На правах рукописи

ЧЕКУШКИН Артем Михайлович

МАТРИЦЫ ПЛАНАРНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ АНТЕНН С СИНИС-БОЛОМЕТРАМИ

Специальность 01.04.03 -- Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2020

Работа была выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук.

Научный руководитель: **Тарасов Михаил Александрович**, доктор физико-математических наук.

Официальные оппоненты: **Снигирев Олег Васильевич,** доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников и крио-электроники ФГБОУ ВО «Москов-ский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Третьяков Иван Васильевич, кандидат физико- математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых детекторов ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится «29» мая 2020 г., в «11:30», на заседании диссертационного совета Д002.231.02 на базе ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), расположенном по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН: http://cplire.ru/rus/dissertations/Chekushkin/index.html

Автореферат разослан « » _____2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Копылов
Юрий Леонидович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время активно развиваются инструменты для различных задач, направленных на исследование реликтового излучения Вселенной такие как Миллиметрон, BOOMERANG, OLIMPO, LSPE, БТА, СУФФА. Для них необходимы чувствительные приемные системы с широким динамическим диапазоном, способные работать при высокой фоновой мощности (порядка 5-80 пВт). В случае проведения радиоастрономических наблюдений с поверхности Земли существенную роль играет поглощение терагерцового излучения парами воды, находящимися в атмосфере. Чтобы уменьшить негативное влияние атмосферы, радиотелескопы располагают на значительной высоте относительно уровня моря, либо помещают на борту исследовательских зондов (высотные аэростаты). В связи с этим, актуальной задачей является создание компактных и высокочувствительных детекторов мм и субмм диапазонов длин волн. Оптимальными детекторами для подобных телескопов, с точки зрения достижения предельной чувствительности, являются приемники на основе сверхпроводниковых болометров. Требования, предъявляемые к подобным системам довольно противоречивы: с одной стороны, необходима предельно высокая чувствительность на уровне не хуже 10^{-16} Вт/Гц$^{1/2}$ для наземных телескопов, с другой стороны нужен широкий динамический диапазон, поскольку уровень фонового излучения атмосферы на поверхности Земли может составлять десятки пиковатт в диапазоне 0,8 мм. Для повышения мощности насыщения используют матрицы антенн со сверхпроводниковыми болометрами. В качестве прототипа подобных приемных устройств может служить матрица кольцевых антенн с болометрами типа Сверхпроводник-Изолятор - Нормальный металл – Изолятор - Сверхпроводник (СИНИС). Характеристики приемных матриц на основе СИНИС-болометров (высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, высокое быстродействие) делают их перспективными детекторами для исследований в области мм и субмм астрономии.

Степень разработанности

Аналогами по области применения СИНИС-болометров можно назвать детектор (болометр) на краю сверхпроводящего перехода (БКП, в англоязычной литературе TES), а так же детектор на кинетической индуктивности (KID). Каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. Быстродействие БКП обычно составляет несколько миллисекунд. Однако, как и у СИНИС-болометра, оно может достигать порядка 1-2 мкс. В БКП это происходит за счет реализации отрицательной обратной термоэлектронной связи, но при этом происходит снижение чувствительности БКП. В СИНИС-болометрах подобного снижения нет, что позволяет достигать чувствительности на уровне 10^{-17}-10^{-18} Вт/Гц$^{1/2}$. Если проводить сравнение с KID, то в них ограничение в предельную чувствительность детектора вносит генерационно-рекомбинационный шум, возникающий в малом объеме сверхпроводника после поглощения в нем фотона. В СИНИС-болометре используется полоска нормального металла, поэтому подобной проблемы нет, а большой объем сверхпроводника позволяет избежать высокого уровня шума в сверхпроводящем электроде. Более подробно свойства и характеристики криогенных детекторов и их сравнение представлено в Главе 1.

Цель настоящей диссертационной работы:

решение проблемы насыщения болометрических детекторов в условиях высокой фоновой мощности (десятки пиковатт), а также улучшение сигнальных характеристик. Для достижения этой цели были решены следующие основные **задачи:**

1) Разработка матриц планарных кольцевых антенн мм и субмм диапазонов с интегрированными СИНИС-болометрами, которые обладают высокой чувствительностью, низкой мощностью эквивалентной шуму (МЭШ) и широким динамическим диапазоном для применения в радиоастрономии.

2) Разработка, изготовление и экспериментальное исследование перестраиваемого криогенного сеточного фильтра, по типу интерферометра Фабри-Перо, а также тонкопленочных фильтров. Они необходимы для

проведения измерений вольт-ваттных, ампер-ваттных и спектральных характеристик матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами в криостатах при температурах 0,1 и 0,3 К.

3) Оптимизация существующей технологии изготовления образцов.

4) Исследование вольт-ваттных, ампер-ваттных характеристик разрабатываемых структур на внешнее электромагнитное излучение.

5) Измерение спектральных характеристик матриц кольцевых антенн: стандартного размера (полуволновые антенны) и электрически малых антенн.

Научная новизна

1) Для спектральной калибровки матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами впервые предложена и реализована оригинальная конструкция компактного перестраиваемого сеточного криогенного фильтра на основе интерферометра Фабри-Перо, позволяющего проводить калибровку болометров. Данный прибор был помещен в криостат, была продемонстрирована перестройка центральной частоты в диапазоне 100-500 ГГц, ширина полосы пропускания 4 ГГц.

2) Детально изучено влияние близости нормального металла и объема сверхпроводника на работу СИН-переходов. Экспериментально показано, что большая площадь сверхпроводника ($S_{Al}/S_{SIN}=200$ в сравнении с $S_{Al}/S_{SIN}=3$) и удаленность нормального металла от сверхпроводника на 5 мкм вместо 2 мкм позволяют устранить подавление энергетической щели в сверхпроводнике. На основе этих данных была оптимизирована топология СИНИС-болометров.

3) Разработаны и исследованы три типа матриц электрически малых кольцевых антенн (ЭМА), в которые интегрированы СИНИС-болометры. Использование кольцевых антенн, существенно меньшего размера, чем длина волны, позволяет значительно повысить плотность компоновки СИНИС-болометров, улучшить чувствительность и повысить мощность насыщения приемной системы.

Теоретическая и практическая ценность работы

1) Разработанные, изготовленные и измеренные приемные матрицы планарных кольцевых антенн, с интегрированными в них СИНИС-болометрами, могут быть использованы в качестве прототипа приемника для исследований в области радиоастрономии.

2) Разработанный, изготовленный и измеренный криогенный перестраиваемый фильтр может быть использован для проведения спектрального анализа с помощью матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-болометрами, на наземных телескопах или аэростатных миссиях.

3) Полученный рекордный отклик по напряжению на внешнее электромагнитное излучение для матриц кольцевых антенн с характерным диаметром кольца равным половине длины волны ($2{,}6 \cdot 10^9$ В/Вт) на частоте 345 ГГц, позволит проводить более точные измерения для приема и оценки излучения на радиотелескопах.

4) Для согласования падающего излучения с детектором, показано, что лучшие спектральные измерения наблюдаются в случае расположения образца металлизацией (антеннами) к падающему электромагнитному излучению, при этом эффективная толщина подложки составляет $\lambda/4$. Эти выводы, полученные при помощи компьютерного моделирования, подтвердились экспериментом, в котором впервые реализована конструкция подобного приемного элемента (СИНИС-болометра) для освещения со стороны антенн.

5) Разработанные матрицы электрически малых кольцевых антенн, позволят повысить плотность компоновки СИНИС болометров, что увеличит допустимую приемную мощность, необходимую для работы в условиях высокой фоновой нагрузки. Получен рекордный отклик по напряжению ($2{,}8 \cdot 10^9$ В/Вт) для матриц электрически малых антенн. Экспериментально показан динамический диапазон более 30 дБ. Измерена спектральная

характеристика в диапазоне 220-380 ГГц. Экспериментально получена высокая флуктуационная чувствительность 74 мкК/Гц$^{1/2}$ при уровне фона 2,7 К.

Методология и методы исследования

1. Для описания параметров СИНИС-болометра использовались методы теоретического расчета и метод численного моделирования, результаты которых в дальнейшем проверялись экспериментальным путем.

2. Для экспериментального исследования разработанных матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами были использованы следующие измерительные стенды:

а) для проведения измерений при комнатной температуре использовалась коммутирующая плата с малошумящими операционными усилителями с платой ЦАП-АЦП для управления с ПК;

б) для криогенных экспериментов использовался криостат Heliox фирмы Oxford Instruments с импульсной трубой в качестве первой ступени охлаждения и откачкой паров He_3 (температура 273 мК) , а также криостат растворения, созданный В.С. Эдельманом в институте физических проблем им. П.Л.Капицы (минимальная температура 100 мК), коммутирующая плата с усилителями при комнатной температуре, и плата ЦАП-АЦП для управления с ПК.

3. Для исследования отклика на электромагнитное излучение разработанных структур были рассчитаны и изготовлены сеточные полосно-пропускающие фильтры диапазона 250-400 ГГц. Для измерений спектрального отклика в качестве источника излучения использовали лампу обратной волны (ЛОВ) диапазона 230-380 ГГц, с квазиоптическим гауссовым трактом.

4. Для улучшения точности измерений была предложена и реализована конструкция криогенного спектрометра в виде перестраиваемого фильтра. Это позволило уменьшить влияние неоднородностей оптического тракта за счет уменьшения числа фильтров и оптических экранов. Наличие перестраиваемого фильтра внутри криостата дало возможность избавиться от влияния внеполосного излучения.

В рамках данной диссертационной работы было проведено два типа исследований: измерение оптического отклика матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами на различную температуру черного тела (ЧТ) и спектральный отклик на внешнее электромагнитное излучение от ЛОВ. Для повышения точности эксперимента по изучению спектрального отклика использовалась схема с опорным каналом, в которой мощность излучения источника одновременно регистрировалась на пироэлектрическом приемнике.

Положения, выносимые на защиту:

Основные результаты диссертационной работы:

1) Разработаны, изготовлены и измерены фильтры для криогенных электромагнитных измерений: полосно-пропускающий и перестраиваемый криогенный на основе интерферометра Фабри-Перо. Полосно-пропускающие фильтры имеют полосу пропускания 10-90 ГГц и ослабление вне полосы порядка 10 дБ. Перестраиваемый фильтр способен работать при криогенных температурах и в полосе частот 100-500 ГГц с шириной полосы пропускания 4 ГГц.

2) Разработана и успешно использована методика изготовления матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-болометрами без дополнительного слоя «тонкого золота». Это позволило улучшить теплоотвод финальной структуры за счет более толстого слоя нормального металла, используемого для формирования массивов антенн (200 нм против 35 нм ранее).

3) Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы матрицы планарных кольцевых антенн для приема внешнего электромагнитного излучения диапазона 345 ГГц с интегрированными в них СИНИС-болометрами. МЭШ разработанных структур не хуже 10^{-17} Вт/Гц$^{-1/2}$.

4) Измерен оптический и спектральный отклик на внешнее электромагнитное излучение матриц параллельно и последовательно соединенных антенн с характерным диаметров 300 мкм. Для последовательной матрицы из 25 антенн с болометрами чувствительность по напряжению на

излучение черного тела достигает $3 \cdot 10^9$ В/Вт; мощность насыщения превышает 5 пВт. Токовая чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с болометрами составляет $2 \cdot 10^4$ А/Вт.

5) Экспериментально измерены спектральные характеристики матриц кольцевых антенн с СИНИС-болометрами. Исследовано влияние расположения образца на однородность и мощность приема сигнала при облучении, как с обратной стороны подложки, так и со стороны антенн.

6) Разработана, изготовлена и экспериментально исследована приемная матрица электрически малых антенн с СИНИС-болометрами, характерный диаметр кольца 54 мкм. Измерен оптический и спектральный отклик. Экспериментально получена вольт-ваттная чувствительность выше 10^9 В/Вт, динамический диапазон более 30 дБ, полоса пропускания более 180 ГГц. Использование матрицы электрически малых кольцевых антенн позволило увеличить полосу пропускания.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием расчетов и различных типов экспериментов: с облучением от источника черного тела в криостате с различными фильтрами, облучением внешним источником ЛОВ, измерениями в разных криостатах и конфигурациях, с иммерсионной линзой и встречными рупорами.

Основные результаты проведённых исследований представлены в 36 работах, в том числе 13 – статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, из них входящих в международные базы данных 8, а также в 19 докладах на международных и российских конференциях с публикацией расширенных тезисов, получено 4 патента. Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Журнал Радиоэлектроники, Superconductor Science and Technology, Applied Physics Letters, Journal of Physics.

Публикации по материалам работы полностью отражают его содержание.

Личный вклад автора:

Работы были выполнены А.М. Чекушкиным в соавторстве с сотрудниками лаборатории сверхпроводниковой электроники ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, и Чалмерского технологического института (г.Гётеборг, Швеция). Автором разработана топология матриц СИНИС-болометров в среде AutoCAD, оптимизирована методика изготовления и изготовлены образцы болометров с использованием электронной литографии методом теневого напыления через подвешенную резистивную маску, автор принимал участие в проведении измерений электрических характеристик и оптического отклика образцов матриц СИНИС-болометров в криостате с откачкой паров He^3,в криостате растворения в институте физических проблем им. П.Л. Капицы, в обработке результатов и подготовке публикаций.

Основное содержание работы:

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и определены ее цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней дан краткий анализ существующих криогенных детекторов. Описаны их концепции, параметры и способы реализации. Выделены основные характеристики, необходимые при проектировании сверхпроводниковых детекторов: компактность, МЭШ, чувствительность, время отклика. Характерными значениями мощности эквивалентной шуму (МЭШ) для данного типа приемных систем являются значения 10^{-17}-10^{-21} Вт·Гц$^{-1/2}$. Характерная ампер-ваттная чувствительность на уровне 10^5 А/Вт. Время отклика порядка нескольких микросекунд. Приведено описание использования матриц приемных элементов. Они позволяют избежать перегрева по сравнению с одиночными СИН-структурами и добиться приема мощности излучения 5-40 пВт в зависимости от конфигурации матрицы. Приведено описание приемных элементов типа дипольных и кольцевых антенн. Указаны их достоинства и недостатки.

Во второй главе предложены, разработаны и рассчитаны полосно-пропускающие фильтры с центральной частотой 345 ГГц и полосой пропускания от 10 до 100 ГГц. Ослабление вне полосы составляет 10 дБ-20 дБ.

Разработан криогенный перестраиваемый фильтр для спектральных измерений. Расчет фильтра проводился для диапазона частот от 50 до 1000 ГГц. Добротность составила 34. Минимальный шаг фильтра-1 ГГц.

Произведен расчет СИНИС-болометра на центральную частоту 345 ГГц. Получено, что площадь СИН-переходов должна составлять 0,8 мкм^2, ёмкость 14 фФ, для согласования СИНИС-болометров в кольцевой антенне с внешним электромагнитным излучением на центральной частоте 345 ГГц. Было исследовано и показано с помощью компьютерного моделирования, что расположение образцов антенной к внешнему излучению предпочтительнее, чем облучение со стороны диэлектрика (подложки). В первом случае рассчитанная спектральная характеристика имеет более широкую и равномерную полосу приема.

Произведена оценка матриц электрически малых кольцевых антенн с СИНИС-болометрами. Получено, что такой вид матриц может существенно (более чем в 40 раз) повысить плотность расположения СИНИС-болометров, что позволит увеличить мощность насыщения при тех же площадях детектора. Для оценки предлагаемой структуры были сделаны три различных расчета: метод сосредоточенных элементов (RLC), численное моделирование одиночной ячейки с периодическими граничными условиями, численное моделирование всей структуры, состоящей из 100 ЭМА с СИНИС-болометрами. С помощью компьютерного моделирования было показано, что подобная система позволяет реализовать широкополосную приемную систему (полоса более 180 ГГц), что дает возможность использовать данную матрицу в паре со спектральным фильтром для проведения спектральных измерений на частотах 280-460 ГГц.

В третьей главе описано изготовление матрицы планарных кольцевых антенн с центральной частотой 345 ГГц с характерным диаметром кольца порядка полдлины волны (300 мкм внешний диаметр и 23 мкм ширина кольца),

а также матрицы электрически малых кольцевых антенн, внешний диметр 54 мкм, ширина 15 мкм. В качестве материалов для СИНИС-болометров использовались: алюминий (10 нм) с подслоем железа (1,5 нм), как нормальный металл, оксид алюминия (созданный окислением алюминия в камере напылительной установки 1,2 нм) как изолятор и чистый алюминий (40 нм) как сверхпроводник. В качестве материалов для антенн и контактных площадок использовались титан (10 нм) для лучшей адгезии золота, золото (100-150 нм), палладий (20 нм), чтобы избежать интерметаллического компаунда между золотом и алюминием. Использование двухслойного резиста позволило реализовать нависающий профиль маски, что дает возможность использования технологии теневого напыления. Это позволило реализовать создание СИНИС-болометров без разрыва вакуума, что положительно сказывается на их характеристиках. Изготовлены различные топологии образцов для изучения особенностей приема электромагнитного излучения: со стороны антенн и со стороны диэлектрика. Были изготовлены наборы образцов для исследования влияния близости нормального металла на качество СИН-переходов. Образцы отличались объемом сверхпроводника (S_{Al}/S_{SIN}=200 и 3) и расстоянием от сверхпроводника до нормального металла (2 и 5 мкм). Изготовлены образцы для отработки нового технологического маршрута, в котором был убран слой «тонкого золота», необходимый для реализации электрического контакта между разводкой проводов, контактными площадками и СИНИС-болометром. Это было сделано для проверки идеи о том, что напыление под углами позволяет изготавливать структуры с последующим слоем тоньше, чем предыдущий (что невозможно в рамках планарной реализации структуры). Полученные образцы показали наличие электрических контактов. Описаны экспериментальные установки: оптический тракт, криостаты, приведена электрическая схема для проведения измерений.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию спектральных и сигнальных параметров матриц кольцевых антенн с интегрированными в них СИНИС-болометрами. Изучены используемые

фильтры, измерены их основные характеристики. Относительный коэффициент пропускания полосно-пропускающих фильтров составил более 0.9 (измерено методом замещения фильтра), ослабление вне полосы пропускания составило 11 дБ. Получена ширина полосы пропускания 10-90 ГГц для центральной частоты 330 ГГц. Изготовлен и опробован криогенный перестраиваемый фильтр. Коэффициент пропускания составил 0,4, ширина полосы пропускания 4 ГГц для центральной частоты 280 ГГц и 20 ГГц для центральной частоты 420 ГГц.

Исследовано влияние близости нормального металла и объема сверхпроводника на свойства СИН-переходов. Было показано, что большая площадь сверхпроводника (S_{Al}/S_{SIN}=200 против S_{Al}/S_{SIN}=3) и удаленность от нормального металла от сверхпроводника на 5 мкм вместо 2 мкм заметно улучшают свойства переходов. Дифференциальные сопротивления этих образцов приведены на рисунке 1, нумерация на графике следующая:

1) сверхпроводящие электроды лежат поверх трехслойки Ti/Au/Pd, расстояние до нормальной ловушки 2 мкм;

2) конфигурация аналогична первой, но сверхпроводящие электроды лежат на тонком слое из Ti/Pd. В первом и втором случаях отношение площади сверхпроводящего алюминия к площади СИН-перехода (S_{Al}/S_{SIN} - составляет всего 3);

3) В структуре была значительно увеличена площадь сверхпроводящего алюминия, сверхпроводящий электрод лежит на двухслойке Ti/Pd, но расстояние от СИН перехода до нормального металла такое же, как и в предыдущих двух случаях.

4) Для последнего типа образца была реализована большая площадь сверхпроводящего электрода (S_{Al}/S_{SIN}=200), расстояние от СИН-перехода до нормального металла составило 5 мкм.

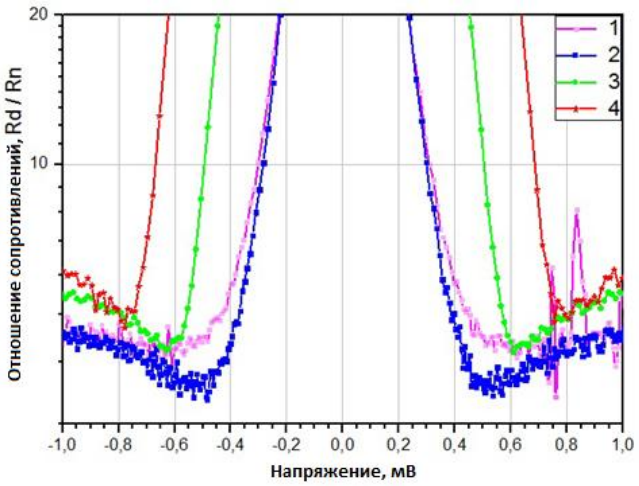

Рисунок 1. Зависимости дифференциального сопротивления от напряжения смещения для четырех модельных образцов, которые представляют собой 2 последовательных СИНИС-болометра.

Из рисунка 1 можно сделать вывод, что толщина нормального металла влияет на свойства СИН-перехода. Но в гораздо большей степени, на свойства СИН-переходов оказывают влияние объем сверхпроводника и его близость к нормальному металлу.

Измерены темновые ВАХ СИНИС-болометра на постоянном токе (рисунок 2). Сделан вывод об изначальном перегреве электронной системы. Перегрев может возникать из-за просачивания высокочастотных сигналов из внешнего окружения.

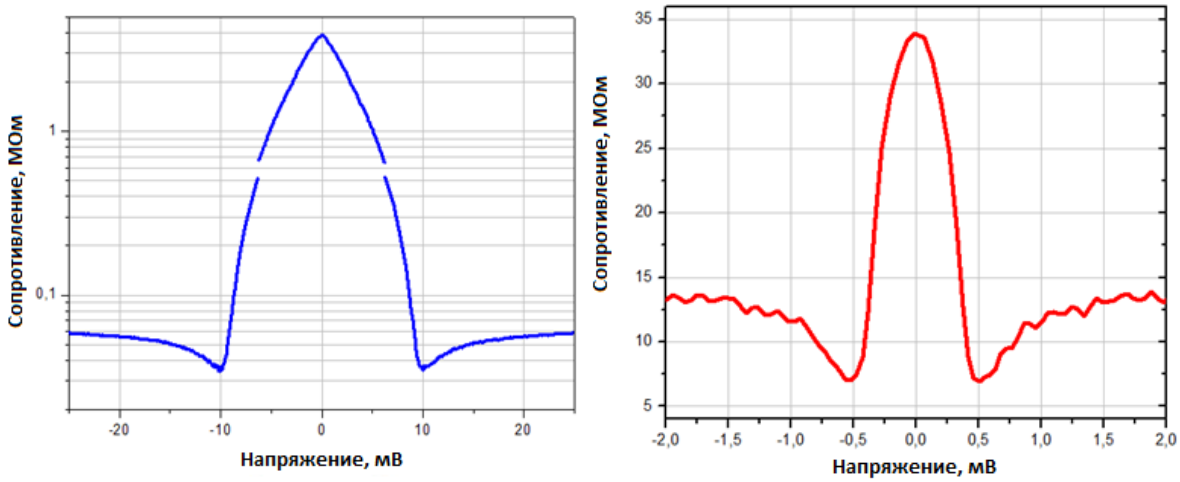

Рисунок 2.Дифферинциальное сопротивление структуры из 25 колец соединенных последовательно (слева) и параллельно (справа).

Для измерения квазистатического оптического отклика в качестве источника излучения использовалось черное тело (ЧТ), в виде напыленной пленки нихрома, на кремниевой подложке (в поздних вариантах на подложке сапфира), расположенное внутри криостата. Чувствительность при измерении

оптического отклика параллельной матрицы кольцевых антенн с СИНИС-болометрами на излучение ЧТ температурой 10 К через полосовой фильтр достигла значений $dV/dP=3.4\cdot10^7$ В/Вт и 10^5 А/Вт. Невысокий отклик по напряжению обусловлен не идеальной системой считывания для данного типа соединения антенн.

Измерен оптический отклик в случае, когда источник находился снаружи криостата. Модулированный сигнал излучения черного тела 77/300 К подавался на образец через окно криостата. Полученный результат представлен на рисунке 3 справа.

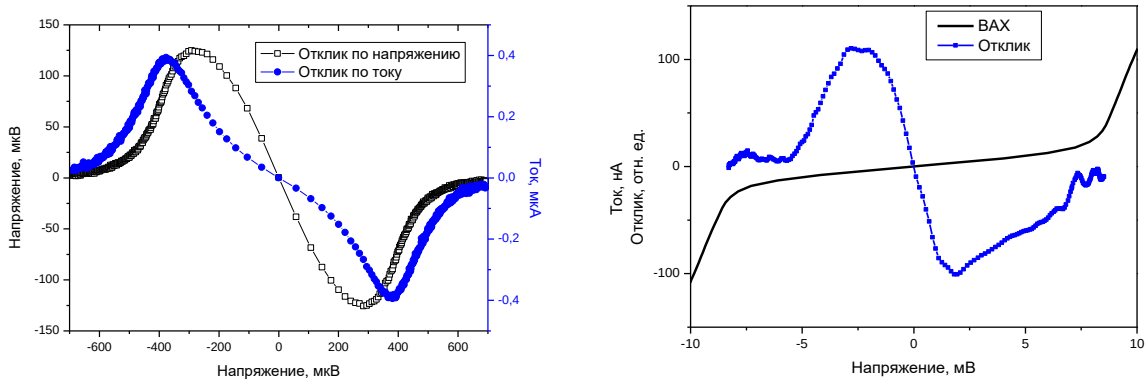

Рисунок 3. Слева: Оптический отклик матрицы параллельно соединенных антенн на излучение черного тела температурой 10К, расположенного внутри криостата
Справа: Оптический отклик матрицы последовательно соединенных антенн на излучение черного тела, расположенного снаружи криостата

На рисунке 4 приведены оптические отклики по напряжению для матрицы кольцевых антенн, соединенных последовательно. Температура черного тела изменялась от 2 К до 9 К, что соответствует мощности излучения от 30 фВт до 3,0 пВт. Измеренные оптические отклики по напряжению составили от $2,6\cdot10^9$В/Вт для 30 фВт до $5\cdot10^8$ В/Вт для 3 пВт. Исследуемые образцы находились при температуре 100 мК.

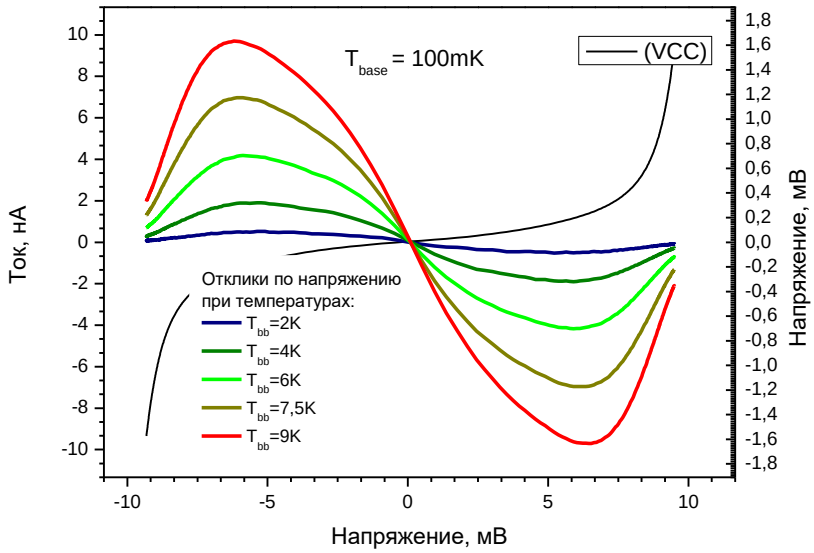

Рисунок 4. Оптический отклик по напряжению для матрицы 25 кольцевых антенн, соединенных последовательно, для температур 2-9 К. VCC - ВАХ матрицы без облучения.

Для измерений спектрального отклика в качестве источника излучения использована лампа обратной волны (ЛОВ) в диапазоне 230-380 ГГц. Излучение проходит через три поглощающих аттенюатора, размещенных на радиационных экранах с температурами 100 K, 3 K, 0,3 K с ослаблением более 20 дБ, фильтр низких частот и полосно-пропускающий фильтр. Одновременно измерялись сигнал от болометра и от пироэлектрического детектора, с помощью которого контролировался уровень входной мощности. Экспериментальные спектры для образца с матрицей антенн на кремниевой подложке приведены на рисунке 5. Были проведены исследования влияния четвертьволнового просветляющего покрытия, и было показано, что оно улучшает чувствительность и равномерность спектрального отклика (красная кривая на рисунке 5).

Были рассмотрены различные конфигурации для измерения образцов: облучение со стороны антенны и облучение со стороны диэлектрика. Экспериментально подтверждено, что облучение матрицы со стороны антенн имеет более широкую полосу и уровень принимаемого сигнала существенно больше, чем при облучении со стороны диэлектрика. Результаты измерений приведены на рисунке 5 справа.

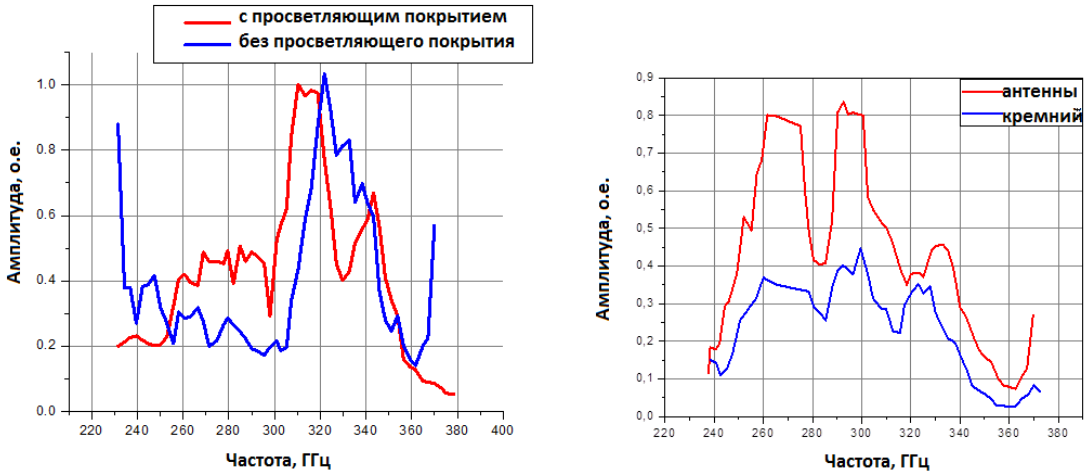

Рисунок 5 Слева: влияние просветляющего покрытия на спектральную характеристику. Справа: спектральный отклик образцов двух типов на сигнал с ЛОВ. Красный-облучение со стороны антенны, синий-облучение со стороны диэлектрика.

Произведены измерения матриц электрически малых кольцевых антенн с СИНИС-болометрами. Измерения тестовых образцов проводили в криостате при рабочей температуре 100 и 300 мК. Проводили два типа измерений: исследовали оптический отклик приемной структуры на различную температуру ЧТ, расположенного внутри криостата (рисунок 6), и спектральный отклик. Исследуемый образец в держателе с кремниевой линзой загружается в вакуумный криостат. Изменяя температуру ЧТ при помощи нагревателя от 2 до 7 К, измеряли оптический отклик приемной структуры. Динамический диапазон от 2 фВт до 2 пВт представлен на рисунке 7.

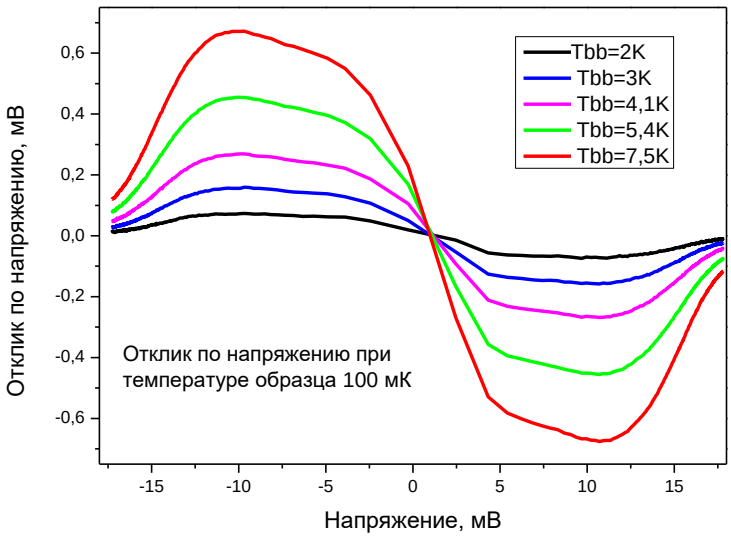

Рисунок 6. Экспериментально измеренный отклик по напряжению на излучение черного тела для последовательной матрицы из 81 электрически малой антенны при температурах ЧТ от 2 К до 7,5 К . Температура образца 100 мК.

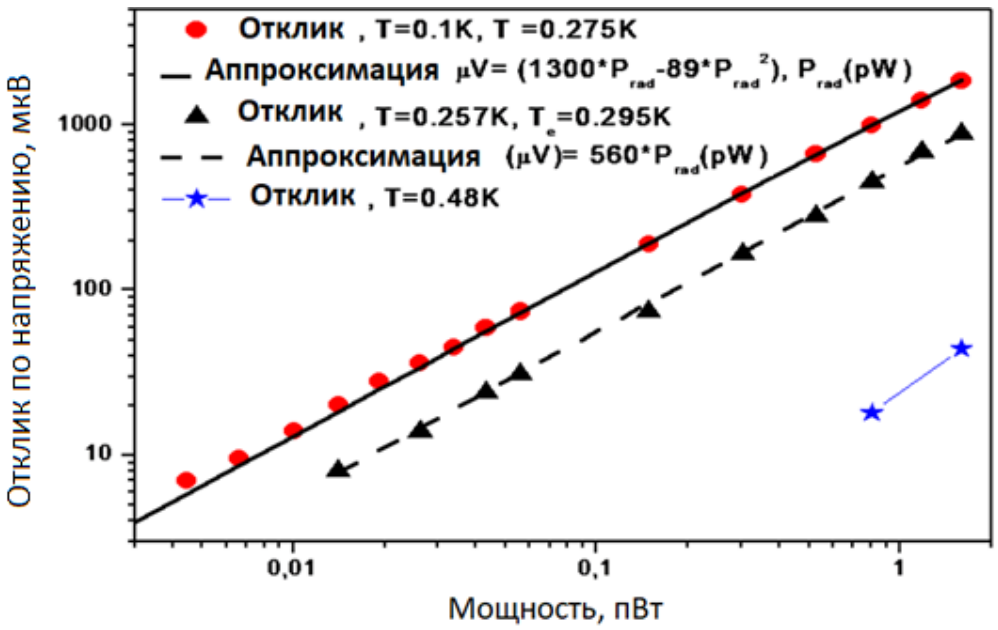

Рисунок 7. Динамический диапазон принимаемой мощности матрицы из 81 ЭМА с СИНИС-болометрами составил более 30 дБ. Антенны соединены последовательно.

При измерении спектрального отклика, который изображен на рисунке 8, в качестве источника использовали лампу обратной волны (ЛОВ). Сигнал от ЛОВ, проходя через окна криостата, поступает на исследуемый образец. Неоднородность и изрезанность спектрального отклика по большей части связана с неидеальностью квазиоптического тракта из-за трех оптических окон на разных температурных ступенях.

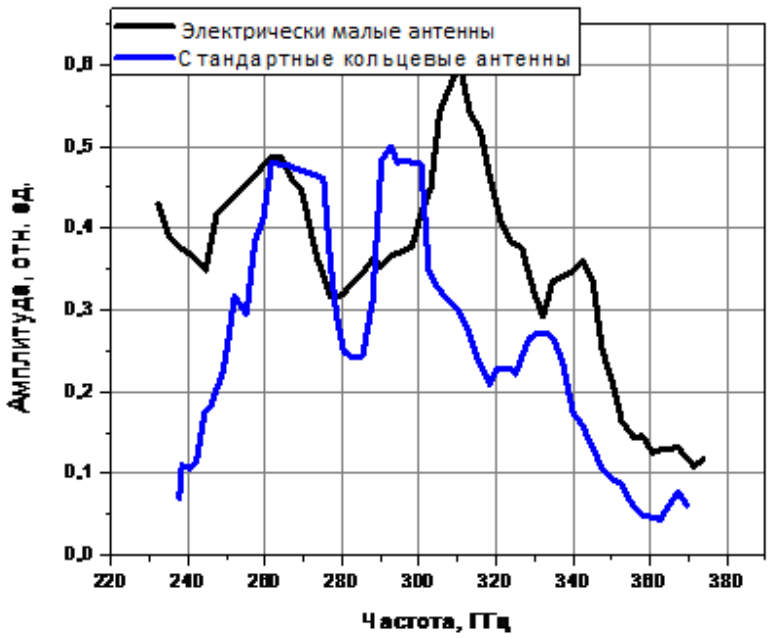

Рисунок 8 Сравнение спектрального отклика электрически малых кольцевых антенн и кольцевых антенн с характерным размером в полдлины волны на облучение с ЛОВ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны, изготовлены и измерены фильтры для криогенных электромагнитных измерений: полосно-пропускающий и перестраиваемый криогенный на основе интерферометра Фабри-Перо. Полосно-пропускающие фильтры имеют полосу пропускания 10-90 ГГц и ослабление вне полосы порядка 10 дБ. Перестраиваемый фильтр способен работать при криогенных температурах и в полосе частот 100-500 ГГц с шириной полосы пропускания 4 ГГц.

2. Разработана и успешно использована методика изготовления матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-болометрами без дополнительного слоя «тонкого золота». Это позволило улучшить теплоотвод финальной структуры за счет более толстого слоя нормального металла, используемого для формирования массивов антенн (200 нм против 35 нм ранее).

3. Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы матрицы планарных кольцевых антенн для приема внешнего электромагнитного излучения диапазона 345 ГГц, с интегрированными в них СИНИС-болометрами. МЭШ разработанных структур не хуже 10^{-17} Вт/Гц$^{-1/2}$.

4. Измерен оптический и спектральный отклик на внешнее электромагнитное излучение матриц параллельно и последовательно соединенных антенн с характерным диаметров 300 мкм. Для последовательной матрицы из 25 антенн с болометрами чувствительность по напряжению на излучение черного тела достигает $2{,}6 \cdot 10^{9}$ В/Вт; мощность насыщения превышает 5 пВт. Токовая чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с болометрами составляет $2 \cdot 10^{4}$ А/Вт.

5. Экспериментально измерены спектральные характеристики матриц кольцевых антенн с СИНИС-болометрами. Исследовано влияние расположения образца на однородность и мощность приема сигнала при облучении, как с обратной стороны подложки, так и со стороны антенн.

6. Разработана, изготовлена и экспериментально исследована приемная матрица электрически малых антенн с СИНИС-болометрами, характерный диаметр кольца 54 мкм. Измерен оптический и спектральный отклик. Экспериментально получена вольт-ваттная чувствительность $2{,}8 \cdot 10^9$ В/Вт, динамический диапазон более 30 дБ, полоса пропускания более 180 ГГц. Использование матрицы кольцевых электрически малых антенн позволило увеличить полосу пропускания.

Публикации в журналах, вошедших в Перечень изданий, рекомендованных ВАК:

[A1] **Чекушкин А.М.,** Тарасов М.А., Первичный криогенный термометр на основе цепочек туннельных переходов сверхпроводник – изолятор – нормальный металл// Нелинейный мир, №2, стр. 56-57, Москва, 2015.

[A2] **Чекушкин А.М.,** Юсупов Р.А, Завьялов В.В., Кузьмин Л.С., Тарасов М.А. Криогенный перестраиваемый спектральный фильтр для калибровки высокочувствительных болометров // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 1.

[A3] М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, М.Ю. Фоминский, Р.А. Юсупов, **Чекушкин А.М.,** А.Б. Ермаков, А.С. Соболев, В.С. Эдельман, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, Матрица кольцевых антенн с криогенными болометрами диапазона 345 ГГц в интегрирующей полости// Журнал радиоэлектроники №1, 2018г.

[A4] **А.М. Чекушкин,** М.А. Тарасов, Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, В.С. Эдельман, Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффекта близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах// Труды МФТИ, Том10, №2, стр. 64-71, 2018г.

[A5] **Чекушкин А.М.,** Юсупов Р.А., Эдельман В.С., Соболев А.С., Тарасов М.А., Матрицы метаматериалов с интегрированными СИНИС-болометрами// Нелинейный мир, №1, 2019, С.74-78

Публикации в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

[A6] E. Otto, M. Tarasov, P. K. Grimes, **A. Chekushkin,** L. S. Kuzmin, G. Yassin, Optical response of a titanium-based cold-electron bolometer, Superconductor Science and Technology, vol. 26, 2013; doi:10.1088/0953-2048/26/8/085020.

[A7] M. Tarasov, V. Edelman, S. Mahashabde, M. Fominsky, S. Lemzyakov, **A. Chekushkin,** R. Yusupov, D. Winkler, and A. Yurgens, Electrical and optical properties of a bolometer with a suspended absorber and tunneling-current thermometers, Appl. Phys. Lett. 110, 242601 (2017); doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.4986463

[A8] M. Tarasov, V. Edelman, S. Mahashabde, M. Fominsky, S. Lemzyakov, **A. Chekushkin,** R. Yusupov, D. Winkler, A. Yurgens. SINIS bolometer with a suspended absorber //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 969. – №. 1. – С. 012088. doi :10.1088/1742-6596/969/1/012088

[A9] A.S. Sobolev, B. Beiranvand, **A.M. Chekushkin,** A.V. Kudryashov, M.A. Tarasov, R.A. Yusupov, A. Gunbina, V.F. Vdovin and V. Edelman, Wideband metamaterial-based array of SINIS bolometers// EPJ Web Conf.,Volume 195, Article Number 05009, Number of page(s) 2, 2018 DOI: 10.1051/epjconf/201819505009

[A10] M. Tarasov, A. Gunbina, M. Mansfeld, G. Yakopov, **A. Chekushkin,** R. Yusupov, S. Lemzyakov, V. Edelman and V. Vdovin, Arrays of annular cryogenic antennas with SINIS bolometers and cryogenic receivers for SubTHz observatories // EPJ Web Conf.,Volume

195, Article Number 05010, Number of page(s) 2, 2018 DOI: 10.1051/epjconf/201819505010

[A11] Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A., Yakopov G., **Chekushkin A.,** Yusupov R., Lemzyakov S., Vdovin V., and Edelman V., Annular antenna array metamaterial with SINIS bolometers // Journal of Applied Physics, Vol.125, Issue 17, 174501, 2019 DOI: 10.1063/1.5054160

[A12] M. A. Tarasov, A.A. Gunbina. S. Mahashbde, R.A. Yusupov, **A.M. Chekushkin**, D.V. Nagirnaya, V.S. Edelman, G.V. Yakopov, V.F. Vdovin. Arrays of Annular Antennas With SINIS Bolometers //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2019. – Т. 30. – №. 3. – С. 1-6. 10.1109/TASC.2019.2941857

[A13] M. A. Tarasov, **A. M. Chekushkin**, R. A. Yusupov, A. A. Gunbina, V. S. Edelman Matching of Radiation with Array of Planar Antennas with SINIS Bolometers in an Integrating Cavity// Journal of Communications Technology and Electronics, 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 60–68, DOI: 10.1134/S1064226920010064 (М.А. Тарасов, **А.М. Чекушкин**, Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, В.С. Эдельман. Согласование излучения с матрицей планарных антенн с СИНИС болометрами в интегрирующей полости// Радиотехника и электроника. — 2020. — Т.65, № 1. — С. 65–74).

Тезисы докладов на конференциях:

[A14] M. A. Tarasov, **A. M. Chekushkin,** V. S. Edelman, L. S. Kuzmin Устный доклад на тему: «Metamaterial bandpass structures made of two-dimensional arrays of planar resonators», Tera-2012, 20-22 June, Moscow, Russia.

[A15] M. A. Tarasov, **A. M. Chekushkin**, L.S.Kuzmin, “Focal plane CEB array design for OLIMPO and CLOVER projects”, The 13th International Workshop «Cryogenic Nanodevices», poster session, on March 17-24, 2013, Bjorkliden, Kiruna, Sweden.

[A16] **А.М. Чекушкин,** М.А. Тарасов, Л.С. Кузьмин, «Криогенные микротермометры на основе массива СИН переходов», устный доклад на 56-й научной конференции МФТИ, 25-30 ноября, 2013, Долгопрудный.

[A17] V. S. Edelman, M. A. Tarasov, **A. M. Chekushkin,** “Capillary quasioptical highpass filter”, The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, 27-30 April 2014, Moscow, Russia.

[A18] **Чекушкин А.М,** Юсупов Р.А, Глыбовский С., Саянский А., Завьялов В.В., Дубрович В., Кузьмин Л.С., Щесняк С., Тарасов М.А. Перестраиваемый сеточный интерферометр для спектральной калибровки криогенных болометров // Сборник трудов II Московской Микроволновой конференции / Москва, 2014, С.139-144

[A19] M.Tarasov, **A.Chekushkin,** L.Jonsson, L.Kuzmin, Grid interferometer for spectracl calibration of cryogenic bolometers, The 14th Int.Workshop, “High frequencySuperconductiong Electronics.”, Bjorkliden, Kiruna, Sweden, 10-16 April, 2016.

[A20] **A.Chekushkin,** A.Chiginev, A.Mukhin, L.Kuzmin, Multifrequency Cross-Slot Antenna with Resonant Cold-Electron Bolometers for Cosmology Space Missions, The 14th Int.Workshop, “High Frequency Superconductiong Electronics.”, Bjorkliden, Kiruna, Sweden, 10-16 April, 2016.

[A21] **А.М. Чекушкин,** В.К. Дубрович, В.В.Завьялов, А.Е. Саянский, Л.С. Кузьмин, М.А.Тарасов, Криогенные спектральные анализаторы для многочастотных приемных систем мм и субмм диапазонов. DAWN-2016, 20-24 июня 2016, Санкт-Петербург, Россия.

[A22] **Чекушкин А.М.,** Юсупов Р. А., Завьялов В.В., Кузьмин Л.С., Тарасов М.А., Криогенный перестраиваемый спектральный фильтр для калибровки высокочувствительных болометров // Сборник трудов IV Всероссийской микроволновой конференции / Москва, 2016, С. 337-341

[A23] M.Tarasov, V.Edelman, S.Mahashabde, M.Fominsky, S.Lemzyakov**, A.Chekushkin,** R.Yusupov, D.Winkler, A.Yurgens, SINIS bolometer with a suspended absorber, Int. Conf. Low Temp. Physics – 28, August 9-16, Gothenburg, Sweden, 2017

[A24] **А.М. Чекушкин,** М.А. Тарасов, Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, В.С. Эдельман, Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффект близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах // Сборник трудов 60-ой Научной конференции МФТИ, Электроника, фотоника и молекулярная физика / Долгопрудный, С. 116-118, 2017.

[A25] М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, М.Ю. Фоминский, Р.А. Юсупов, А.Б. Ермаков, **А.М. Чекушкин**, А.С. Соболев, В.С. Эдельман, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, Матрица кольцевых антенн диапазона 345 ГГц с криогенными болометрами в интегрирующей полости // Сборник трудов V Всероссийской микроволновой конференции/ Москва, 2017 С. 304-308

[A26] A.S. Sobolev, M.A. Tarasov, A.A. Gunbina, R.A. Yusupov, **A.M. Chekushkin,** V.F. Vdovin, V.S. Edelman, Wideband metamaterial-based array of SINIS bolometers, TERA2018, N.Novgorod Oct. 22-25 2018

[A27] M. Tarasov, A. Gunbina, M.Mansfeld, G. Yakopov, **A.Chekushkin,** R. Yusupov, V. Edelman, V. Vdovin. Arrays of annular antennas with SINIS bolometers for radioastronomy, TERA2018, N.Novgorod Oct. 22-25 2018.

[A28] Бейранванд Б., Вдовин В.Ф., Гунбина А.А., Ермаков А.Б., Лемзяков С.А., Мансфельд М.А., Махашабде С., Нагирная Д.В., Соболев А.С., Тарасов М.А., Фоминский М.Ю., **Чекушкин А.М.,** Эдельман В.С., Юсупов Р.А., Якопов Г.В., Матрицы планарных антенн с интегрированными СИНИС болометрами для радиоастрономических исследований. Сборник трудов VI Всероссийской микроволновой конференции, с. 253-257, г. Москва, 28 - 30 ноября 2018.

[A29] Соболев А.С., Бейранванд Б., Тарасов М.А., Юсупов Р.А., Гунбина А.А., **Чекушкин А.М.,** Эдельман В.С. Двухчастотная метаповерхность с интегрированными СИНИС болометрами. Сборник трудов VI Всероссийской микроволновой конференции, с. 310, г. Москва, 28 - 30 ноября 2018.

[A30] Юсупов Р.А., Соболев А.С., Гунбина А.А., Мансфельд М.А., **Чекушкин А.М.,** Вдовин В.Ф., Тарасов М.А., Эдельман В.С. Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами // Материалы докладов 28-ой Международной Крымской конференции / 2018. Том 4, С.856-861.

[A31] Вдовин В.Ф. Гунбина А.А., Мансфельд М.А., Якопов Г.В., Юсупов Р.А., **Чекушкин А.М.,** Эдельман В.С., Тарасов М.А. Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами. Согласование матрицы планарных антенн с СИНИС болометрами с излучением диапазона 350 ГГц // Материалы докладов 28-ой Международной Крымской конференции / 2018. Том 9, С.1563-1574.

[A32] Тарасов М.А., Соболев А.С., Гунбина А.А., Мансфельд М.А., Юсупов Р.А., С.А. Лемзяков, **Чекушкин А.М.,** Вдовин В.Ф., Эдельман В.С., Метаматериалы с кольцевыми антеннами и СИНИС болометрами// Тезисы докладов 38 Совещания по физике низких температур (НТ-38), 2018 ,С. 12-13

Патенты автора:

[A33] Тарасов М.А., Филиппенко Л.В., Фоминский М.Ю., Нагирная Д.В., **Чекушкин А.М.,** Способ изготовления устройств с тонкопленочными сверхпроводниковыми переходами. Патент № 2593647. Дата государственной регистрации 14 июля 2016

[A34] Тарасов М.А, **Чекушкин А.М.,** Юсупов Р.А, Способ изготовления устройств со свободно висящими микромостиками, Патент № 2632630. Дата государственной регистрации 06.10.2017

[A35] Тарасов М.А, Соболев А.С., **Чекушкин А.М.**, Юсупов Р.А., Гунбина А.А. Широкополосный детектор терагерцового излучения (варианты), Патент № 2684897. Дата государственной регистрации 16.04.2019

[A36] Тарасов М.А, **Чекушкин А.М.,** Юсупов Р.А, Способ изготовления воздушных мостов в качестве межэлектродных соединений интегральных схем, Патент № 2685082. Дата государственной регистрации 16.04.2019