность перейти к созданию в России новых видов научно-технической продукции для научных исследований (мониторинг экологического состояния атмосферы Земли, спектроскопия) и ряда практических приложений (медицинская диагностика, промышленная неразрушающая диагностика, системы безопасности). Результаты этих исследований будут использованы также при разработке интегральных сверхпроводниковых интерфейсных устройств, а также джозефсоновских параметрических усилителей с квантовой чувствительностью устройств для систем считывания состояний кубитов в квантовых вычислениях.