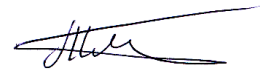


На правах рукописи



ТОРГАШИН Михаил Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ  
ГЕНЕРАТОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ  
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ**

Специальность 01.04.03: «Радиофизика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук.

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), г. Москва.

Научный руководитель **Кошелец Валерий Павлович**,  
доктор физико -математических наук,  
профессор

Официальные оппоненты: **Корнев Виктор Константинович**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры атомной физики,  
физики плазмы и микроэлектроники  
физического факультета Московского  
государственного университета имени  
М.В. Ломоносова

**Окунев Олег Валерьевич**,  
кандидат физико-математических наук,  
директор Учебно-научного радиофизического  
центра Гос. образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Московский педагогический государственный  
университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород)

Защита состоится «11» октября 2013 г. в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д.002.231.02 при ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д.11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автореферат разослан «10» сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



А.А. Потапов

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы**

Чувствительные приемники электромагнитного излучения, работающие в суб-терагерцовом частотном диапазоне (от 100 до 1000 ГГц), в настоящее время привлекают к себе большое внимание исследователей. Традиционные области применения таких приемников, такие как спектральная радиоастрономия и исследование атмосферы, дополнились целым рядом новых прикладных применений, включая медицинские спектрометры и системы безопасности. Полупроводниковые технологии активно входят в указанный диапазон: появляются сообщения о транзисторах, работающих на частотах в несколько сотен гигагерц, частотный диапазон усилителей достиг сотен гигагерц, появились полупроводниковые умножители с рабочими частотами выше 1 ТГц. Тем не менее, криогенные сверхпроводниковые смесители остаются пока самыми чувствительными приемными элементами в указанном диапазоне. Это обусловлено как крайне высокой нелинейностью вольт-амперных характеристик туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), позволяющей достигать высокой эффективности преобразования, так и низким уровнем собственных шумов, лишь немногим выше квантового предела для супергетеродинного приемника.

Одной из существенных проблем на пути внедрения сверхпроводниковых смесителей для спектральных измерений на высоких частотах является выбор оптимального гетеродина. В частности, генераторы на базе лампы обратной волны (ЛОВ), традиционно применявшиеся в качестве гетеродина в лабораториях и на радиотелескопах, обладают очень большой массой из-за необходимости использовать сильный постоянный магнит и высоковольтный источник питания. Это не является большой проблемой для систем наземного базирования, но для бортовых систем

(самолет, аэростат, спутник) вес и энергопотребление приборов являются критически важными параметрами. Многокаскадные полупроводниковые умножители, хотя и не так массивны, как ЛОВ, но обладают довольно небольшим диапазоном частотной перестройки. Диапазон регулирования частоты традиционных генераторов, работающих в диапазоне сотен ГГц, обычно не превышает 10-15% от центральной частоты.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была разработана и апробирована концепция квазиоптического интегрального сверхпроводникового приемника, в которой не только смеситель, но и гетеродин выполнены на основе туннельных джозефсоновских переходов, объединенных согласующими структурами между собой и с антенной, расположенной на той же кремниевой подложке. Конструктивно гетеродин представляет собой распределенный джозефсоновский переход (РДП), длина которого велика по сравнению с глубиной проникновения магнитного поля в контакт и шириной перехода. Внешнее магнитное поле проникает в переход в виде вихрей – областей вблизи туннельного барьера, каждая из которых ограничена незатухающими кольцевыми токами и «содержит» один квант магнитного потока равный  $2,07 \cdot 10^{-15}$  Вб. Под действием тока смещения, вихри двигаются вдоль перехода, генерируя на краю перехода излучение с частотой, однозначно связанной с напряжением на переходе соотношением Джозефсона.

Гетеродин на основе РДП обладает многими достоинствами – малые габариты, малый вес и энергопотребление, возможность объединить в одном технологическом процессе изготовление антенны, смесителя, и гетеродина. Кроме того, он является типичным представителем семейства генераторов, управляемых напряжением, что позволяет легко использовать системы стабилизации с фазовой автоподстройкой частоты. Генератор на основе РДП способен обеспечить диапазон перестройки частоты от 330 ГГц до 750 ГГц, что составляет 77% от центральной частоты (540 ГГц). Использование системы автоматической подстройки частоты генератора к высокой

гармонике стабильного опорного синтезатора позволяет избавиться от влияния низкочастотных шумов и наводок в режиме стабилизации частоты, а в режиме фазовой синхронизации позволяет использовать такой генератор в спектрометрах высокого разрешения. Недостатком же является присущая генератору сравнительно большая спектральная ширина автономной линии генерации, которая может достигать десятков мегагерц.

Практические задачи накладывают довольно жесткие ограничения на допустимые значения автономной ширины линии. В частности, для одного из частотных каналов атмосферного спектрометра TELIS («Terahertz and Submillimeter Limb Sounder» – аэростатный спектрометр наклонного зондирования атмосферы в диапазонах от 500 ГГц до 1800 ГГц), аппаратура для которого разрабатывалась Национальным институтом космических исследований Нидерландов при участии ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, ширина автономной линии гетеродина не должна была превышать 5-10 МГц в рабочей полосе 450-650 ГГц. Для разработанных ранее генераторов на основе переходов Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb такие параметры оказались практически недостижимыми из-за физических ограничений: на частотах в диапазоне 460-520 ГГц (что соответствует трети щелевого напряжения перехода) скачкообразно увеличивается поглощение собственной электромагнитной мощности внутри перехода, что приводит к резкому увеличению параметра электромагнитных потерь и появлению пика на графике зависимости ширины линии генерации РДП от частоты. Из-за этого в области 460-520 ГГц обеспечить требуемые параметры для переходов на основе Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb не удается – необходимо изменить конструкцию РДП.

Данная работа посвящена исследованию РДП генераторов с целью уменьшения автономной линии генерации согласно требованиям практических задач.

## **Цель работы**

Целями настоящей диссертационной работы являются:

- Разработка и исследование интегральных генераторов на основе распределенных джозефсоновских туннельных переходов, характеристики которых удовлетворяли бы требованиям, предъявляемым к гетеродинам для атмосферной спектрометрии (и радиоастрономии) в диапазоне 450 – 650 ГГц.
- Исследование влияния электрофизических и топологических параметров туннельных переходов на спектральные характеристики генерации применявшихся ранее РДП на основе структур Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb. Исследование пределов возможной оптимизации генераторов на таких переходах.
- Исследование новых типов распределенных генераторов на основе материалов с щелевым напряжением, отличным от ниобия, для расширения области применения РДП в качестве интегрального генератора гетеродина. Определение электрофизических параметров переходов нового типа и их спектральных характеристик в субтерагерцовом частотном диапазоне.

## **Научная новизна**

1. Впервые проведены систематические экспериментальные исследования зависимости спектральных характеристик генераторов на основе РДП от топологии и размеров джозефсоновского перехода.
2. Впервые разработаны интегральные схемы с гетеродином и смесителем на основе туннельных переходов Nb-AlN-NbN. Исследованы электрофизические свойства таких переходов.
3. Впервые продемонстрирована принципиальная возможность задания произвольной частоты генерации РДП в режиме ступеней Фиске.
4. Впервые продемонстрирована работа приемника с гетеродином на основе РДП в криогенной системе замкнутого цикла.

## **Практическая ценность работы**

1. Получены экспериментальные данные о зависимости ширины автономной линии генерации РДП от топологии контакта. Определены оптимальные параметры для практических применений.
2. Интегральные схемы на основе структуры Nb-AlN-NbN исследованы и в качестве основного приемного элемента канала 450-650 ГГц аэростатного инструмента TELIS.
3. Показано, что генератор на основе перехода Nb-AlN-NbN обладает более широким непрерывным диапазоном доступных частот, а также меньшей шириной автономной линии генерации по сравнению с генераторами на основе Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb. При этом технология изготовления интегральных схем не требует существенных изменений.
4. Созданы три криогенных измерительных стенда на базе вакуумных криостатов, в том числе один на базе крио-установки замкнутого цикла, предназначенный для исследования квазиоптического сверхпроводникового интегрального приемника.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Полуширина линии генерации распределенных джозефсоновских переходов на основе низкотемпературных сверхпроводников существенно образом зависит от топологии контакта. В частности, она существенно уменьшается с увеличением геометрической ширины области туннельного контакта. Оптимальное значение составляет от 14 до 20 мкм. При дальнейшем увеличении ширины спектральная характеристика РДП изменяется незначительно.

2. Показано, что разработанный и исследованный в работе РДП на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN, может быть использован в качестве гетеродина в частотном диапазоне 490-650 ГГц для спектрометра «TELIS». Продемонстрирована возможность сплошного покрытия заданного

частотного диапазона в режиме резонансных ступеней Фиске, реализован режим ФАПЧ. Спектрометр прошел успешные полетные испытания.

3. Продемонстрирована принципиальная возможность использования интегральных приемников с РДП в криосистеме замкнутого цикла. Реализован режим ФАПЧ РДП. Обнаружены ограничения, возникающие при работе с такой системой, вызванные колебаниями температуры. Показано, что для практического использования приемников с РДП в такой системе необходима активная температурная стабилизация или демпфирование температурных колебаний.

### **Вопросы авторства и публикация результатов**

В работе [A1] автором проведены экспериментальные исследования характеристик генераторов на основе распределенного перехода по постоянному току. Обнаружена нисходящая зависимость дифференциальных сопротивлений переходов от напряжения.

В работе [A2, A4, A6, A9] автором проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик излучения генераторов на основе распределенных переходов различных типов, а также исследования распределенных джозефсоновских генераторов по постоянному току, проведено моделирование и подготовка фотолитографических шаблонов тестовых схем.

В работах [A3, A5, A7, A8, A10, A11] автор принимал участие характеристики интегральных схем квазиоптического спектрометра диапазона 500 – 650 ГГц. Проведены исследования спектральных характеристик гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода и определена оптимальная конфигурация генератора. Проведены исследования согласующих структур гетеродина и смесительных элементов, спектральной чувствительности антенны, а также экспериментальные исследования диаграммы направленности интегральной линзовой антенны приемника и шумовой характеристики приемника в двухполосном режиме.



В публикациях, не входящих в перечень ВАК [A12-A40], автором внесен тот же вклад, что и в описанных выше журнальных публикациях.

### **Апробация работы**

Результаты исследований, проведенных соискателем, представлены в докладах на научных международных и российских конференциях, в том числе:

- International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2005, 2007)
- European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2005)
- International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT 2005, 2006, 2008)
- Applied Superconductivity Conference (ASC 2004, 2006)
- Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород (2005, 2007, 2009);
- International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010).
- Международная научная конференция «Прикладная сверхпроводимость» (2010, 2011)

### **Публикации**

Основные результаты проведённых исследований опубликованы в 40 работах, в том числе в 11 статьях в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в 27 докладах на международных и российских конференциях; результаты работы вошли в главу монографии, а также по результатам работ получен патент РФ на изобретение.

Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Superconducting Science and Technology, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, «Известия вузов. Радиофизика», Успехи современной микроэлектроники. Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее содержание; они известны специалистам, на них имеются ссылки в научной периодике.

Общий объём опубликованных по теме диссертации работ составил 78 мп. страниц.

### **Структура и объём работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка цитированной литературы. Работа содержит 140 страниц, 76 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 78 работ.

### **Основное содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и определены её цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту. Рассмотрены вопросы авторства в публикациях результатов.

**Первая глава** является обзорной. В ней приводится краткое описание существующих типов и принципов действия современных генераторов ТГц диапазона. Обсуждаются присущие им достоинства и недостатки, связанные с доступной мощностью излучения, частотной стабильностью, возможностью перестройки частоты и управления мощностью указанных генераторов.

Приводится краткая справка по типам джозефсоновских генераторов, с указанием на то, что данный тип генераторов в настоящий момент является единственно пригодным для интеграции в качестве гетеродина в составе микросхем приемных устройств ТГц диапазона, прошедшим экспериментальную апробацию.

Отдельный раздел посвящен генераторам на основе распределенных джозефсоновских переходов. Описываются их конструкция и принцип действия, приводится краткое описание технологии изготовления таких переходов методом селективного травления и анодизации ниобия (описанный технологический маршрут был разработан в ИРЭ им.

В.А. Котельникова РАН и использовался при изготовлении экспериментальных образцов). Отдельный раздел посвящен обзору теоретических моделей, описывающих эволюцию состояния распределенного джозефсоновского перехода во внешнем магнитном поле, электродинамические свойства РДП как планарного СВЧ волновода/резонатора, а также дисперсионные свойства распределенного перехода. Важной полуэмпирической моделью, исследованной в работе и описанной в первой главе, является зависимость ширины автономной линии генерации от дифференциального сопротивления РДП.

Приводится краткая историческая справка о развитии и применении РДП в практических устройствах, одним из которых является разработанный в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН сверхпроводниковый интегральный приемник. Кратко описывается международный проект TELIS (Terahertz and Submillimeter Limb Sounder), направленный на создание трехдиапазонного атмосферного спектрометра для высотного зондирования атмосферы, в котором принимал участие автор. Сформулированы основные задачи на основе требований, предъявленных к гетеродину. Основные результаты данной диссертационной работы получены в рамках выполнения указанного международного проекта.

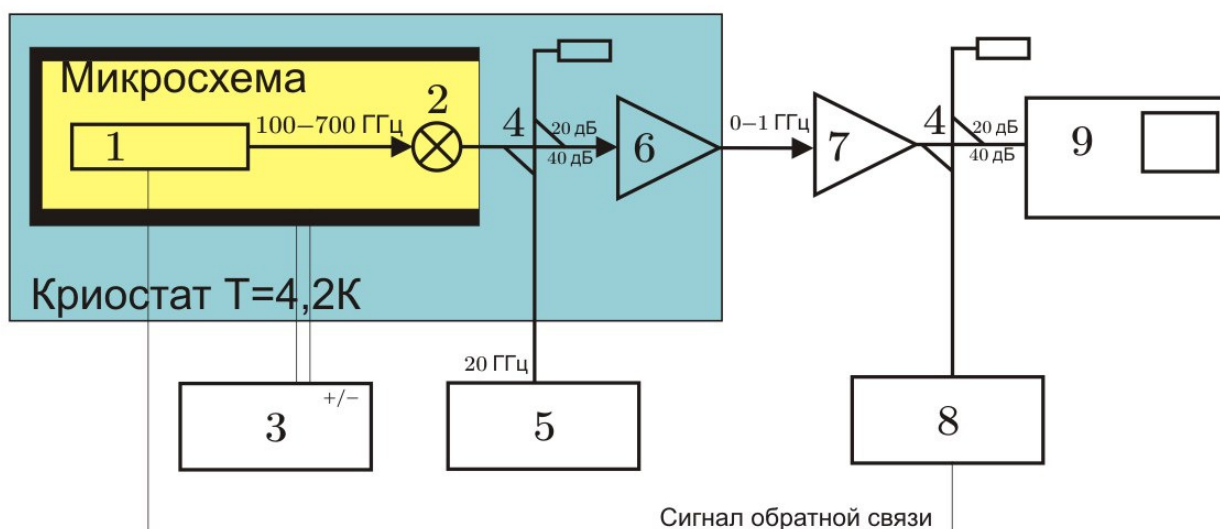
**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальных методик, используемых при исследовании джозефсоновских переходов.

В первом разделе описаны основные способы электрического подключения интегральных тестовых структур в криогенной системе. Рассмотрены применявшиеся в работе методы подключения с помощью пружинных проволочных контактов, мягких контактов с серебряной пастой, метод перевернутого кристалла (“flip-chip”) и ультразвуковой сварки. Указано, что для большинства экспериментальных задач пригодны простые методы подключения с помощью контактов из фосфорной бронзы либо заводских подпружиненных контактов. В критических приложениях или при малых размерах тестовых структур (минимальный размер контактных

площадок менее 0,3 мм) рекомендуется использовать ультразвуковую сварку («бондирование»).

Рассматриваются отличия четырехточечной и пятиточечной схем подключения образцов; схемы низкочастотных фильтров питания, разработанных и изготовленных для уменьшения наводок и защиты джозефсоновских переходов малой площади от электростатического пробоя при измерениях АЧХ входного тракта сверхпроводящего интегрального приемника для «TELIS». Проведенные исследования показали, что входной диапазон СИП соответствует целевому диапазону 500-650 ГГц проекта «TELIS».

Описана конструкция установки для исследования спектральных характеристик распределенных джозефсоновских переходов. Для этого использовался заливной гелиевый криостат, оснащенный несколькими коаксиальными вводами (рис. 1). Излучение с РДП (1) подается на гармонический СИС-смеситель (2), где смешивается с высокой гармоникой опорного синтезатора (5). Сигнал на разностной частоте (0-1 ГГц) через цепочку усилителей поступает на анализатор спектра (9).



- 1 – РДП, 2 – СИС-смеситель, 3 – источник тока, 4 - направленный ответвитель, 5 – опорный синтезатор 20 ГГц, 6 - охлаждаемый усилитель ПЧ, 7 – усилитель ПЧ, 8 - система ФАПЧ, 9 - анализатор спектра.

*Рисунок 1 - Блок-схема установки для исследования спектральной характеристики РДП.*

**Третья глава** посвящена исследованию зависимости спектральных характеристик распределенных джозефсоновских переходов на основе трехслойных структур Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb (щелевое напряжение  $V_g = 2,7$  мВ) от топологии и электрофизических характеристик контакта для достижения оптимальных параметров гетеродина сверхпроводникового интегрального приемника для спектрометра «TELIS». Первоначальный целевой частотный диапазон канала интегрального приемника составлял 600-650 ГГц, позднее, в ходе работы над проектом, он был пересмотрен в сторону понижения частоты с одновременным расширением полосы до 490-630 ГГц.

Описана конструкция исследованных экспериментальных образцов, а также общий вид вольт-амперных характеристик распределенных джозефсоновских переходов на основе Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb, а также характер зависимостей дифференциальных сопротивлений перехода от напряжения с учетом эффекта джозефсоновской самонакачки, которая приводит к значительному росту дифференциального сопротивления РДП при напряжениях выше трети щелевого напряжения,  $V_g/3$ .

Приводится детальное описание экспериментальной методики, применявшейся при исследовании спектральных свойств РДП различной конструкции.

Проведены исследования влияния длины и ширины распределенного джозефсоновского перехода на спектральную характеристику его излучения. Показано, что с ростом ширины перехода дифференциальное сопротивление и, соответственно, ширина линии излучения уменьшаются (рис. 2). При этом, несмотря на то, что для исследованной ширины переходов (от 5 до 28 мкм) минимум не был пройден, рекомендованная ширина переходов составляет 14-16 мкм. Это связано с тем, что с ростом ширины растут и токи питания, необходимые для задания рабочей точки РДП, что может приводить к перегреву образцов за счет выделения тепла в контактах (бондах) микросхемы.

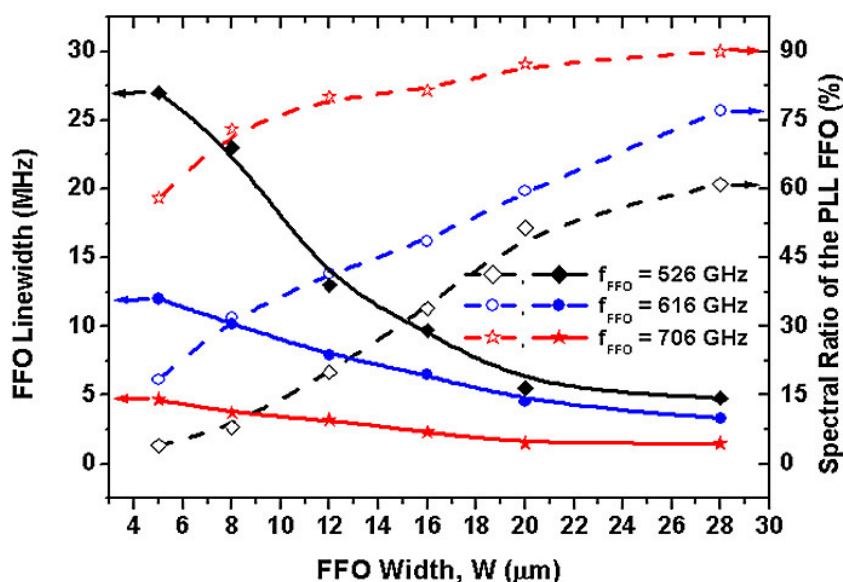


Рисунок 2 – Зависимость ширины линии генерации и спектрального качества РДП от ширины перехода.

Исследовано влияние прозрачности (толщины) туннельного барьера на спектральные характеристики РДП. Показано, что для переходов одинаковой топологии с ростом плотности критического тока ширина линии увеличивается, причем в диапазоне плотностей тока от 5,5 до 9 кА/см<sup>2</sup> зависимость прямо пропорциональная.

Проведено исследование переходов со «штырьевой» запиткой. Показано, что, вопреки ожиданиям, инжектирование тока питания через гребенчатый электрод приводит к ухудшению спектральных характеристик РДП и применение переходов с такой конфигурацией электродов нецелесообразно. В качестве причины указывается взаимодействие движущихся магнитных вихрей в переходе с пространственно модулированным током смещения и геометрическими неоднородностями в линии передачи в местах подсоединения электродов питания.

Исследовано влияние перекрытия сверхпроводящих электродов вблизи области туннельного контакта. Наличие зоны перекрытия существенно изменяет характеристики РДП. Обнаружено, что оптимальная величина перекрытия электродов составляет порядка 10 мкм. При этом при протекании над экраном выравнивается распределение тока смещения в подводящем электроде.

В выводах главы рекомендованы следующие параметры распределенных переходов, предназначенных для использования в качестве гетеродина для проекта «TELIS»: длина  $L = 400$  мкм, ширина  $W = 14-18$  мкм, плотность критического тока  $J_c = 5 - 7$  кА/см<sup>2</sup>, ширина области перекрытия электродов за границами туннельного перехода («idle region»)  $W_{idle} = 10$  мкм.

Показано, что использование распределенных джозефсоновских переходов на основе трехслойной структуры Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb в качестве гетеродина для проекта «TELIS» в диапазоне 500-550 ГГц невозможно из-за эффекта самонакачки. Этим обусловлена необходимость исследования переходов других типов.

**Четвёртая глава** посвящена исследованию характеристик распределенных джозефсоновских переходов на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN (щелевое напряжение  $V_g = 3,7$  мВ). Приведено обоснование выбора указанной трехслойной структуры, а также обоснование выбора нитрида ниобия в качестве альтернативы ниобию. Главными причинами являются большая величина энергетической щели в нитриде ниобия и технологическая совместимость нитрида ниобия с разработанными ранее процессами для производства интегральных микросхем.

Основной вопрос, на который необходимо было получить ответ в ходе проведенных исследований, заключался в возможности применения РДП такого типа в качестве гетеродина для атмосферного спектрометра «TELIS» в частотном диапазоне 490-650 ГГц.

Описываются особенности конструкции интегральных схем с новым типом генераторов: вследствие того, что поверхностные потери в нитриде ниобия выше, чем в ниобии, высокочастотные согласующие структуры и подводящие линии были выполнены из ниобия.

Вольт-амперная характеристика РДП на основе Nb-AlN-NbN имеет ряд отличий от полностью ниобиевых образцов. Важнейшей из них является то, что граничное напряжение самонакачки новых переходов увеличилось и

соответствует частоте примерно 630 ГГц. Это означает, что практически весь целевой спектральный диапазон «TELIS» 490 - 650 ГГц приходится на область резонансных ступеней Фиске.

Показано, что благодаря росту поверхностных потерь в электроде из нитрида ниобия, при длине перехода около 400 мкм (и более) ступени Фиске имеют достаточный наклон для задания произвольной частоты.

Проведены исследования зависимостей полуширины спектральной линии РДП от заданного тока смещения и напряжения на переходе (рис. 3). Показано, что ширина линии генерации РДП на основе Nb-AlN-NbN в диапазоне 450 - 625 ГГц составляет менее 4 МГц, что превосходит результат лучших образцов на основе ниобия. В диапазоне 625 – 650 ГГц ширина линии генерации значительно растет, однако работа в режиме ФАПЧ возможна во всем диапазоне, а высота пика зависимости ширины линии от частоты значительно ниже, чем для образцов на основе Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb.

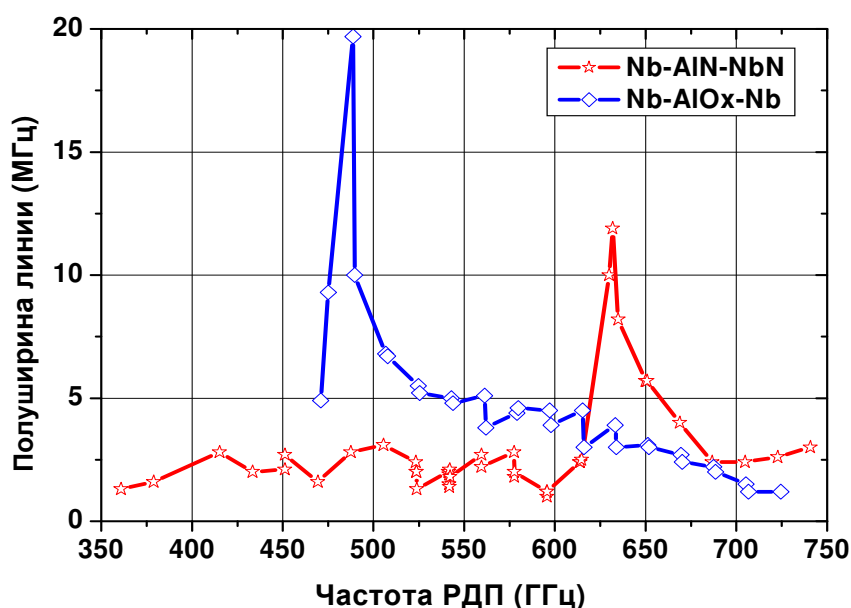


Рисунок 3 - Зависимость полуширины спектральной линии РДП от частоты для переходов на основе Nb-AlN-NbN и Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb.

Предложенный и исследованный тип распределенных джозефсоновских переходов был использован в качестве интегрального гетеродина для спектрометра «TELIS» в частотном диапазоне 490-630 ГГц.



Продемонстрирована возможность задания произвольной рабочей точки по частоте во всем диапазоне, в том числе в режиме резонансных ступеней Фиске. Продемонстрирован режим фазовой автоподстройки частоты во всем диапазоне. Исследована частотная зависимость полуширины спектральной линии и спектрального качества РДП на основе переходов Nb-AlN-NbN в частотном диапазоне 350 - 700 ГГц. В диапазоне 490-630 ГГц новый тип генераторов превзошел РДП на основе структур Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb (ширина автономной линии меньше в приведенном диапазоне).

**В пятой главе** описаны работы по созданию измерительного комплекса на основе криосистемы замкнутого цикла для сверхпроводникового интегрального приемника. Для большинства экспериментальных задач, связанных с исследованиями сверхпроводящих материалов и устройств на их основе, традиционно используются криогенные системы с жидкими хладагентами (жидкий азот,  $T = 77$  К, жидкий гелий  $T = 4,2$  К). Тем не менее, постоянно растет спектр приложений, в которых применяются серийные или специализированные системы охлаждения замкнутого цикла.

В качестве рефрижератора использовалась серийная криогенная система замкнутого цикла на импульсных трубках производства Cryomech Inc. (USA). Охлаждающая головка двухступенчатая, производительность второй ступени 0,5 Вт при 4.2 К, первой ступени - 25 Вт при 65 К. Компрессорный модуль системы оснащен водяным охлаждением, подключается к трехфазной электросети и в штатном режиме потребляет около 7 кВт.

Для данной системы при участии автора в ИПФ РАН разработан специализированный криостат с оптическим окном и высокочастотными вводами (рис. 4). В криостате установлена система НЧ-фильтров питания, аналогичная использованной в проекте «TELIS».

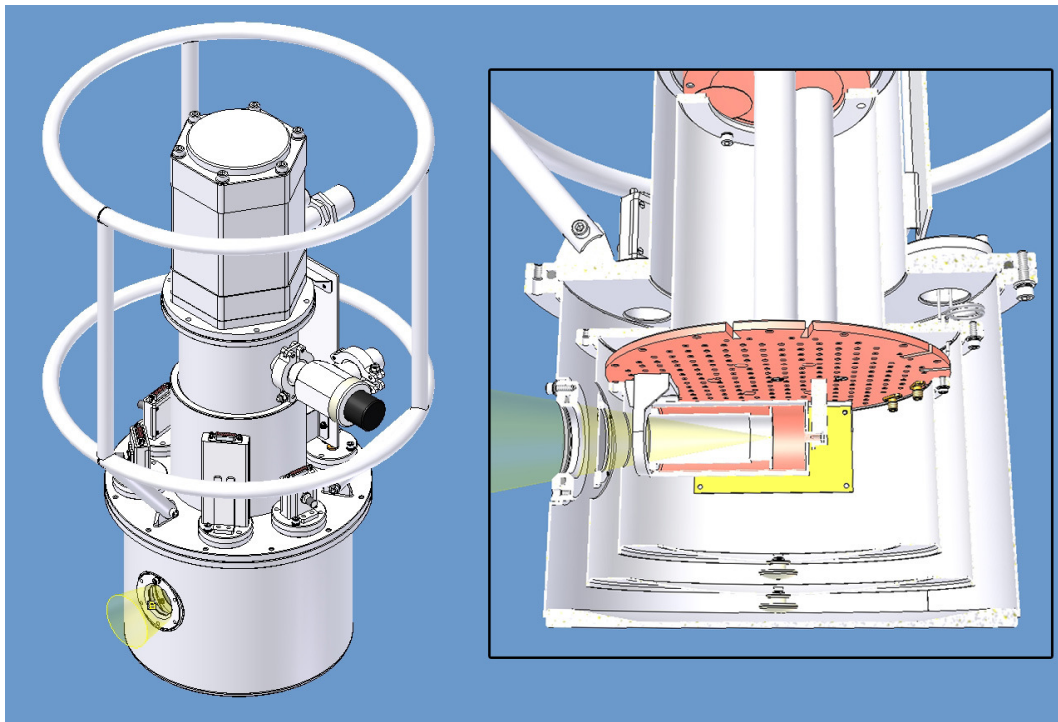


Рисунок 4 – Эскиз криостата для системы замкнутого цикла.

Полностью оснащенный криостат с установленным экспериментальным образцом, магнитным экраном и охлаждаемыми усилителями промежуточной частоты охлаждается до температуры жидкого гелия примерно за 3 часа.

Экспериментальные результаты показывают, что без использования дополнительных средств для стабилизации температуры, амплитуда колебаний температуры на рабочей пластине второй ступени составляет около  $\Delta T = 0.05 \text{ K}$ , частота колебаний  $f_{temp} = 1,4 \text{ Гц}$  совпадает с циклом работы компрессора. Температурный уход рабочей частоты генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода при этом может составлять от десятков до сотен мегагерц, в зависимости от рабочей точки РДП. В первом случае система ФАПЧ успешно справляется с задачей поддержания постоянной частоты РДП, при чем спектральное качество генератора не ухудшается по сравнению с традиционной криосистемой.

Тем не менее, в случае использования системы замкнутого цикла для охлаждения сверхпроводникового интегрального приемника (задачи спектроскопии) рекомендуется использовать криостат с активной системой поддержания температуры или системой реконденсации жидкого гелия.

## Основные результаты работы

1. Экспериментально исследована зависимость электрофизических и спектральных характеристик РДП от топологии туннельного контакта. Выявлена зависимость дифференциального сопротивления РДП от геометрической ширины перехода и размера области перекрытия электродов; определены оптимальные значения параметров, приводящие к существенному уменьшению ширины линии генерации РДП.

2. Исследован генератор на основе распределенного джозефсоновского перехода Nb-AlN-NbN с согласующими структурами из Nb, который позволяет расширить область применения генераторов на основе РДП в диапазоне 250-700 ГГц.

3. Экспериментально исследованы спектральные характеристики образцов РДП на основе туннельных структур Nb-AlN-NbN в диапазоне 250 – 700 ГГц. Ширина автономной линии генерации в диапазоне 250-700 ГГц составляет от 2 до 7 МГц, излучаемая мощность - около 0,5 мкВт. Форма спектральной линии определяется, как и в случае переходов Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb, широкополосными токовыми флуктуациями.

4. Проведено экспериментальное исследование спектральной чувствительности и диаграммы направленности интегральных линзовых антенн для серии образцов микросхем сверхпроводниковых приемников. Цель исследования: отбор микросхем для проекта TELIS (наклонное зондирование атмосферы, канал 490 - 630 ГГц).

5. Разработано несколько криогенных измерительных систем, в частности, криогенная система замкнутого цикла для сверхпроводникового интегрального приемника. Продемонстрирована возможность эксплуатации сверхпроводникового интегрального приемника с РДП в криосистеме замкнутого цикла. Обнаружены ограничения, возникающие при работе с такой системой. Предложены способы решения возникающих проблем.

## Публикации по теме диссертации

### Основные публикации по теме диссертации в журналах из перечня ВАК

- [A1]. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.R. Wesselius, P.A. Yagoubov, C. Mahaini, J. Mygind, “Externally Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receivers: Achievements and Limitations”, *“IEEE Trans. on Appl. Supercond.”*, vol. 13, No 2, pp.1035-1038, 2003
- [A2]. 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. S127-S131, 2004
- [A3]. 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”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 15, 2005
- [A4]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, V.V. Kurin, A.L. Pankratov, J. Mygind, “Optimization of the Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for the Submm Integrated Receiver”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 15, 2005
- [A5]. 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
- [A6]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V. Khudchenko, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, W.J. Vreeling, W. Wild, and O.M. Pylypenko, “Superconducting Submm Integrated Receiver for TELIS”, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, volume 43 (2006), p. 1377 – 1381
- [A7]. 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
- [A8]. **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
- [A9]. 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 L, № 10–11, стр. 935-940, 2007
- [A10]. Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., Киселев О.С., Кошелец В.П., Соболев А.С., **Торгашин М.Ю.**, Филиппенко Л.В., Худченко А.В., Arno de Lange, Gert de Lange, Pavel A. Yagoubov, «Сверхпроводниковый интегральный приёмник субмиллиметрового диапазона», *Успехи современной радиоэлектроники*, №5, 2010, с.75-81
- [A11]. Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey V. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Hans Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Bart van Kuik, Arno de Lange, Joris van Rantwijk, Alexander S. Sobolev, **Mikhail Yu. Torgashin**, Ed de Vries, Pavel A. Yagoubov, and Valery P. Koshelets, “Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder”, *Supercond. Sci. Technol.* vol. 23, No 4, 045016 , 2010

#### **Другие издания и доклады на конференциях**

- [A12]. V.P. Koshelets, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin** and J. Mygind, Глава 7 “Development and Applications of Josephson Flux-Flow Oscillators” в сборнике *Studies in High Temperature Superconductors*, v.50, ред. Anant Narlikar, с. 205-226, Nova Science Publishers, New York, 2006

- [A13]. Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., **Торгашин М.Ю.** "Криогенный генератор гетеродина на основе распределённого туннельного перехода для интегрального спектрометра субмм волн с системой ФАПЧ", Патент на изобретение № 22325003, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20.05.2008.
- [A14]. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, «Integrated Submillimeter and Terahertz Receivers with Superconducting Local Oscillator», presented at the 8<sup>th</sup> International Workshop "From Andreev Reflection to the International Space Station" Björkliden, Kiruna, Sweden, March 20-27, 2004.
- [A15]. 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, Oct. 2004
- [A16]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, V.V. Kurin, A.L. Pankratov, J. Mygind, "Optimization of the Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for the Submm Integrated Receiver", Applied Superconductivity Conference ASC'2004, USA, October, 2004.
- [A17]. В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, И.Л. Лапицкая, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, **М.Ю. Торгашин**, А.В. Худченко, «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы», Всероссийский семинар по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, Нижний Новгород, март, 2005.
- [A18]. 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"; *The 16th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Sweden, May 2005, Conference Proceedings ISSTT 2005, p. 276 – 271.
- [A19]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko,

- A.V. Khudchenko, O.V. Koryukin, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**.  
Development of the Flux-Flow Oscillators for Submm Integrated Receiver”  
Extended Abstract of the ISEC 2005, Sept. 2005, the Netherlands, p. PL-07.
- [A20]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin,  
A.V. Khudchenko, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R.W.M.  
Hoogeveen, W.J. Vreeling, W. Wild, and O.M. Pylypenko, “Superconducting  
Submm Integrated Receiver for TELIS” – Abstract for *the 7<sup>th</sup>* European  
Conference on Applied Superconductivity EUCAS '05, Report TH-P4-136,  
p.332; September 2005, Vienna. Journal of Physics: Conference Series, IOP  
Publishing Ltd, volume 43 (2006), p. 1377 – 1381.
- [A21]. V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov,  
L.V.Filippenko, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, I.L. Lapitskaya,  
A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R. W.M Hoogeveen,  
“Integrated Submillimeter Receiver for TELIS”, The Joint International  
Workshop "Nanosensors and Arrays of Quantum Dots and Josephson Junctions  
for space applications" combined with the 10th International Workshop "From  
Andreev Reflection to the Earliest Universe" Björkliden, Kiruna, Sweden, April  
1-9, 2006.
- [A22]. P. Yagoubov, R. Hoogeveen, **M. Torgashin**, A. Khudchenko,  
V. Koshelets, N. Suttiwong, G. Wagner, M. Birk, “550-650 GHz spectrometer  
development for TELIS”, *The 17th International Symposium on Space  
Terahertz Technology*, Paris, May 2006, Conference Proceedings ISSTT 2006,  
report FR3-3.
- [A23]. 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.
- [A24]. **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.

- [A25]. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., **Торгашин М.Ю.**, Худченко А.В. и Вакс В.Л., "Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм волн для мониторинга атмосферы", 4-ая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, ноябрь 2006 г.
- [A26]. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соболев А.С., **Торгашин М.Ю.**, Худченко А.В. "Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона волн для атмосферных исследований", Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2007.
- [A27]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, "Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS", presented at the *18th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Pasadena, CA, USA, March 2007, report 10-5
- [A28]. V. P. Koshelets, A.B. Ermakov, P. N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, N. V. Kinev, O. S. Kiselev, I.L. Lapitskaya, A. S. Sobolev, **M. Yu. Torgashin**, P. A. Yagoubov, R. W.M. Hoogeveen, G. de Lange, and W. Wild, "Superconducting integrated receivers for radio astronomy and atmospheric monitoring", 11-th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2007), Washington D.C., USA, June 2007.
- [A29]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, "Superconducting Integrated Submm Wave Receiver" submitted to the Frontiers of Josephson Physics and Nanoscience (FJPN07), 7th International AQDJJ conference, Italy, September 2007.



- [A30]. V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, N.V. Kinev, A.V. Khudchenko, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, P.A. Yagoubov, G. de Lange, W. Wild, R.W.M Hoogeveen, “Development of the Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS”, Joint International Workshop "A new generation of ultra-sensitive detectors for dark energy and cosmology experiments", Bjorkliden, Kiruna, Sweden, March 30 -April 6, 2008
- [A31]. 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.
- [A32]. Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., Киселев О.С., Лапицкая И.Л., Соколов А.С., **Торгашин М.Ю.**, Филиппенко Л.В., Худченко А.В., «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм диапазона волн для атмосферных исследований и радиоастрономии». *Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн*, Нижний Новгород, март 2009.
- [A33]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, “On-board Integrated submm spectrometer for atmosphere monitoring and radio astronomy”, *ISTC Thematic Workshop “Perspective materials, devices and structures for space applications”*, Yerevan, Armenia, May 26 - 28, 2009.
- [A34]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, “Superconducting Integrated Receiver”, presented at the International Conference on Superconductive Electronics “EuroFlux-2009: from devices to circuits and systems”, Avignon, France, September 20-23, 2009.
- [A35]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, I.L. Lapitskaya, A.S. Sobolev, **M.Yu. Torgashin**, “Superconducting Integrated Terahertz Spectrometer for

- Atmosphere Monitoring and Radio Astronomy”, Invited talk to the I.F. Schegolev Memorial Conference “Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems”, October 11–16, 2009, Chernogolovka, Russia.
- [A36]. Valery Koshelets, Pavel Dmitriev, Andrey Ermakov, Lyudmila Filippenko, Andrey Khudchenko, Nickolay Kinev, Oleg Kiselev, Alexander Sobolev, **Mikhail Torgashin**, “Superconducting integrated submm wave receiver for atmosphere monitoring”, The 10-th Workshop on Submm-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Wu-Xi, China, November 15-18, 2009.
- [A37]. Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Pavel Kudryashov, Oleg S. Kiselev, **Mikhail Yu. Torgashin**, Gert de Lange, Arno de Lange, Leo de Jong, Pavel A Yagoubov, Vladimir L. Vaks, Sergey I. Pripolzin, “Superconducting Integrated THz Receivers”, 21th International Symposium on Space Terahertz Technology, Oxford, Great Britain, 23-25 March 2010.
- [A38]. В.П. Кошелец, О.С. Киселев, Н.В. Кинев, **М.Ю. Торгашин**, А.В. Худченко, В.Л. Вакс, С.И. Приползин, «Сверхпроводниковый интегральный спектрометр для неинвазивной медицинской диагностики», Труды III Евразийского конгресса по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика – 2010», том 4, стр. 157-159, 2010.
- [A39]. Valery P. Koshelets, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, **Mikhail Yu. Torgashin**, Arno de Lange, Gert de Lange, Sergey I Pripolzin, and Vladimir L Vaks, “Superconducting integrated THz receivers: development and applications”, presented at the "Infrared, Millimeter Wave, and Terahertz Technologies" conference is part of Photonics Asia 2010, 18-20 October 2010, Beijing, China.
- [A40]. **М.Ю. Торгашин**, Киселев О.С., Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелец, «Интегральный приемник субмм диапазона на основе низкотемпературных сверхпроводников», конференция «*Прикладная сверхпроводимость – 2010*», 23 марта 2010 г, Москва.