



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 2019

Работа была выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте 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 «Московский 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 автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

Защита диссертации состоится «18» октября 2019 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 « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физико-математических. наук



Копылов

Юрий Леонидович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время для различных задач, направленных на исследование реликтового излучения Вселенной таких как Миллиметрон, BOOMERANG, OLIMPO, LSPE, БТА, АРЕХ, СУФФА, необходимы чувствительные приемные системы с широким динамическим диапазоном, способные работать при высокой фоновой мощности (порядка 5-80 пВт). Проведение радиоастрономических наблюдений с поверхности Земли ограничивается существенным поглощением терагерцового излучения в атмосфере, в основном парами воды. По этой причине радиотелескопы субмиллиметрового (субмм) и миллиметрового (мм) диапазонов располагаются на значительной высоте или устанавливаются на борту высотных зондов, исследовательских самолетов и спутников. В связи с этим, актуальной задачей является создание компактных и высокочувствительных детекторов в мм и субмм диапазонах длин волн. Оптимальными приемными системами для подобных телескопов, с точки зрения достижения предельной чувствительности, являются матрицы антенн с криогенными детекторами. Требования, применяемые к подобным системам довольно противоречивы: с одной стороны, необходима предельно высокая чувствительность на уровне не хуже 10^{-16} Вт/Гц^{1/2} для наземных, и еще на два порядка выше для космических телескопов, с другой стороны нужен широкий динамический диапазон, поскольку уровень фонового излучения атмосферы (для наземных телескопов) может составлять десятки пиковатт в диапазоне 0.8 мм. Для повышения мощности насыщения используются матрицы таких детекторов, интегрированных в антенны. В качестве прототипа подобных приемных устройств может служить матрица кольцевых антенн с болометрами типа Сверхпроводник-Изолятор-Нормальный металл-Изолятор-Сверхпроводник (СИНИС). СИНИС-болометры обладают набором свойств, делающими их перспективными для таких приложений: переходы сверхпроводник-изолятор-нормальный металл, изготовленные методом прямой электронной литографии, могут иметь площадь меньше 1 мкм², а объем абсорбера может

быть порядка 0.04 мкм^3 , и в этом случае СИНИС-болومتر обладает высокой чувствительностью, а расширения динамического диапазона можно достичь, используя матрицу подобных элементов.

Степень разработанности

Аналогами по области применения матриц кольцевых антенн с СИНИС-болометрами можно назвать детектор (болومتر) 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 чувствительность на уровне 10^{-17} - $10^{-18} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Если проводить сравнение с KID, то в них сильную проблему в предельную чувствительность детектора вносит генерационно-рекомбинационный шум, возникающий в малом объеме сверхпроводника после абсорбции 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 их использования на радиотелескопах, баллонных аэростатах и космических миссиях, а также улучшение сигнальных характеристик. Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

- 1) Разработка, изготовление, исследование перестраиваемого криогенного сеточного фильтра, по типу интерферометра Фабри-Перо, а также тонкопленочных фильтров для проведения измерений.
- 2) Оптимизация существующей технологии изготовления образцов.

3) 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.

4) Исследование физических свойств структур, обозначенных выше, с целью улучшения шумовых и сигнальных характеристик.

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

6) Измерение спектральных характеристик матриц кольцевых антенн: стандартного размера (порядка длины волны), и существенного меньшего размера (типа метаматериалов).

Научная новизна

Применение СИНИС-болометров, интегрированных с матрицей планарных кольцевых антенн, позволяет при высокой чувствительности к внешнему электромагнитному излучению мм и субмм диапазона, повысить мощность насыщения и быстродействие по сравнению с традиционными болометрами на краю сверхпроводящего перехода и охлаждаемыми полупроводниковыми болометрами.

Представлена новая концепция матриц кольцевых антенн типа метаматериала, в которую интегрированы СИНИС-болометры. Использование кольцевых антенн, существенно меньшего размера, чем длина волны, позволяет значительно повысить плотность компоновки СИНИС-болометров, улучшив чувствительность и повысив мощность насыщения приемной системы.

Произведены изменения в технологии изготовления, которые позволили уменьшить число технологических циклов и улучшить качество СИНИС-болометров.

Теоретическая и практическая ценность работы

Разработанные, изготовленные и измеренные приемные матрицы планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-болометрами,

могут быть прототипом приемника для проведения измерений на радиотелескопах.

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

Разработанные матрицы кольцевых антенн с характерным размером существенно меньше, чем длина волны, позволят повысить плотность компоновки СИНИС болометров, что увеличит допустимую приемную мощность.

Методология и методы исследования

Для изучения созданных матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами было собрано несколько измерительных стендов:

- 1) для проведения измерений при комнатной температуре использовалась коммутирующая плата с малошумящими операционными усилителями с платой ЦАП-АЦП для управления с ПК.
- 2) для проведения измерений при низких температурах использовались два разных криостата (с минимальными температурами 100 мК и 270 мК), с коммутирующей платой с усилителями, расположенной при комнатной температуре, и плата ЦАП-АЦП для управления с ПК.

Для оптических измерений были рассчитаны и изготовлены сеточные полосно-пропускающие фильтры диапазона 250-400 ГГц. Для измерений спектрального отклика в качестве источника излучения использован просвечивающий ЛОВ-спектрометр в диапазоне 230-380 ГГц, с квазиоптическим гауссовым трактом.

Для улучшения точности измерений была предложена конструкция криогенного спектрометра в виде перестраиваемого фильтра. Был реализован подобный фильтр. 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 от измерительной комнаты.

Измерения образцов проводилось при рабочей температуре 100 мК и 300 мК в криостате. Измерения были двух типов: оптический отклик матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами на различную температуру черного тела (ЧТ) и спектральный отклик на внешнее электромагнитное излучение от лампы обратной волны (ЛОВ). Для криогенных экспериментов использовался криостат Heliox фирмы Oxford Instruments с импульсной трубой в качестве первой ступени охлаждения и откачкой паров He^3 (дает температуру 273 мК), а также криостат растворения, созданный В.С.Эдельманом в институте физических проблем им. П.Л.Капицы (достижимая температура 100 мК).

Положения, выносимые на защиту:

Основные результаты диссертационной работы:

1) Разработаны, изготовлены и измерены фильтры для криогенных измерений: полосно-пропускающий и перестраиваемый 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 низких температурах и в полосе частот 100-500 ГГц с шириной полосы пропускания 4 ГГц.

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

3) Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы матрицы планарных кольцевых антенн с интегрированными в них СИНИС-болометрами.

4) Измерен оптический отклик матриц параллельно и последовательно соединенных антенн. Для последовательной матрицы из 25

антенн с болометрами вольт-ваттная чувствительность на излучение черного тела достигает $3 \cdot 10^9$ В/Вт; мощность насыщения превышает 5 пВт. Ампер-ваттная чувствительность для матрицы из 25 параллельно соединенных антенн с болометрами составляет $2 \cdot 10^4$ А/Вт. Исследованы спектральные характеристики различных вариантов соединения матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами.

5) Экспериментально измерены спектральные характеристики матриц кольцевых антенн с СИНИС-болометрами и различными конфигурациями расположения в приемном рупоре: облучение со стороны антенн, облучение со стороны кремния, а также при различных толщинах кремния (80 мкм, 280 мкм, 380 мкм)

6) Разработана, изготовлена и экспериментально исследована матрица кольцевых антенн типа метаматериалов с СИНИС-болометрами. Измерен оптический и спектральный отклик. Экспериментально получена вольт-ваттная чувствительность выше 10^9 В/Вт, динамический диапазон более 30 дБ, полоса пропускания более 100 Гц.

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 проведенных исследований представлены в 34 работах, в том числе в 14 статьях, из них 11 - в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, 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 доклада 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 (Гётеборг, Швеция). Автором разработана топология матриц СИНИС-болометров в среде AutoCAD, разработана 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 СИНИС-болометров, дипольных антенн, кольцевых антенн. Описаны общие концепции, параметры и реализации спектральных детекторов. 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. Произведено компьютерное моделирование диаграмм направленности кольцевых антенн в различных конфигурациях: без учета подложки, с учетом кремниевой подложки, на толстой кремниевой подложке (1.5 мм) и с линзой (12 мм). Произведена оценка СИНИС-болометра на центральную частоту 350 ГГц. Получено, что площадь СИН-переходов должна составлять 0.8 мкм^2 , емкость 14 фФ, для согласования СИНИС-болометров в кольцевой антенне с внешним электромагнитным излучением на центральной частоте 350 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 кольцевых антенн в виде метаматериала. 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. 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 кольцевых антенн в виде метаматериала, внешний диаметр 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 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 СИНИС-болометрами. Описано измерение разработанных и изготовленных полосно-пропускающих фильтров.

Относительный коэффициент пропускания составил более 0.9 (измерено методом замещения фильтра), ослабление вне полосы пропускания составило 11дБ. 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. фильтра, описание черного тела, описание криогенных установок, ЛОВ.

Исследовано влияние близости нормального металла и объема сверхпроводника на качество 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 качество перехода. 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.

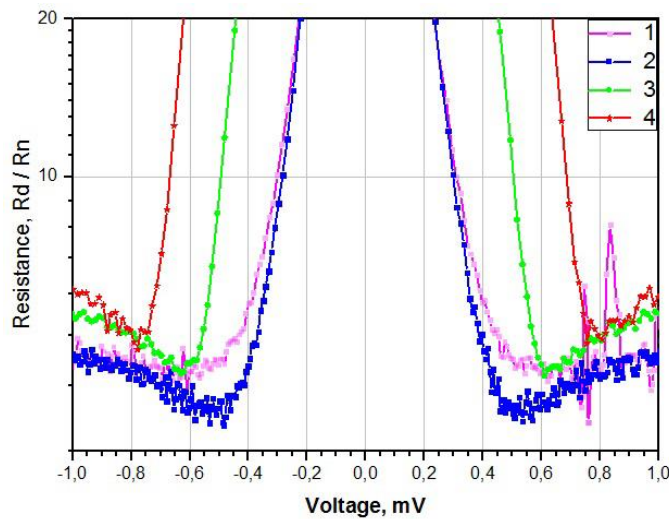


Рисунок 1. Зависимости дифференциального сопротивления от напряжения смещения для четырех модельных образцов.

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 объема сверхпроводника и его близость к нормальному металлу.

Измерены темновые ВАХ СИНИС-болометра на постоянном токе (рисунок 2). Сделан вывод о изначальном перегреве электронной системы, 450 мК при температуре криостата 270 мК, и 230 мК при 100 мК криостата. Перегрев возникает из-за просачивания высокочастотных сигналов из внешнего окружения. Для измерения квазистатического оптического отклика в качестве источника излучения использовалось черное тело, установленное внутри криостата. Чувствительность при измерении оптического отклика параллельной матрицы на излучение черного тела температурой 10 К через полосовой фильтр достигла значений $dV/dP=3.4 \cdot 10^7$ 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.

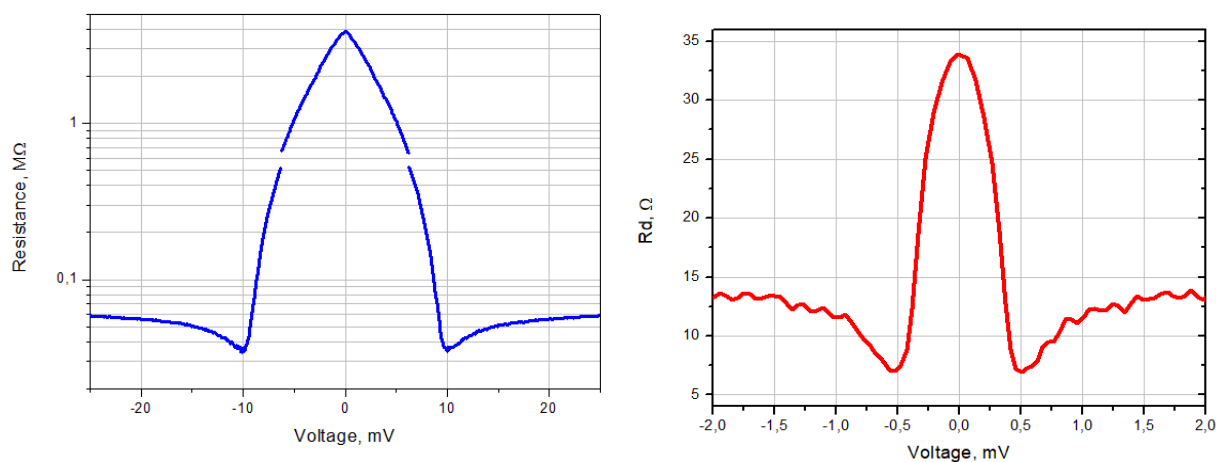


Рисунок 2. Дифференциальное сопротивление структуры из 25 колец соединенных последовательно (слева) и параллельно (справа).

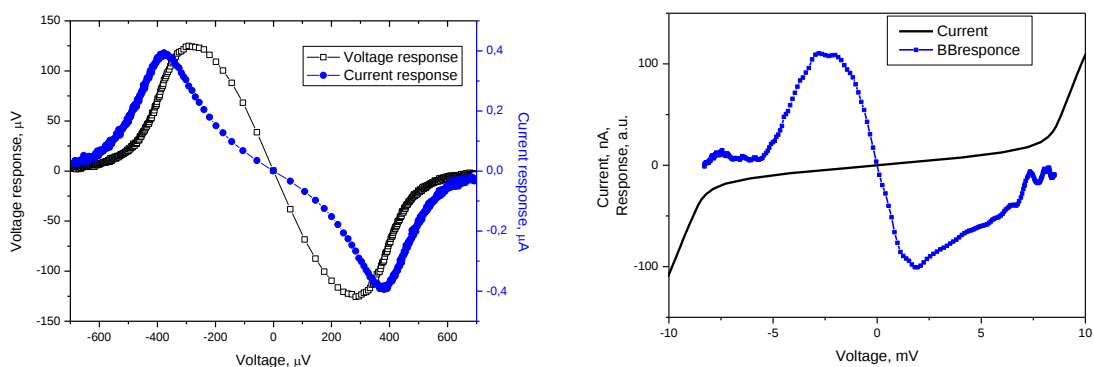


Рисунок 3. Слева: Оптический отклик матрицы параллельно соединенных антенн на излучение черного тела температурой 10K, расположенного внутри криостата. Справа: Оптический отклик матрицы последовательно соединенных антенн на излучение черного тела, расположенного снаружи криостата.

Для измерений спектрального отклика в качестве источника излучения использована лампа обратной волны в диапазоне 230-380 ГГц. Излучение проходит через три поглощающих аттенюатора, размещенных на радиационных экранах с температурами 100 К, 3 К, 0,3 К 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 4. Так же были проведены исследования влияния четвертьволнового просветляющего покрытия, и было показано, что оно улучшает чувствительность и равномерность спектрального отклика (красная кривая на рисунке 4). Для сравнения на

рисунке 4 справа представлено численное моделирование принимаемой мощности и амплитуды для одной кольцевой антенны на кремниевой подложке толщиной 280 мкм с просветляющим покрытием. Общий вид кривой совпадает с экспериментальной.

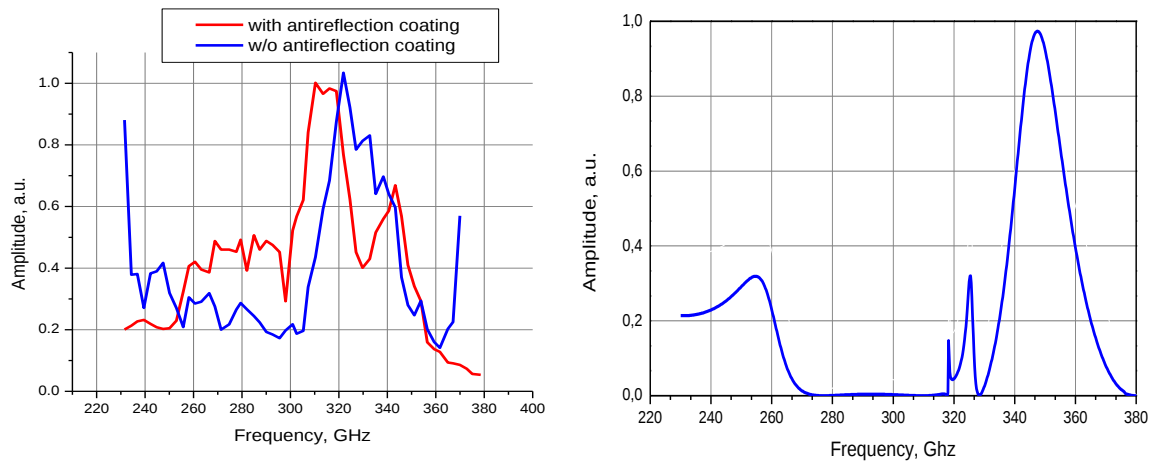


Рисунок 4. Спектральные характеристики матрицы: слева – экспериментальные результаты с просветляющим покрытием (красный) и без него (синий); справа - расчетные спектральные характеристики одиночного кольца, освещаемого плоской волной.

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. Рисунок 5.

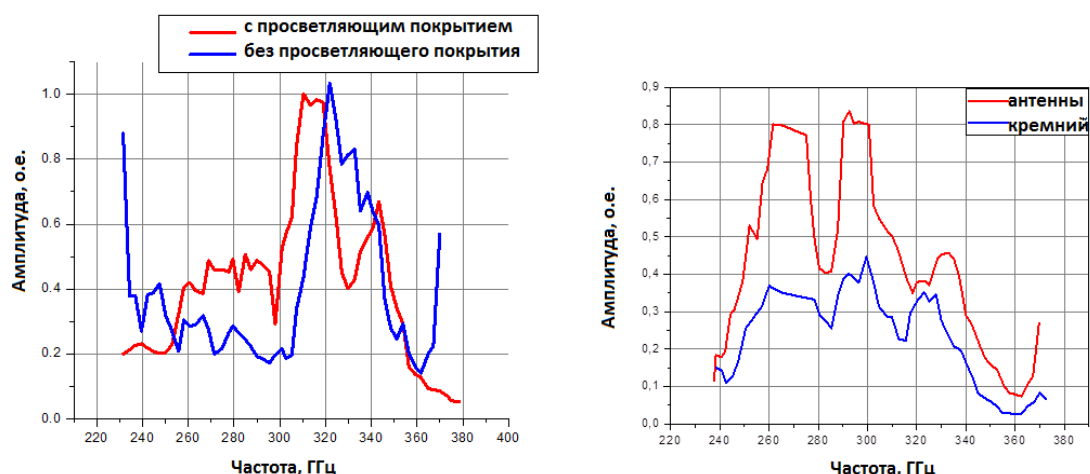


Рисунок 5 — Слева: влияние просветляющего покрытия на спектральную характеристику. Справа: спектральный отклик образцов двух типов на сигнал с ЛОВ. Красный-облучение со стороны антенны, синий-облучение со стороны диэлектрика.

Произведены измерения матриц кольцевых антенн в виде метаматериалов с распределенным абсорбером. 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 черного тела (рисунок 6) и спектральный отклик (рисунок 8). Исследуемый образец в держателе с кремниевой линзой загружается в вакуумный криостат. ЧТ, в виде напыленной пленки нихрома, на кремниевой подложке (в поздних вариантах на подложке сапфира), расположено внутри криостата. 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.

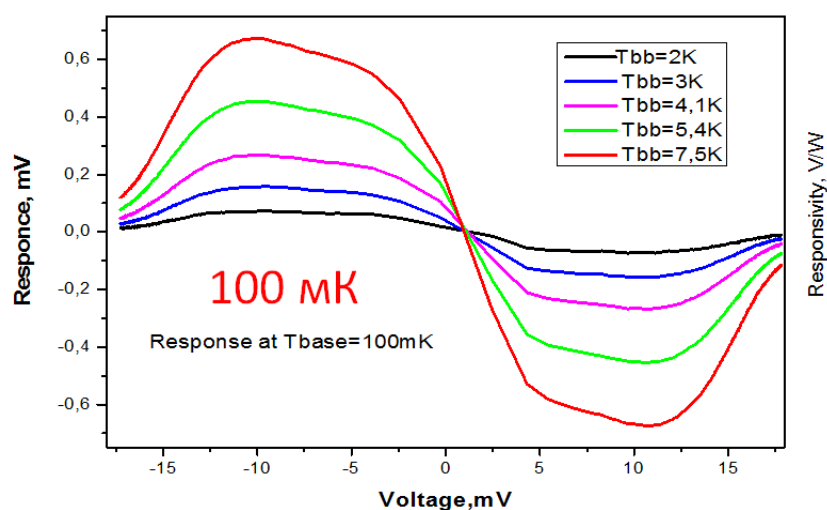


Рисунок 6. Оптический отклик на излучение черного тела при вырезаемой полосе частот 70 ГГц, центральной частоте 345 ГГц, температура черного тела 2,3,4.1,5.4,7.5К.

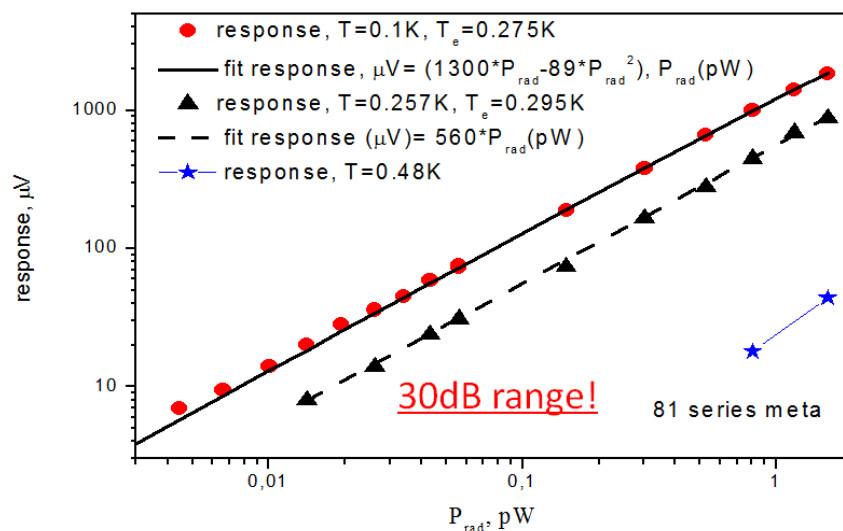


Рисунок 7. Динамический диапазон принимаемой мощности матрицы метаматериала с СИНИС-боллометрами составил более 30 дБ.

При измерении спектрального отклика в качестве источника использовали лампу обратной волны (ЛОВ). Сигнал от ЛОВ, проходя через окна криостата, поступает на исследуемый образец. Измеренный оптический и спектральный отклики системы представлены на рисунке 10. Неоднородность и изрезанность спектрального отклика по большей части связана с неидеальностью квазиоптического тракта из-за трех оптических окон на разных температурных ступенях.

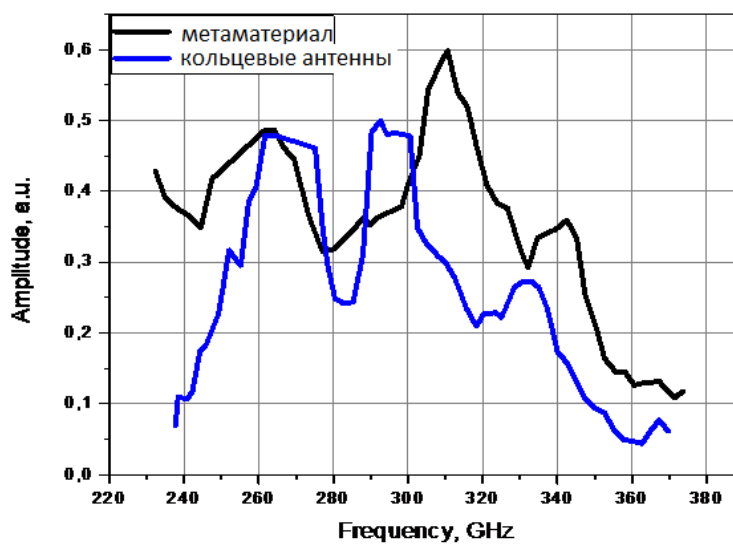


Рисунок 8 Сравнение спектрального отклика метаматериала и кольцевых антенн размера в полдлины волны на облучение с ЛОВ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны, изготовлены и измерены фильтры для криогенных измерений: полосно-пропускающий и перестраиваемый 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 низких температурах и в полосе частот 100-500 ГГц с шириной полосы пропускания 4 ГГц.
2. Разработана методика изготовления матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными в них СИНИС-боллометрами без дополнительного слоя «тонкого золота». Это позволило улучшить теплоотвод финальной

структуры за счет более толстого слоя (200 нм против 35 нм ранее) нормального металла, используемого для формирования массивов антенн.

3. Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы матрицы планарных кольцевых антенн с интегрированными в них СИНИС-болометрами с центральной частотой 345 ГГц для приема внешнего электромагнитного излучения с МЭШ 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 и различными конфигурациями включения в интегрирующую полость: при различных толщинах кремния и при облучении, как с обратной стороны подложки, так и со стороны антенны.
6. Разработана, изготовлена и экспериментально исследована матрица приемных устройств типа метаматериалов 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. Так, использование матрицы кольцевых антенн типа метаматериала позволило увеличить полосу пропускания и увеличить мощность насыщения до 80 пВт в сравнении с матрицей кольцевых антенн с характерным размером в полдлины волны, расположенной на той же площади образца.

**Публикации по теме диссертации 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. – 2015. – №2. – С. 56-57.
- [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] Тарасов М.А., Махашабде С., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю., Юсупов Р.А., Чекушкин А.М., Ермаков А.Б., Соболев А.С., Эдельман В.С., Мансфельд М.А., Вдовин В.Ф. Матрица кольцевых антенн диапазона с криогенными болометрами 345 ГГц в интегрирующей полости // Журнал радиоэлектроники – 2017. – №1.
- [A4] Чекушкин А.М., Тарасов М.А., Юсупов Р.А., Гунбина А.А., Эдельман В.С. Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффекта близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах // Труды МФТИ. — 2018. — Т.10, № 2. — С. 90–94.
- [A5] Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Эдельман В.С., Соболев А.С., Тарасов М.А., Матрицы метаматериалов с интегрированными СИНИС-болометрами // Нелинейный мир. – 2019. – №1, – 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. – 2013. – Vol. 26. – P.085020. 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 //Applied Physics Letters. – 2017. – T. 110. – №. 24. – C. 242601. 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. – T. 969. – №. 1. – C. 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. – 2018. – Vol. 195. – Article Number 05009. – Number of page(s) 2. 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. – 2018. – Vol. 195. – Article Number 05010. – Number of page(s) 2. DOI: 10.1051/epjconf/201819505010
- [A11] M. Tarasov, A. Sobolev, A. Gunbina, G. Yakopov, **A. Chekushkin**, R. Yusupov, S. Lemzyakov, V. Vdovin and V. Edelman. Annular antenna array metamaterial with SINIS bolometers // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol.125. – Issue 17, 174501. DOI: 10.1063/1.5054160

Тезисы докладов и доклады на конференциях:

- [A12] 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.
- [A13] 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.
- [A14] **Чекушкин А.М.**, Тарасов М.А., Кузьмин Л.С., «Криогенные микротермометры на основе массива СИН переходов», устный доклад

на 56-й научной конференции МФТИ, 25-30 ноября, 2013, Долгопрудный.

- [A15] 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.
- [A16] **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
- [A17] M.Tarasov, **A.Chekushkin**, L.Jonsson, L.Kuzmin, Grid interferometer for spectral calibration of cryogenic bolometers, The 14th Int.Workshop, “High frequency Superconducting Electronics.”, Bjorkliden, Kiruna, Sweden, 10-16 April, 2016.
- [A18] **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 Superconducting Electronics.”, Bjorkliden, Kiruna, Sweden, 10-16 April, 2016.
- [A19] **Чекушкин А.М.**, Дубрович В.К., Завьялов В.В., Саянский А.Е., Кузьмин Л.С., Тарасов М.А. Криогенные спектральные анализаторы для многочастотных приемных систем мм и субмм диапазонов // DAWN-2016, 20-24 июня 2016, Санкт-Петербург, Россия.
- [A20] **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
- [A21] 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

- [A22] **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.
- [A23] Тарасов М.А., Махашабде С., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю., Юсупов Р.А., Ермаков А.Б., **Чекушкин А.М.**, Соболев А.С., Эдельман В.С., Мансфельд М.А., Вдовин В.Ф., Матрица кольцевых антенн диапазона 345 ГГц с криогенными болометрами в интегрирующей полости // Сборник трудов V Всероссийской микроволновой конференции/ Москва, 2017 С. 304-308
- [A24] 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
- [A25] 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.
- [A26] 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.
- [A27] 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.

[A28] 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.

[A29] 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.

[A30] 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:

[A31] 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

[A32] Тарасов М.А, **Чекушкин А.М.**, Юсупов Р.А, Способ изготовления устройств со свободно висящими микромостиками, Патент № 2632630. Дата государственной регистрации 06.10.2017

[A33] 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

[A34] 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