

На правах рукописи

ФИЛИППЕНКО Людмила Викторовна

**ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНЫЕ
СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ
ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА - 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кошелец В.П.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Рязанов В.В.,
кандидат физико-математических наук,
Гудков А.Л.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного
университета (НИИЯФ МГУ).

Защита состоится 6 марта 2009 г. в 12 час. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 002.231.03 при ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Автореферат разослан 5 февраля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.



М.И. Перцовский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Туннельные переходы сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) являются основными элементами большинства устройств сверхпроводниковой электроники. Однако, отсутствие технологии, позволяющей изготавливать туннельные СИС переходы с воспроизводимыми параметрами и выдерживающими многократные термоциклирования, долгое время препятствовало практическому использованию СИС переходов и структур на их основе. В начале 80-х годов началось исследование СИС переходов на основе тугоплавких материалов, что сделало возможным широкое применение таких структур для приемки и обработки сигналов малой мощности.

СИС структуры на основе нелинейной зависимости тока квазичастиц от напряжения являются наиболее перспективными элементами для создания высокочувствительных приемных устройств для радиоастрономических наблюдений. Приемники на основе туннельных СИС переходов обладают самой низкой шумовой температурой в диапазоне 100 – 1000 ГГц. Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными природой элементов и криогенной рабочей температурой. Для реализации предельных параметров СИС приемников требуются туннельные переходы с высокой плотностью тока, низкими токами утечки и малым размытием щелевого напряжения, изготовленные целиком из тугоплавких материалов. Для согласования таких переходов с внешней электродинамической системой необходимо использовать переходы субмикронных размеров.

В ИРЭ РАН была предложена концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП). На одной микросхеме размещаются приемная антенна, квантовый СИС смеситель на квазичастичной нелинейности туннельного перехода и сверхпроводниковый генератор гетеродина (ФФО). Интегральные приемники крайне перспективны для радиоастрономии, мониторинга окружающей среды, осуществляемого с борта спутников или специальных самолетов, а также медицинской диагностики и систем безопасности. Первым практическим применением СИП является проект TELIS, направленный на изучение распределения примесных газов в атмосфере с борта аэростата. Поэтому весьма актуальной стала задача создания технологии изготовления многослойных СВЧ микросхем, объединяющих различные сверхпроводниковые элементы в единое устройство.

СИС переходы также весьма перспективны для детектирования рентгеновского и мягкого гамма-излучения, так как потенциально они обладают более высоким энергетическим разрешением по сравнению с лучшими полупроводниковыми детекторами и уже используются для рентгенофлюоресцентного анализа в материаловедении, в астрономии и других приложениях. Рекордные характеристики таких устройств связаны с существенно большим числом носителей тока (квазичастиц), возникающих в сверхпроводнике при поглощении кванта излучения по сравнению с традиционными полупроводниковыми детекторами. Однако, для реализации высокого энергетического разрешения необходимы туннельные переходы с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки.

Для реализации предельных параметров СИС приемников и их продвижения в область терагерцовых частот необходимы туннельные переходы, площадь которых существенно меньше 1 мкм^2 . Это требует разработки принципиально новых методов формирования таких структур и оптимизации режимов их изготовления. Кроме того, для большинства перспективных применений нужны сложные многоэлементные микросхемы с малым разбросом параметров и воспроизводимыми характеристиками.

Все вышесказанное позволяет сформулировать основные задачи данной работы.

Цель диссертационной работы.

- Создание надежной технологии изготовления СИС переходов Nb/Al-AlO_x/Nb микронных размеров на различных типах подложек, с характеристиками, оптимизированными для реализации предельных параметров сверхчувствительных приемных устройств миллиметрового диапазона длин волн. Исследование влияния различных технологических параметров на качество переходов.

- Разработка технологии изготовления СИС переходов субмикронного размера и многослойных СВЧ микросхем на их основе. Реализация новой концепции интегрального приемника, объединяющей в одной микросхеме различные функциональные элементы: СИС смеситель с планарной антенной, распределенный джозефсоновский переход и элементы для их согласования. Разработка технологии и изготовление микросхем интегрального спектрометра на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN для международного проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата «TELIS».

- Исследование влияния различных материалов в многослойной структуре сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на их характеристики. Создание технологии изготовления сверхпроводящих туннельных

детекторов рентгеновского излучения с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию дополнительных слоев в структуре нижнего электрода.

- Разработка новых способов формирования СИС переходов субмикронных размеров и многоэлементных структур на их основе с использованием методов электронно-лучевой литографии и химико-механической полировки. Исследование влияния технологических подходов на характеристики и разброс параметров многоэлементных схем средней степени интеграции.

Научная новизна.

- Показана принципиальная возможность интеграции разнородных сверхпроводниковых элементов в единое устройство, изготавливаемое методами микроэлектроники. Предложены методы формирования сложных многоэлементных структур с разной плотностью туннельного тока на одной подложке.

- Предложена конструкция сверхпроводящего туннельного детектора рентгеновского излучения на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO_x/Al/Nb/NbN с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана. Показано, что использование подслоя из Ti не нарушает микроструктуру вышележащих слоев и дает возможность получать высококачественные переходы большой площади, а также ослабить более чем в 8 раз сигнал пассивного электрода по сравнению с сигналом активного.

Практическая значимость работы.

- Оптимизирована технология изготовления высококачественных туннельных переходов Nb/Al-AlO_x/Nb микронного размера, получены СИС переходы с отношением сопротивления под и над щелью (характеристика качества туннельного перехода) $R_j/R_n > 40$. Изготовлены приемные структуры для радиотелескопов Онсала (Onsala, Швеция) и Метсахови (Хельсинки, Финляндия) с шумовой температурой приемника 70 К на частоте 100 ГГц.

- Создана технология изготовления многослойных СВЧ микросхем на основе СИС переходов с плотностью тока до 10 кА/см^2 , размытием щелевой особенности $\delta V_g < 150 \text{ мкВ}$ и разбросом параметров по подложке менее 10 %. В рамках проекта Европейского космического агентства изготовлены микросхемы интегрального приемника, шумовая температура которого на частоте 500 ГГц составила 100 К.

- Разработана технология изготовления интегральных сверхпроводниковых СВЧ микросхем на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN. Изготовлены и исследованы

микросхемы спектрометра нового поколения, удовлетворяющие всем требованиям проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 500 – 650 ГГц (проект TELIS, выполняемый совместно с Институтом космических исследований Голландии). Для бортового интегрального приемника, созданного на основе изготовленных автором микросхем, реализована шумовая температура менее 120 К (DSB) и спектральное разрешение лучше 1 МГц.

- Проведен цикл исследований по оптимизации состава электродов многослойной туннельной структуры для детекторов рентгеновского излучения. Экспериментально показано, что для многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO_x/Al/Nb/NbN возможно подавление отклика нижнего электрода благодаря действию слоя-ловушки из титана. Найдены условия формирования подслоя из Ti, при которых не происходит нарушение микроструктуры вышележащих слоев. Изготовлены переходы с параметром качества $R_j (V=0.5 \text{ mV})/R_n > 10\,000$ (при $T = 1.3 \text{ K}$), что позволило реализовать в НИИЯФ МГУ для детектора площадью 6400 мкм^2 энергетическое разрешение 78 эВ (при вкладе электронных шумов 50 эВ).

- Разработаны и реализованы новые подходы к формированию СИС переходов субмикронных размеров; с помощью методов электроннолучевой литографии и химико-механической полировки изготовлены и измерены туннельные переходы с площадью 0.03 мкм^2 и параметром качества $R_j/R_n > 10$.

- Экспериментально продемонстрирована возможность изготовления многоэлементных схем средней степени интеграции на основе сверхпроводниковых туннельных переходов с числом элементов до 1000 с разбросом основных параметров, не превышающим 3.5 %.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на международных и российских конференциях: Applied Superconductivity Conference (ASC' 1988, 1990, 92, 94, 96, 98, 2000, 02, 04, 06), International Superconductive Electronics Conference (ISEC' 1991, 93, 95, 99, 2005, 2007), International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT' 1993, 95, 96, 97, 98, 99, 2000, 02, 03, 05, 07, 08), European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS' 1993, 97, 2003, 2005) и публиковались в ведущих специализированных изданиях: Physical Review Letters, Applied Physics Letters, Physical Review B, Physica B, Physica C, Superconductor Electronics, Superconductor Science and Technology, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, ЖТФ, «Радиотехника и электроника», «Приборы и техника эксперимента», «Известия ВУЗов. Радиофизика» и другие.

Вопросы авторства и публикация результатов

Всего по результатам работы подготовлено более 130 публикаций (статей и тезисов конференций), список основных публикаций приведен в конце автореферата. Эти публикации хорошо известны специалистам, на них имеются многочисленные ссылки в научной периодике. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание.

В работах [A1, A4, A5] автором проведены исследования по оптимизации технологии изготовления высококачественных туннельных переходов Nb/Al,AlO_x/Nb микронного размера. Найдены условия, при которых механические напряжения в пленках Nb минимальны и изготовлены СИС переходы с отношением сопротивления под и над щелью (характеристика качества туннельного перехода) $R_j/R_n > 40$. Найденные условия и режимы напыления использовались автором для изготовления туннельных переходов с плотностью тока до 10 кА/см^2 , размытием щелевой особенности $\delta V_g < 150 \text{ мкВ}$ и разбросом параметров по подложке порядка 10 % для различных сверхпроводниковых устройств (приемников, СКВИДов и цифровых схем) [A2, A3, A6-A17]. Это позволило создать ряд практических устройств, в частности серию малошумящих приемников, успешно используемых на радиотелескопах Онсала (Onsala, Швеция) и Метсахови (Хельсинки, Финляндия) [A48].

Созданная и оптимизированная автором технология изготовления СИС переходов субмикронного размера и многослойных СВЧ микросхем на их основе описана в работах [A33, A6]; в работах по созданию приемных устройств на базе этих микросхем (в том числе микросхем спектрометра нового поколения для международного проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата) [A18 – A33, A34, A36, A38, A39, A43, A45, A46, A50, A51, A54-A58] автором проведено изготовление и предварительное тестирование микросхем интегрального приемника.

В работах [A41, 42] автор принимал участие в оптимизации технологии и изготовлении экспериментальных образцов.

В работах [A37, A40, A44, A47, A49, A52] автором предложена и апробирована новая технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO_x/Al/Nb/NbN с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана. В работе [A35] автором были разработаны и проверены новые методы формирования СИС переходов субмикронных размеров с помощью методов электроннолучевой литографии и химико-механической полировки.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем работы составляет 220 страниц. Она содержит 52 рисунка, 8 таблиц и список цитируемой литературы из 98 работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В предисловии обоснован выбор темы диссертации, сформулированы ее цели и описана структура диссертации.

Глава 1 носит обзорный характер. В ней дано описание физических процессов, лежащих в основе эффекта Джозефсона. Приведены основные фундаментальные соотношения, характеризующие эффект Джозефсона в сверхпроводниковых туннельных переходах и структурах со слабой связью, а также дается классификация переходов по типам слабых связей, лежащих в их основе. Подробно описаны переходы сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС переходы), которые являются основным элементом сверхпроводниковой электроники и являются главным объектом исследования данной диссертационной работы. Дается краткий обзор развития технологии изготовления СИС переходов. Рассматриваются различные устройства сверхпроводниковой электроники на основе СИС переходов.

В зависимости от области применения СИС переходов существуют разные требования к их параметрам и характеристикам. Так для устройств на квазичастичной нелинейности основными являются малость размытия щели δV_g и малые токи утечки ниже щели ($\sim 1/R_j$). Для систем, использующих джозефсоновскую зависимость сверхтока от разности фаз, нужны переходы с безгистерезисной характеристикой ($\beta \approx 1$). Однако для всех применений существуют общие требования – это возможность изготовления переходов с заданными и контролируемыми параметрами, стабильность при многократных термоциклированиях от комнатной температуры до температуры гелия, хорошая воспроизводимость и малый разброс параметров на подложке, что особенно важно для многоэлементных структур. В ИРЭ РАН в течение ряда лет проводятся исследования по разработке и созданию интегральных сверхпроводниковых элементов и устройств на их основе. Для успешного проведения таких исследований требовалось разработать отечественную технологию изготовления сверхпроводниковых структур, что и явилось основной целью диссертационной работы.

Глава 2 посвящена описанию технологического маршрута изготовления СИС переходов на основе Nb/Al-AlO_x/Nb. Детально рассмотрены ключевые этапы формирования СИС переходов: фотолитография, напыление пленок, анодизация, реактивно-ионное травление; приводятся основные режимы изготовления.

В разделе 2.1 дается подробное сравнительное описание технологии изготовления СИС переходов методами селективной анодизации ниобия (SNAP) и методом селективного плазмо-химического травления ниобия (SNEAP). Приводятся основные слои и режимы изготовления СИС переходов этими двумя методами.

В разделе 2.2 описываются основные технологические операции, используемые в процессе изготовления туннельных переходов. К ним относятся: фотолитографический процесс; напыление тонких пленок металлов и диэлектриков dc и rf магнетронным распылением; формирование изоляционных слоев методом электролитического анодирования; а также процессы сухого травления различных материалов методом плазмо-химического травления RIE (Reactive_Ion Etching).

В разделе 2.3 обсуждаются особенности технологического оборудования, необходимого для изготовления высококачественных переходов с воспроизводимыми и контролируемыми параметрами. Дается описание экспериментальных установок, используемых в процессе изготовления структур на основе туннельных переходов.

В разделе 2.4 приводятся основные электрофизические параметры СИС переходов, измеряемые автоматизированной системой измерения. Для практического применения требуется изготовление туннельных переходов с заданными электрофизическими параметрами, определение большинства из которых возможно по их вольт-амперным характеристикам. К основным параметрам, определяющим качество СИС переходов и перспективность их дальнейшего использования, можно отнести: A – площадь перехода, R_n – сопротивление в нормальном состоянии, $R_n A$ – удельное сопротивление перехода, характеризующее прозрачность туннельного барьера; R_j/R_n – отношение сопротивления утечки к нормальному сопротивлению, характеризует качество перехода; V_g – напряжение, при котором возникает щелевая особенность; δV_g – величина размытия щелевого напряжения (см. рис. 1).

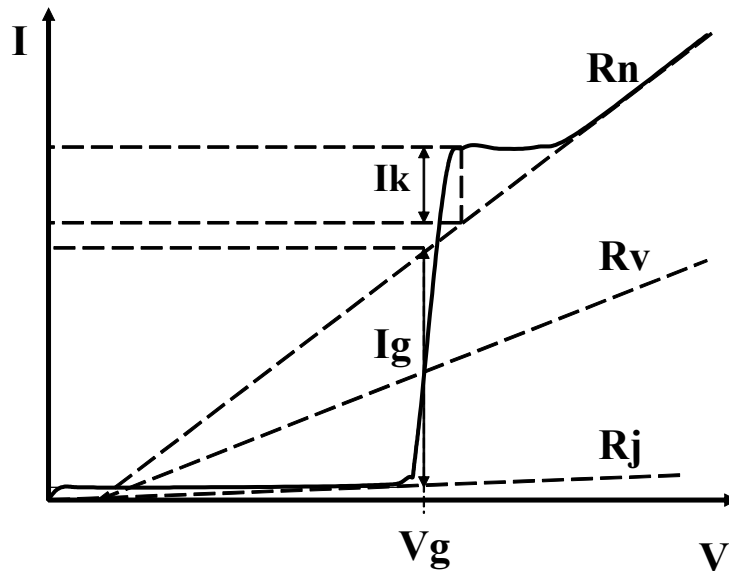


Рис. 1. Определение основных параметров СИС перехода

Глава 3 посвящена разработке технологии изготовления СИС смесителей для радиоастрономических наблюдений. Представлены результаты оптимизации напыления тонких пленок ниобия. Обсуждаются особенности изготовления СИС переходов на кварцевых подложках.

В разделе 3.1 обсуждаются основные требования, предъявляемые к параметрам смесительных СИС переходов. Подложка, на которой располагается структура, должна иметь хорошую теплопроводность, низкие диэлектрические потери, и геометрию, препятствующую возбуждению резонансов в своем объеме. Материалом для таких подложек может служить монокристаллический кварц ($\varepsilon \approx 4$). Еще одним требованием к смесительному элементу является ограничение паразитного тока утечки в рабочей точке при напряжении $V_0 = V_g - hf/2e$. Ток утечки должен быть мал, то есть R_j должно быть значительно больше R_n .

В разделе 3.2 приводятся результаты проведенной оптимизации технологии изготовления СИС переходов для СВЧ применения. Явление внутреннего напряжения в пленках электродов является одной из причин снижения качества переходов. Релаксация напряжения происходит при формировании геометрии слоев Nb и приводит к разрушению туннельного барьера и образованию микрозакоротов. Величина внутреннего напряжения в пленке Nb определяется параметрами напыления – давлением аргона и скоростью напыления. Были найдены условия напыления пленок с нулевым напряжением: давление $1 \cdot 10^{-2}$ мбар, $v = 2$ нм/сек. Приведены результаты исследования зависимости основных параметров переходов R_j/R_n и характерного напряжения $V_m = R(2mV) \cdot I_c$ от

давления аргона при напылении электродов для мощности $P = 300$ Вт. Морфология поверхности пленки Nb влияет на слой Al, покрывающий нижний электрод. Диффузия Al на поверхности границы пленок Al/Nb увеличивается с увеличением шероховатости Nb нижнего электрода, что приводит к микрозакороткам и увеличению тока утечки переходов. Пленка Nb, напыленная при оптимизированных условиях, исследовалась на AFM микроскопе. Шероховатость пленки составляет 2.9 nm. Обсуждается проблема теплоотвода при изготовлении переходов на кварцевых подложках и предлагаются пути решения этой проблемы. Для решения проблемы теплоотвода при изготовлении переходов на кварцевых подложках, мы закрепляли подложки на водоохлаждаемом медном держателе с помощью специальной рамки. Теплопередача между подложкой и держателем дополнительно увеличивалась за счет вакуумной смазки. Перед напылением туннельного барьера выдерживалась пауза в течение 5 - 10 минут, необходимая для охлаждения предварительно осажденной пленки Nb. ВАХ СИС перехода, изготовленного в оптимальных условиях, представлена на рис. 2.

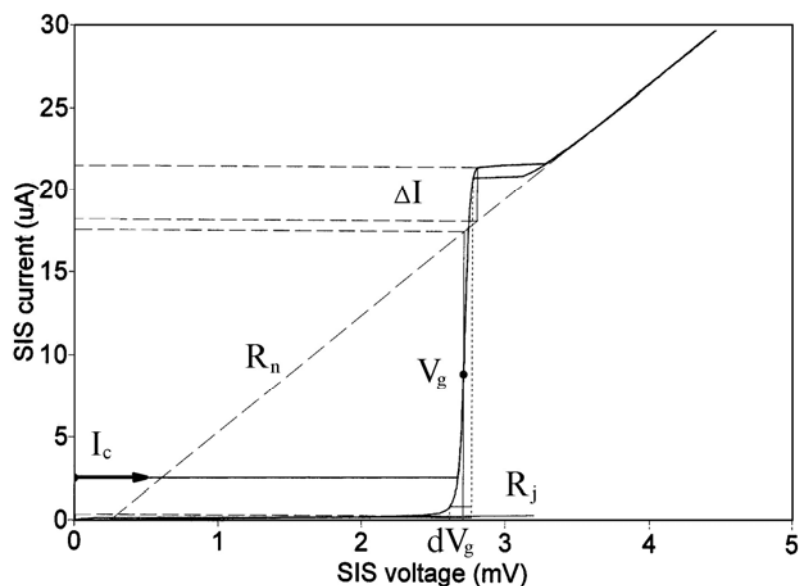


Рис. 2. ВАХ СИС перехода, изготовленного в оптимальных условиях. Площадь перехода 3.7 мкм^2 , параметр качества (отношение сопротивлений R_j/R_n) > 40 ; критический ток частично подавлен.

В разделе 3.3 исследуются СИС структуры для волноводных смесителей мм диапазона длин волн. Недостатком СИС смесителей на одиночных переходах является их малый динамический диапазон. Эту проблему удастся решить, используя цепочку из N СИС переходов. Принцип последовательно-параллельного включения СИС переходов был экспериментально исследован в смесителях волноводного типа на мм волнах в диапазонах частот 40 - 180 ГГц. На основе оптимизированных систем СИС переходов

автором был создан ряд практических малошумящих приемников для радиоастрономии, которые были успешно испытаны на радиотелескопах обсерватории Онсала (Швеция) и Метсахови (Финляндия).

В разделе 3.4 детально описывается разработанная автором технология изготовления СИС структур на кварцевых подложках для СВЧ применения. Особенностью данной технологии является напыление дополнительных слоев Nb, позволяющих применять резистивную маску с нависающим профилем на прозрачных кварцевых подложках.

В разделе 3.5 представлены конструкция и результаты экспериментального исследования изготовленного автором квазиоптического приемника на основе СИС переходов. На частоте 106 ГГц была получена шумовая температура приемника 31 К.

Глава 4 посвящена разработке технологии изготовления микросхем сверхпроводникового интегрального приемника (СИП). Представлены результаты оптимизации изготовления СИС переходов субмикронного размера. Описана технология изготовления микросхем СИП на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN, объединяющая структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

В разделе 4.1 рассматривается предложенная в нашей лаборатории концепция полностью сверхпроводникового интегрального приемника субмм волн, где в одной микросхеме соединены СИС смеситель с приемной антенной и криогенный генератор гетеродина на основе распределенного туннельного перехода, работающего в режиме вязкого течения джозефсоновских вихрей (ФФО).

В разделе 4.2 подробно описана разработанная автором технология изготовления микросхем интегрального приемника со смесителем на одиночном СИС переходе площадью 1-2 мкм² и $j_c=5\div 8$ кА/см². Для формирования СИС переходов микронных размеров использовались два метода – традиционный и методом «крестом». Представлены результаты проведенной оптимизации профиля пленки Nb микрополосковой линии настроечного элемента СИС смесителя (шириной 1-3 мкм), способной одновременно обеспечить согласование по СВЧ с малыми потерями, а также выдержать критический ток вплоть до 150 мА, необходимый для полного подавления эффекта Джозефсона.

В разделе 4.3 описана конструкция СИП с балансным СИС смесителем. Представлены результаты экспериментального исследования такого приемника, изготовленного в рамках разработанной технологии. Была реализована шумовая температура приемника менее 100 К на частоте 500 ГГц.

В разделе 4.4 приведены примеры практического применения микросхем СИП. Девятиэлементный матричный приемника на центральную частоту 500 ГГц, каждый пиксель которого представлен независимой сверхпроводниковой приемной микросхемой, содержащей внутренний источник гетеродина, демонстрирует надежность разработанного технологического процесса.

В разделе 4.5 описана конструкция интегрального сверхпроводникового спектрометра для международного проекта TELIS, объединяющий на одной микросхеме СИС смеситель, планарную сверхпроводниковую антенну, сверхпроводниковый генератор на потоке джозефсоновских вихрей (ФФО), использующийся в качестве гетеродина, и гармонический смеситель (ГС) для стабилизации частоты этого генератора (рис. 2). Приводится описание технологии изготовления микросхем с параметрами: $j_c = 5 \div 8 \text{ kA/cm}^2$, площади переходов СИС смесителя- 0.8 мкм^2 , ГС - 1.0 мкм^2 и ФФО – 6400 мкм^2 . Точность совмещения слоев менее 0.5 мкм , разброс по толщинам слоев $< 10\%$. Фото центральной части микросхемы СИП показаны на рис. 3.

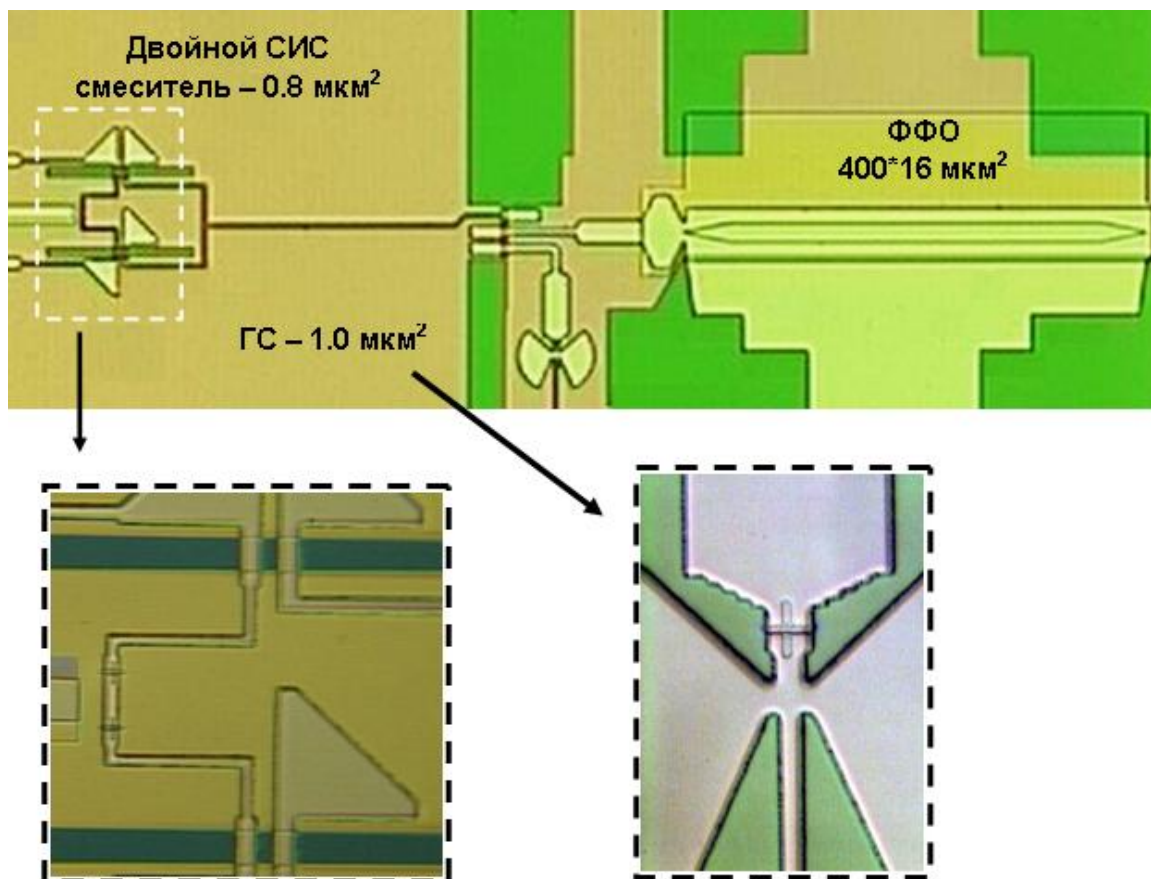


Рис. 3. Микрофотография центральной части микросхемы СИП (размер $1.5 \times 1 \text{ мм}$), где представлены основные элементы интегрального приемника. На увеличенных фрагментах показаны смеситель с двумя СИС переходами и гармонический смеситель (ГС).

Формирование туннельных переходов субмикронных размеров является одной из ключевых задач при изготовлении микросхем сверхпроводникового интегрального приемника. СИС переходы должны быть высокого качества, не менять свои характеристики при многократных термоциклированиях, обладать хорошей воспроизводимостью и малым разбросом параметром по подложке. Важным требованием при изготовлении микросхем СИП оказалась итоговая площадь переходов, так как даже изменение площадей на 0.1-0.2 мкм приводит к значительному сдвигу рабочей частоты. Была проведена оптимизация условий формирования резистивной маски субмикронных размеров методами оптической литографии, а также исследование процесса реактивно-ионного травления; найдены оптимальные условия анизотропного травления пленки Nb с минимальным и контролируемым подтравом. Были проведены исследования зависимости скорости травления Nb при разных мощностях (30, 50 и 100 Вт) от давления газов CF_4 , SF_6 и смеси газов $CF_4 + 3\%O_2$ (см. рис. 4).

В разделе 4.6 представлены экспериментальные результаты изготовленных микросхем СИП на основе структуры Nb/Al-AlN/NbN с настроечными элементами из Nb ($j_c = 5 \div 8 \text{ kA/cm}^2$, $R_j/R_n > 30$). В таблице приведены режимы напыления при изготовлении микросхемы сверхпроводникового интегрального приемника для проекта TELIS. ВАХ СИС перехода на основе такой структуры демонстрирует, что ФФФ обеспечивает достаточную мощность для накачки СИС смесителя в диапазоне 350-700 ГГц.

Таблица 1. Основные слои и режимы напыления при изготовлении микросхемы сверхпроводникового интегрального приемника для проекта TELIS на основе туннельных переходов Nb/Al-AlOx/Nb.

| Материал | Назначение | Толщина (нм) | Параметры напыления |
|-----------------------------------|---------------------|--------------|---|
| Al ₂ O ₃ | буферный слой | 100 | Ar, 7.1×10^{-3} мбар, 598 Вт, 0.17 нм/с |
| Nb | нижний электрод | 200 | Ar, 9.2×10^{-3} мбар, 510 Вт, 2 нм/с |
| Al/Al _x O _y | туннельный барьер | 7/1 | Ar, 6.0×10^{-3} мбар, 78 Вт, 0.2 нм/с, O ₂ , 2.0×10^{-2} , 20 мин |
| Nb | верхний электрод | 80 | Ar, 9.5×10^{-3} мбар, 510 Вт, 2 нм/с |
| Nb ₂ O ₅ | анодная изоляция | 14-18 | 7.5-10 В |
| SiO ₂ | изоляция-1 | 200 | Ar, 6.0×10^{-3} мбар, 410 Вт, 0.27 нм/с |
| Nb ₂ O ₅ | анодная изоляция | 14-18 | 7.5-10 В |
| SiO ₂ | изоляция-2 | 200 | Ar, 6.0×10^{-3} мбар, 410 Вт, 0.27 нм/с |
| Nb | замыкатель | 600-650 | Ar, 9.5×10^{-3} мбар, 510 Вт, 2 нм/с |
| Al/Au | контактные площадки | 10/100 | Ar, 1.5×10^{-2} мбар, 700 В, 0.1 нм/с Ar, 6.0×10^{-3} мбар, 0.17 нм/с |

В разделе 4.7 описана разработанная технология изготовления микросхем СИП, объединяющая на одном чипе структуры с разными плотностями тока, что необходимо для оптимальной работы СИП.

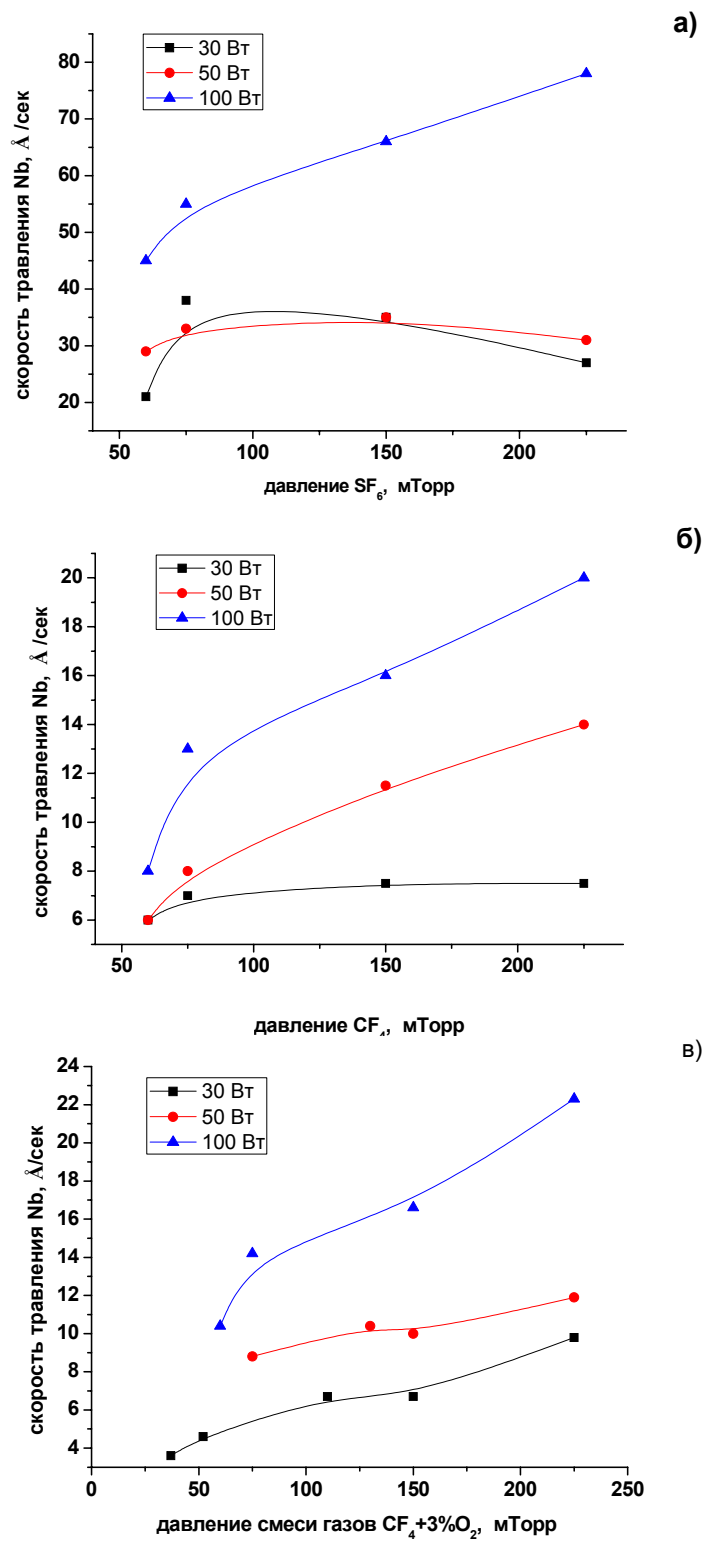


Рис. 4. Зависимости скорости травления Nb от давления газа SF₆ (а), CF₄ (б) и смеси газов CF₄+3% O₂ (в).

Глава 5 посвящена исследованию детекторов рентгеновского излучения на основе туннельных переходов. Предложена конструкция и оптимизирована технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlO_x/Al/Nb/NbN.

В разделе 5.1 рассматриваются общие требования, предъявляемые к разработке и изготовлению детекторов на основе СИС переходов (СТП-детекторы), такие как: материал, площадь и толщина электродов; прозрачность туннельного барьера. Обсуждается влияние этих параметров на качество СТП-детекторов с точки зрения эффективности поглощения рентгеновских квантов.

В разделе 5.2 описана микросхема СТП-детектора, содержащая пять туннельных детекторов с площадями от 400 мкм² до 20000 мкм². Детекторы имели в плане форму ромба, магнитное поле прикладывалось вдоль его диагонали.

В разделе 5.3 представлены результаты исследования СТП-детекторов с разными многослойными структурами нижнего и верхнего электродов. Для улучшения условий туннелирования квазичастиц вблизи туннельного барьера напылялся подслои Al толщиной 10-30 нм. Свойства этого слоя определялись эффектом близости с прилегающим слоем Nb. Для ослабления потерь квазичастиц на внешней поверхности верхнего электрода наносился дополнительный слой из NbN. Для создания ловушек для захвата квазичастиц в пассивных электродах использовались слои из Al или Ti, которые наносились на внешние поверхности электродов (в частности, в нижнем электроде со стороны подложки). Наиболее перспективной оказалась предложенная автором структура Ti/Nb/Al-AlO_x/Al/Nb/NbN, где в качестве слоя ловушки используется титан ($T_c=0,4$ К). Описана разработанная технология изготовления СТП-детекторов на основе такой структуры, где главное внимание было уделено обеспечению малых токов утечки переходов. Именно с этой точки зрения, варьировалась методика приготовления СТП, подбирались толщины близостных слоев, а также прозрачность туннельного барьера.

В разделе 5.4 представлены вольт-амперные характеристики изготовленных СТП-детекторов. Предварительные тестирования при 4.2 К позволяли оценить качество переходов, давали возможность вносить корректировки в технологический процесс. Идентичность ВАХ для 80% туннельных переходов, расположенных на одном чипе, свидетельствует о достаточно высоком уровне разработанной технологии. Представлены экспериментальные результаты исследования СТП-детекторов при 1.3 К, демонстрирующие, что подслои из Ti не нарушают микроструктуру вышележащих слоев и дает возможность получать высококачественные переходы большой площади с параметром качества $R_j (V=0.5 \text{ mV})/R_n > 10\,000$ (при $T = 1.3$ К).

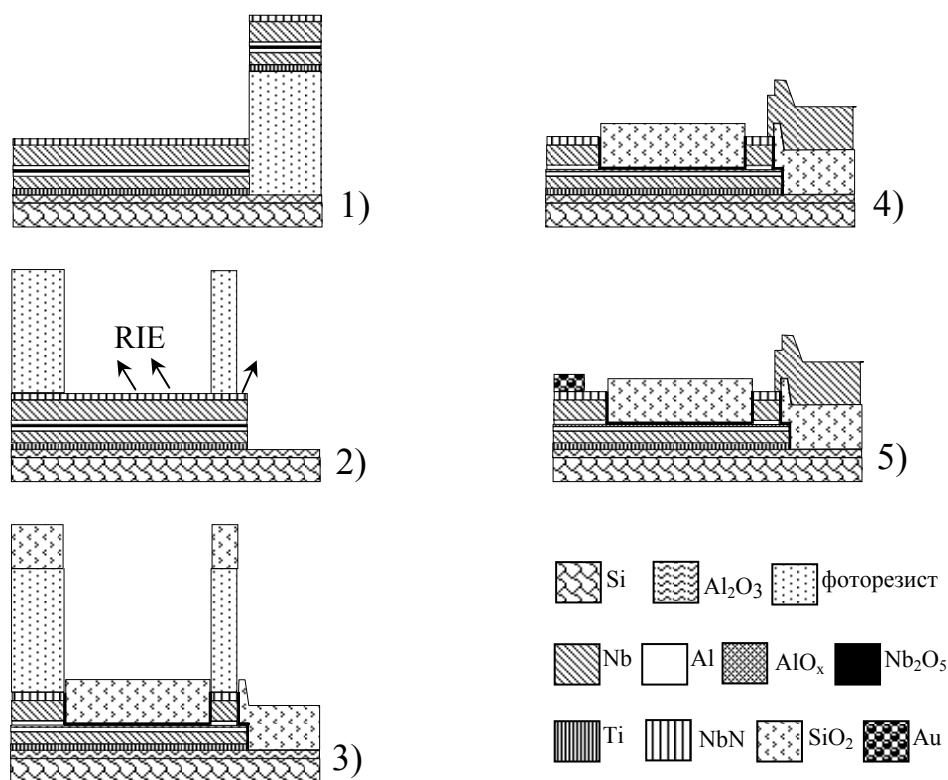


Рис. 5. Этапы изготовления СТП-детекторов:

- 1) осаждение структуры Ti/Nb/Al, -AlO_x/Al/Nb/NbN на маску из фоторезиста;
- 2) формирование геометрии перехода методом RIE;
- 3) анодирование и напыление слоя изоляции SiO₂;
- 4) напыление Nb токопровода к верхнему электроду;
- 5) формирование Au контактных площадок.

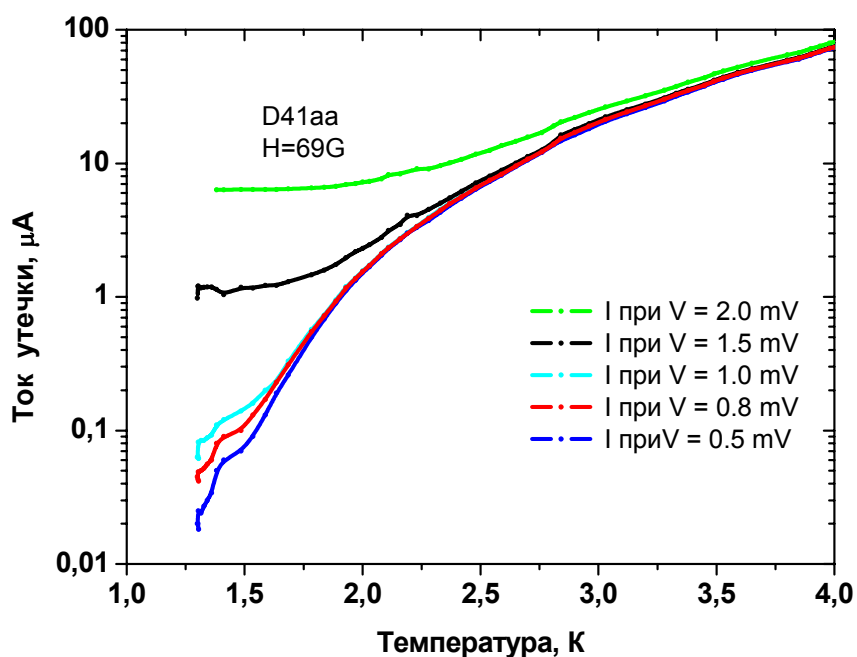


Рис. 6. Зависимость тока утечки СТП-детекторов Ti/Nb/Al-AlO_x/Al/Nb/NbN от температуры, измеренные при различных напряжениях.

Таблица 2. Режимы изготовления структуры Ti/Nb/Al,AlO_x/Al/Nb/NbN

| Наименование слоя | Материал | Параметры напыления | Толщина, нм |
|-------------------------------|--------------------------------|---|-------------|
| Буферный слой | Al ₂ O ₃ | Ar 1×10^{-2} mbar; RF Power 240 W; $v=0.15$ nm /sec | 100 |
| Многослойный нижний электрод | Ti | Ar 6.0×10^{-3} mbar; RF Power 598 W, DC-Pot: 265 V; $v=0.37$ nm /sec | 30 |
| | Nb | Ar 9.0×10^{-3} mbar, DC Power 510 W, $v=2$ nm /sec | 150 |
| | Al | Ar 6.4×10^{-3} mbar, DC Power 78 W, $v=0.2$ nm /sec | 8 |
| Туннельный барьер | AlO _x | O ₂ $6 - 8 \times 10^{-1}$ mbar; 30 min | |
| Многослойный верхний электрод | Al | Ar 6.4×10^{-3} mbar, DC Power 78 W, $v=0.2$ nm /sec | 10 - 13 |
| | Nb | Ar 9.0×10^{-3} mbar, DC Power 510 W, $v=2$ nm /sec | 200 |
| | NbN | Ar+N ₂ 9.8×10^{-3} mbar; DC Power 510 W; $v=1.2$ nm /sec | 30 |
| Слой изоляции | Nb ₂ O ₅ | 20-25 V | |
| Слой изоляции | SiO ₂ | Ar 6.1×10^{-3} mbar; RF Power 417 W, DC pot. 882 V; $v=2.7$ nm /sec | 300 |
| Замыкатель | Nb | Ar 9.0×10^{-3} mbar, DC Power 510 W, $v=2$ nm /sec | 500 |
| Контактные площадки | Au | Ar: 6×10^{-3} mbar; 700 V $v=1.7$ nm /sec | 100 |

Глава 6 посвящена новым методам формирования СИС переходов субмикронного размера с помощью химико-механической полировки (CMP) и электронно-лучевой литографии.

В разделе 6.1 рассматривается концепция метода CMP при изготовлении СИС переходов субмикронных размеров, являющейся ключевой задачей для получения предельных параметров квантовых смесителей в терагерцовой области частот (особенно при использовании переходов с высокой плотностью тока и, следовательно, малым удельным сопротивлением). Приводится описание установки CMP, которая использовалась в исследованиях.

В разделе 6.2 приводится разработанная технология изготовления СИС переходов субмикронного размера с помощью методов CMP и электронно-лучевой литографии, которая основана на двухэтапном проведении процесса химико-механической полировки. Представлены вольт-амперные характеристики СИС переходов на основе структуры Nb/Al-AlN/Nb с площадью вплоть до 0.03 мкм^2 , плотностью тока до 20 кА/см^2 и $R_j/R_n > 10$, изготовленные с помощью такой технологии. Приведенные результаты, свидетельствуют, что с помощью комбинации методов электронно-лучевой литографии, плазмохимического травления и химико-механической полировки возможно изготовление высококачественных туннельных переходов субмикронных размеров.

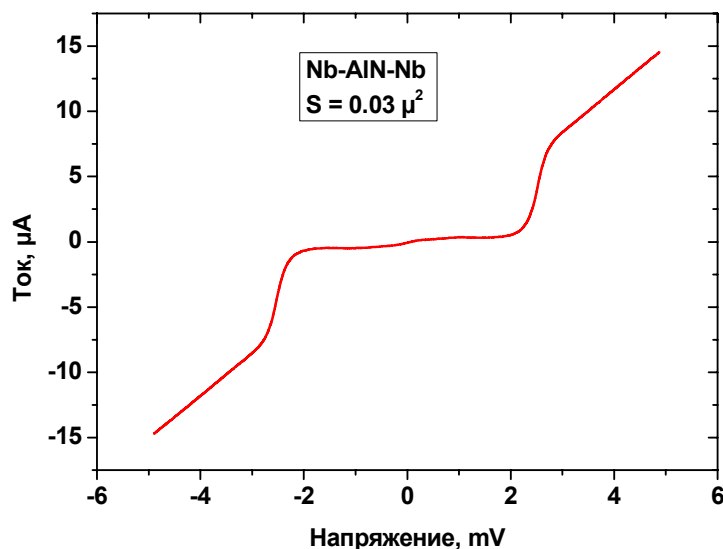


Рис. 7. ВАХ Nb-AlN-Nb перехода, изготовленного методами СМР и электронно-лучевой литографии: $A=0.03 \mu\text{m}^2$, $R_n \cdot A = 10 \Omega \mu\text{m}^2$, $R_j/R_n = 14$.

В разделе 6.3 исследуются способы формирования многоэлементных схем, моделью для которых служили цепочки джозефсоновских переходов, представляющие собой микросхему многих (вплоть до 10^4) последовательно-параллельных включенных СИС переходов и элементов электромагнитной связи. Описаны два технологических процесса изготовления цепочек, различающиеся способом формирования слоя изоляции трехслойной структуры. В одном из этих процессов изоляция формировалась с помощью метода СМР, что необходимо для изготовления цепочек, содержащих переходы субмикронных размеров. Другой метод основан на традиционной технологии SNEAP. Приводятся вольт-амперные характеристики изготовленных цепочек, содержащих 10, 100 и 1000 СИС переходов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Проведено исследование по оптимизации технологии изготовления высококачественных туннельных переходов Nb/Al-AlO_x/Nb микронного размера. Найдены условия, при которых механические напряжения в пленках Nb минимальны; изготовлены СИС переходы с отношением сопротивления под и над щелью (характеристика качества туннельного перехода) $R_j/R_n > 40$. Использование изготовленных автором приемных структур позволило получить шумовую температуру приемника 70 К на частоте 100 ГГц. Разработана технология изготовления СИС переходов на кварцевых подложках для использования их в волноводных смесителях, что позволило создать серию малозумящих приемников, успешно используемых на радиотелескопах Онсала (Onsala, Швеция) и Метсахови (Хельсинки, Финляндия).

2. Создана технология изготовления СИС переходов субмикронного размера для многослойных СВЧ микросхем, работающих в диапазоне частот 100-700 ГГц. Данная технология позволяет получать СИС переходы с плотностью тока до 10 кА/см^2 ,

размытием щелевой особенности $\delta V_g < 150$ мкВ и разбросом параметров по подложке порядка 10 %. Впервые изготовлена микросхема сверхпроводникового интегрального приемника (СИП), объединяющая в себе СИС смеситель с квазиоптической антенной и сверхпроводящий генератор на потоке джозефсоновских вихрей, шумовая температура которого на частоте 480 - 520 ГГц составила 100 К. Разработана технология изготовления микросхем интегрального приемника, позволяющая объединять структуры с разными плотностями тока на одном чипе.

3. Разработана технология изготовления интегральных сверхпроводниковых СВЧ микросхем на основе туннельных переходов Nb/Al-AlN/NbN. Микросхема сверхпроводникового интегрального спектрометра субмиллиметровых волн представляет собой однокристалльную СВЧ микросхему СИП, в которую для фазовой синхронизации частоты гетеродина включен гармонический смеситель. Были изготовлены и исследованы микросхемы спектрометра нового поколения, удовлетворяющие всем требованиям проекта по дистанционному исследованию атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 500 – 650 ГГц (проект TELIS, выполняемый совместно с Институтом космических исследований Голландии). Для бортового интегрального приемника реализована шумовая температура менее 120 К (DSB), полоса ПЧ 4 – 8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. Первый тестовый полет проведен в июне 2008 г. на полигоне Терезина в Бразилии.

4. Предложена конструкция и оптимизирована технология изготовления сверхпроводящих туннельных детекторов рентгеновского излучения на основе многослойной структуры Ti/Nb/Al-AlOx/Al/Nb/NbN с одним активным электродом, в которых отклик другого подавлен благодаря действию слоя-ловушки из титана. Показано, что использование подслоя из Ti не нарушает микроструктуру вышележащих слоев и дает возможность получать высококачественные переходы большой площади с параметром качества $R_j (V=0.5 \text{ mV})/R_n > 10\,000$ (при $T = 1.3$ К). Наилучшее энергетическое разрешение, измеренное в НИИЯФ МГУ для детектора площадью 6400 мкм^2 , составило 78 эВ при вкладе электронных шумов 50 эВ. Сигнал пассивного электрода в 8 раз меньше сигнала активного электрода.

5. Разработаны новые методы формирования СИС переходов субмикронных размеров и многоэлементных структур на их основе. С помощью методов электроннолучевой литографии и химико-механической полировки изготовлены и измерены туннельные переходы с площадью перехода вплоть до 0.03 мкм^2 и $R_j/R_n > 10$. Исследованы способы формирования многоэлементных схем средней степени интеграции с числом элементов до 1000. Показано, что с помощью разработанного автором технологического процесса возможно изготовление цепочек туннельных переходов с разбросом основных параметров не превышающих 2% для $n = 100$ и 3.5% для $n = 1000$.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

[A1] Ermakov An. B., Koshelets V.P., Serpuchenko I.L., Filippenko L.V., Shitov S.V., Vystavkin A.N. SNAP structures with Nb-AlO_x-Nb junctions for MM wave receivers // IEEE Trans on Magn. 1989. V. MAG-25, No. 2. P. 1060 - 1063.

[A2] Журавлев Ю.Е., Кошелец В.П., Матлашов А.Н., Серпученко И.Л., Филиппенко Л.В. Интегральный ПТ-СКВИД с предусилителем на основе дополнительного ПТ-СКВИДа. // ЖТФ.-1990. Т. 60, В. 9.

[A3] Filippenko L.V., Kaplunenko V.K., Khabipov M.I., Koshelets V.P., Likharev K.K., Mukhanov O.A., Rylov S.V., Semenov V.K., Vystavkin A.N. Experimental Implementation of Analog - to - Digital Converter Based on Reversible Ripple Counter. // IEEE Trans on Magn., V. MAG-27, No.2, pp. 2464 - 2467, (1991).

[A4] Koshelets V.P., Kovtonyuk S.A., Serpuchenko I.L., Filippenko L.V., Shchukin A.V. High Quality Nb-AlO_x-Nb Tunnel Junctions for microwave and SFQ Logic Devices // IEEE Trans on Magn., V. MAG-27, No.2, pp. 3141 - 3144, (1991).

[A5] А.Б. Ермаков, С.А. Ковтонюк, В.П. Кошелец, И.Л. Серпученко, Л.В. Филиппенко, А.В. Щукин. Высококачественные переходы Nb-AlO_x-Nb для СВЧ приемных и цифровых одноквантовых устройств. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника, т. 4, № 10, стр. 2034-2042, (1991).

[A6] Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V. Superconducting Millimeter wave Oscillators // ICEC/ICMC, Report EC-D3, Kiev-92, 1992.// Cryogenics, V.32, pp. 501-504, (1992).

[A7] В.Ю. Белицкий, М.А. Тарасов, С.А. Ковтонюк, Л.В. Филиппенко. Малошумящий квазиоптический приемник на основе туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник // Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», том 37, стр. 1311-1315, (1992).

[A8] Belitsky V.Y., Tarasov M.A., Kovtonjuk S.A., Filippenko L.V., Kaplunenko O.V. Low Noise Completely Quasioptical SIS Receiver for Radioastronomy at 115 GHz // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves, v. 13, 4, pp. 389-395, (1992).

[A9] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Fisher G. M., Mygind J. Josephson tunnel junction attenuator // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63, No. 23. P. 3218-3220.

[A10] Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V., Fisher G. M., Mygind J. Integrated flux-flow oscillators for submillimeter wave receivers // Presented at Low Temperature Conference LT-20, Eugene, Oregon, USA, August (1993), Physica B, V. 194-196, pp. 81-82, (1994).

[A11] Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V. Superconducting millimeter wave oscillators and SIS mixers integrated on a chip // IEEE Trans. on Appl. Supercond. V. 3, No. 1. P. 2524-2527, (1993).

[A12] Belitsky V.Yu., Jacobsson S.V., Filippenko L.V., Kovtonjuk S.A., Koshelets V.P., Kollberg E.L. 0.5 THz SIS Receiver with Twin Junctions Tuning Circuit // Proc. 4th Space Terahertz Technology Conference, p.538, March 30 – April 1, Los Angeles, USA, (1993).

[A13] М.А. Тарасов, Г.В. Прокопенко, С.В. Якобссон, В.П. Кошелец, С.А. Ковтонюк, К.Н. Холмстедт, Л.В. Филиппенко, И.Л. Серпученко, С.В. Шитов, А.Н. Выставкин, Э.Л. Колберг. Преобразование на джозефсоновской нелинейности и шумы в СИС смесителе на 500 ГГц // Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», № 12, стр. 2090-2102, (1994).

[A14] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.M. Baryshev, I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko, H. van de Stadt, J. Mess, H. Schaeffer, T. de Graauw. Integrated Sub-MM Wave Receivers // presented on ASC-94, Boston, USA, report ER-3, (1994). IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, pp. 3057-3060,(1995).

[A15] М.А. Тарасов, Г.В. Прокопенко, В.П. Кошелец, И.Л. Лапитская, Л.В. Филиппенко. Integrated rf Amplifier Based on dc SQUID // presented on ASC-94, Boston, USA, report EUA-5, (1994). IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, pp. 3226-3229 (June 1995).

[A16] V.Yu. Belitsky, S.W. Jacobsson, L.V. Filippenko, C. Holmstedt, V.P. Koshelets, E. Kollberg. Fourier Transform Spectrometer Studies (300-1000 GHz) of Nb-Based Quasi-Optical SIS Detectors // IEEE Trans on Appl Supercond., Vol. 5, No. 3, pp. 3445-33451 (September 1995).

[A17] Belitsky V. Yu., Filippenko L.V., Jacobsson S.W., Kollberg E.L. Broad Band Twin Junction Tuning Circuit for Submillimeter SIS Mixer // Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 10, N.2, pp. 74-78, October5, (1995).

[A18] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Golstein H., Graauw de T., Luinge W., Schaeffer H., Stadt, van de H. First implementation of a superconducting integrated receiver at 450 GHz // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68 (9). P. 1273-1275.

[A19] Shitov S.V., Koshelets V.P., Baryshev A.M., Filippenko L.V., Graauw, de Th., Gao J.-R., Luinge W., Stadt, van de H., Whyborn N. D., Lehtikoinen P. Development of a superconducting integrated receiver for application in imaging arrays // Proc. of 7th Symposium on Space Terahertz Technology. Charlottesville, Univ. of Virginia, March 1996. P. 417-425.

[A20] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Mygind J. Linewidth of submillimeter wave flux flow oscillators // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 699-701.

[A21] М.А. Тарасов, З.Г. Иванов, Л.В. Филиппенко, А.Н. Выставкин. Механизм подавления шумов в сверхпроводниковом квантовом интерференционном усилителе. //

Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», том 41, № 11, с. 1398-1405, 1996

[A22] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., and Mygind J. Linewidth of frequency locked flux flow oscillators for sub-mm wave receivers // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. V. 7. P. 2905-2908.

[A23] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Luinge W., Golstein H., Stadt, van de H., Gao J.R., Graauw, de Th. An integrated 500 GHz receiver with superconducting local oscillator // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. V. 7. P. 3589-3592.

[A24] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Mygind J., Ustinov A.V. Self-pumping effects and radiation linewidth of Josephson flux-flow oscillators // Phys. Rev. B. 1997. V. 56, No. 9. P. 5572-5577.

[A25] N. Martucciello, J. Mygind, V.P. Koshelets, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, R. Monaco. Fluxon Dynamics in Long Annular Josephson Tunnel Junctions // Phys. Rev. B, vol 57, No 9, pp. 5444-5449, (1998).

[A26] Shitov S.V., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Koshelets V.P., Baryshev A.M., Luinge W., Gao J.-R. Superconducting chip receivers for imaging application // IEEE Trans. Appl. Supercond, V. 9, P. 3773-3776, (1999).

[A27] Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Dmitriev P.N., Vaks V.L., Mygind J., Baryshev A.B., Luinge W., Golstein H. Flux-flow oscillators for sub-mm wave integrated receivers.// IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. V. 9. P. 4133-4136.

[A28] Baryshev A.M., Yulin A.V., Kurin V.V., Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Dmitriev P.N., Filippenko L.V. Cherenkov flux-flow oscillators: output power and linewidth // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 1999. V. 9, No. 2. P. 3737-3740.

[A29] J. Mygind, V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, W. Luinge, N. Whyborn. Phase Locking of 270-440 GHz Josephson Flux Flow Oscillators // Supercond. Sci. Technol, vol. 12, pp. 720-722, (1999).

[A30] A.M. Baryshev, A.V. Julin, V.V. Kurin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko. Forward and Backward Wave in Cherenkov Flux-Flow Oscillators // Supercond. Sci. Technol, vol. 12, pp. 967-969, (1999).

[A31] Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Vaks V.L., Mygind J., Baryshev A.B., Luinge W., Whyborn N. Phase locking of 270-440 GHz Josephson flux flow oscillator // Rev. of Sci. Instr. 2000. V. 71, No. 1. P. 289-293.

[A32] Shitov S.V., Koshelets V.P., Prokopenko G.V., Filippenko L.V., Ermakov A.B., Shtanyuk A.M., Levitchev M., Kohlstedt H., Veretennikov A.V., Ustinov A.V. Integrated superconducting receiver as 400-600 GHz tester for coolable devices // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2001. V. 11, No. 1. P. 832-835.

[A33] Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N., Ermakov A.B., Koshelets V.P., and Gao J.R. Integrated superconducting receiver: fabrication and yield // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2001. V. 11, No. 1. P. 816-819.

[A34] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, V.V. Khodos, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind. Towards a Phase-Locked Superconducting Integrated Receiver: Prospects and Limitations // report ND-2 presented at SDP'2001, Tokyo, Japan, June 2001, *Physica C*, **367**, pp. 249 - 255, (2002).

[A35] P.N. Dmitriev, I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko, A.B. Ermakov, S.V. Shitov, G.V. Prokopenko, S.A. Kovtonyuk, and V.P. Koshelets. High Quality Nb-based Integrated Circuits for High Frequency and Digital Applications // Applied Superconductivity Conference ASC'2002, Houston, USA, August 2002, Report 1EH02, "*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*", vol. 13, No 2, pp. 107-110, June 2003.

[A36] S.V. Shitov, V.P. Koshelets, An.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, P.A. Yagoubov, W.-J. Vreeling, P.R. Wesselius, V.V. Khodos, V.L. Vaks. An Integrated Receiver with Phase-Locked Superconducting Oscillator // Applied Superconductivity Conference ASC'2002, Houston, USA, August 2002, Report 2ED03, "*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*", vol. 13, No 2, pp. 684-687, June 2003.

[A37] M.G. Kozin, I.L. Romashkina, S.A. Sergeev, L.V. Nefedov, V.A. Andrianov, V.N. Naumkin, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko. STJ X-ray Detectors with Titanium Sublayer // Proceedings of the 10-th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-10), Genoa, Italy, 2003; *Nuclear Instruments and methods in Physics Research*, A 520, pp 250-253, 2004.

[A38] В.П. Кошелец, С.В. Шитов, Л.В. Филиппенко, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, А.С. Соболев, М.Ю. Торгашин. Сверхпроводниковые интегральные приемники субмм волн // Известия ВУЗов «Радиофизика», том XLVI, № 8-9, стр. 687-701, (2003).

[A39] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, A.L. Pankratov, V.V. Kurin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen. Superconducting Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receiver // *Superconducting Science and Technology*, v. 17, pp. \$127-\$131, 2004.

[A40] M.G. Kozin, I.L. Romashkina, S.A. Sergeev, L.V. Nefedov, V.A. Andrianov, V.N. Naumkin, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko. STJ X-ray Detector with Titanium Sublayer // *Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. A* 520 (2004) 250-253

[A41] R. Russo, M. Cirillo, F. De Matteis, M. Casalboni, V. Merlo, P. Proposito, L.V. Filippenko, S. Schutzmann. Toward Optical and Superconducting Circuit Integration // *Supercond. Sci. Technol*, vol. 17, pp. S456 -S459, 2004.

[A42] N. Gronbech-Jensen, M.G. Castellano, F. Chiarello, G. Torrioli, M. Cirillo, L. Filippenko, R. Russo, and C. Cosmelli. Microwave-induced Thermal Escape in Josephson Junction // Phys. Rev. Lett., 93, 107002, 2004.

[A43] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, M. Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko. Superconducting Integrated Receiver for TELIS // Applied Superconductivity Conference ASC'2004, USA, October, 2004; Report 2ET06; "IEEE Trans. on Appl. Supercond.", vol. 15, pp. 960-963, 2005.

[A44] Козин М.Г., Ромашкина И.Л., Сергеев С.А., Нефедов Л.В., Андрианов В.А., Наумкин В.Н., Кошелец В.П., Филиппенко Л.В. Детектор рентгеновского излучения на сверхпроводящих туннельных переходах с пассивным электродом, содержащим титановый слой. // Известия РАН, серия физическая, том 69, №1, стр. 36-38 (2005)

[A45] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко. Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы. // Известия ВУЗов «Радиофизика», том XLVIII, № 10-11, стр. 947-954, 2005.

[A46] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V. Khudchenko, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R. W.M Hoogeveen, and W. Wild. Superconducting Submm Integrated Receiver with Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for TELIS // Abstract for the 16th International Symposium on Space Terahertz Technology, Sweden, May 2005, p. 108, Conference Proceedings ISSTT 2005, p.276-271.

[A47] V A Andrianov, L V Filippenko, V P Gorkov and V P Koshelets, "Recombination losses in STJ X-ray detectors with killed electrode", – presented at the 7th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS '05, September 2005, Vienna. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing Ltd, volume 43 (2006), p. 1311 - 1314.

[A48] В.Ф. Вдовин, А.И. Елисеев, И.И. Зинченко, И.В. Кузнецов, И.В. Лапкин, А.М. Штанюк, В.П. Кошелец, Л.В. Филиппенко, С.В. Шитов, О.М. Пилипенко, А. Муджунен, Е. Ойнаскаллио, Дж. Пелтонен, С. Урпо. Двухчастотный дуполяризаационный сверхпроводниковый приемник для радиоастрономических исследований в миллиметровом диапазоне волн. // Российская Академия Наук «Радиотехника и Электроника», т.50, №9, стр. 1207 -1211, 2005

[A49] V.A. Andrianov, L.V. Filippenko, V.P. Gorkov, V.P. Koshelets. Quasiparticle recombination in STJ X-rays detectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. A 559, pp. 683 – 685, 2006.

[A50] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild. Integrated Submillimeter Receiver for TELIS // presented at the Applied Superconductivity Conference

ASC-2006. Seattle, USA, August 2006, report 2EY01; “IEEE Trans. on Appl. Supercond.”, vol. 17, pp. 336-342, 2007.

[A51] M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, and P.A. Yagoubov. Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits // presented at the Applied Superconductivity Conference ASC-2006. Seattle, USA, August 2006, report 3EG08; “IEEE Trans. on Appl. Supercond.”, vol. 17, pp. 379-382, 2007.

[A52] Козин М.Г., Ромашкина И.Л., Сергеев С.А., Нефедов Л.В., Кошелец В.П., Филиппенко Л.В. Регистрация спектра излучения мессбауэровского источника ^{57}Co сверхпроводящим туннельным детектором. // Приборы и техника эксперимента, №6, стр. 135-139, 2006

[A53] В.А. Андрианов, В.П. Горьков, В.П. Кошелец, Л.В. Филиппенко. Сверхпроводящие туннельные детекторы рентгеновского излучения. Вопросы энергетического разрешения. // Физика и техника полупроводников, том 41, вып. 2, стр. 221–228, 2007.

[A54] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild. Integrated Submillimeter Receiver for TELIS // “IEEE Trans. on Appl. Supercond.”, vol. 17, pp. 336-342, 2007.

[A55] M.Yu. Torgashin, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko and P.A. Yagoubov. Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits // “IEEE Trans. on Appl. Supercond.”, vol. 17, pp.379- 382, 2007.

[A56] Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В., Ягубов П.А., “Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона длин волн для атмосферных исследований”, Известия ВУЗов «Радиофизика», Том 1, № 10–11, стр. 935-940, 2007.

[A57] Заявка № 2006 142 799 с приоритетом от 05.12.2006 «Криогенный генератор гетеродина на основе распределённого туннельного перехода для интегрального спектрометра субмм волн с системой ФАПЧ», авторы Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., Торгашин М.Ю. Решение о выдаче патента РФ от 01.11.2007.

[A58] Valery P. Koshelets, Andrey B. Ermakov, Pavel N. Dmitriev, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, “Phase-locked Local Oscillator for Superconducting Integrated Receiver”, presented at the *19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08)*, Groningen, the Netherlands, April 2008, report 7-5.