

На правах рукописи



ЧЕКУШКИН Артем Михайлович

**Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-
детекторами и матрицы криогенных фильтров**

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2022

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:

Константин Юрьевич Арутюнов,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий научно-учебной
лаборатории квантовой
наноэлектроники Московского
института электроники и математики
им. А.Н. Тихонова, специальность
01.04.09 – «Физика низких температур».
Третьяков Иван Васильевич, кандидат
физико-математических наук, старший
научный сотрудник лаборатории
терагерцовых приборов и технологий
отдела приемопередающих комплексов
АКЦ ФИАН, специальность 01.04.03
«Радиофизика».

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский
педагогический государственный
университет», г. Москва

Защита диссертации состоится «08» июля 2022 г., в «12:00», на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 (Д002.231.02), созданного 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 « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Кузьмин
Лев Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время активно развиваются инструменты для различных задач, направленных на исследование реликтового излучения Вселенной таких как Миллиметрон, BOOMERANG, OLIMPO, LSPE, БТА, СУФФА. 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). Для радиотелескопов, находящихся на поверхности Земли необходимы чувствительные приемные системы с широким динамическим диапазоном; требуется способность работать при высокой фоновой мощности (порядка 5-80 пВт). 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 некогерентных детекторов. 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 сверхпроводниковых детекторов. В качестве прототипа подобных приемных устройств может служить матрица кольцевых антенн с детекторами на основе Сверхпроводник-Изолятор-Нормальный металл-Изолятор-Сверхпроводник (СИНИС). Характеристики приемных матриц на основе СИНИС-детекторов (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-детекторов можно назвать болометр на краю сверхпроводящего перехода (БКП, в англоязычной литературе TES), а также детектор на кинетической индуктивности (KID). Каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. Быстродействие БКП обычно составляет несколько миллисекунд. Однако, как и у СИНИС-детектора, 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-детекторах подобного снижения нет, что позволяет достигать чувствительности на уровне 10^{-17} - 10^{-18} Вт/Гц^{1/2}. Если проводить сравнение с KID, то в болометрах на кинетической индуктивности ограничение в предельную чувствительность детектора вносит генерационно-рекомбинационный шум, возникающий в малом объеме сверхпроводника после поглощения в нем фотона. В СИНИС-детекторе 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 представлены в Главе 1.

Цель настоящей диссертационной работы:

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

- 1) Разработка матриц планарных кольцевых антенн мм и субмм диапазонов с интегрированными СИНИС-детекторами, 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, тонкопленочных фильтров, матриц капиллярных фильтров. Они необходимы для проведения измерений вольт-ваттных, ампер-ваттных и спектральных характеристик матриц планарных кольцевых антенн в криостатах при температурах 0,1 и 0,3 К, а также могут быть использованы на радиотелескопах для выделения требуемой полосы частот
- 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 различных типов: структуры стандартного размера (полуволновые антенны) и электрически малых антенн.

Научная новизна

- Для спектральной калибровки матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами впервые предложена и реализована оригинальная конструкция компактного перестраиваемого сеточного криогенного фильтра на основе интерферометра Фабри-Перо, позволяющего проводить калибровку детекторов. Данный прибор был помещен в криостат, была

продемонстрирована перестройка центральной частоты в диапазоне 100-500 ГГц, ширина полосы пропускания 4 ГГц.

- Детально изучено влияние близости нормального металла и объема сверхпроводника на работу СИН-переходов. Впервые экспериментально показано, что большой объем сверхпроводника (V) ($V_A/V_{SIN}=200$ в сравнении с $V_A/V_{SIN}=3$) 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-детекторов.
- Впервые предложены, разработаны и исследованы три типа матриц электрически малых кольцевых антенн, в которые интегрированы СИНИС-детекторы. Использование кольцевых антенн, существенно меньшего размера, чем длина волны, позволяет значительно повысить плотность компоновки СИНИС-детекторов, 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-детекторами, использованы в качестве прототипа приемника для исследований в области радиоастрономии.
- 2) Разработанный, изготовленный и измеренный криогенный перестраиваемый фильтр использован для проведения спектрального анализа с помощью матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-детекторами, на наземных телескопах или аэростатных миссиях.
- 3) Измерены разработанные и изготовленные полосно-пропускающие фильтры. 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. Размер и полученные характеристики фильтров позволяют использовать их для проведения измерений внутри криостатов.
- 4) Изготовленные и измеренные матричные капиллярные волноводные фильтры длиной 2 и 4 мм использованы как фильтры низких частот в криогенных установках.
- 5) Полученный рекордный отклик по напряжению на внешнее электромагнитное излучение для матриц кольцевых антенн, с интегрированными в них СИНИС-детекторами, с характерным диаметром кольца равным половине длины волны ($3 \cdot 10^9$ В/Вт на частоте 345 ГГц), позволит проводить точные измерения для приема и оценки проходящего электромагнитного излучения на радиотелескопах.

б) Для согласования падающего электромагнитного 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-детектора) для освещения со стороны антенн.

7) Разработанные матрицы электрически малых кольцевых антенн, позволят повысить плотность компоновки СИНИС детекторов, что увеличит допустимую приемную мощность, необходимую для работы в условиях высокой фоновой нагрузки. Полученный отклик по напряжению ($2,8 \cdot 10^9$ В/Вт) для матриц электрически малых антенн позволяет использовать их наравне с матрицами стандартных кольцевых антенн. Экспериментально продемонстрирован 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-детектора 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-детекторами 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 He3 (температура 273 мК), а также криостат растворения, созданный В.С. Эдельманом в институте физических проблем им. П.Л.Капицы (минимальная температура 100 мК) [10], 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.

5. В рамках данной диссертационной работы было проведено два типа исследований: измерение оптического отклика матриц планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами 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:

1) Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами позволяют проводить прием внешнего электромагнитного излучения на центральной частоте 345 ГГц с чувствительностью не хуже $2,6 \cdot 10^9$ В/Вт. В частности, для последовательной матрицы из 25 антенн с детекторами 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 детекторами составляет $2 \cdot 10^4$ А/Вт. Такие приемные устройства способны работать в полосе частот 240-370 ГГц с мощностью эквивалентной шуму не хуже 10^{-17} Вт/Гц^{1/2}.

2) Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами необходимо располагать антеннами навстречу внешнему излучению. Подобное расположение образцов позволяет добиться более мощного и однородного приема сигнала.

3) Полосно-пропускающие фильтры имеют полосу пропускания 10-90 ГГц и ослабление вне полосы порядка 10 дБ. Перестраиваемый криогенный фильтр способен работать при криогенных температурах (до 0,1 К) и в полосе частот 100-500 ГГц с шириной полосы пропускания 4 ГГц. Капиллярные фильтры имеют коэффициент пропускания 40% и ослабление сигнала ниже частоты отсечки в 40 дБ.

4) Использование технологии теневого напыления при изготовлении экспериментальных образцов позволило уменьшить количество технологических этапов. Это позволило улучшить теплоотвод финальной структуры за счет более толстого слоя нормального металла, используемого для формирования массивов антенн (200 нм против 35 нм ранее).

5) Матрица электрически малых антенн с СИНИС-детекторами, с характерным диаметром кольца 54 мкм имеет вольт-ваттную 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 в сравнении с матрицей стандартных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами.

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 55 работах, в том числе 28 – статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, из них входящих в международные базы данных 23, а также в 22 докладах на международных и российских конференциях с публикацией расширенных тезисов, получено 6 патентов. Работы публиковались в ведущих специализированных изданиях: Superconductor Science and Technology, Applied Physics Letters, Journal of Physics, Journal of Applied Physics, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Радиотехника и электроника.

Публикации по материалам диссертации полностью отражают ее 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-детекторов в среде AutoCAD, разработана методика изготовления и изготовлены образцы детекторов 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-детекторов 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. Описаны фильтры мм и суб-мм диапазонов.

Во второй главе произведен расчет параметров СИНИС-детектора на центральную частоту 345 ГГц. Получено, что площадь СИН-переходов должна составлять 0,8 мкм², емкость 14 фФ, для согласования СИНИС-детекторов 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-детекторами. Получено, что такой вид матриц может существенно (более чем в 40 раз) повысить плотность расположения СИНИС-детекторов, 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-детекторами. 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 диаметр

54 мкм, ширина 15 мкм. В качестве материалов для СИНИС-детекторов 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-детекторов 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-детектором. 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.

В четвертой главе предложены и исследованы различные фильтры для выделения требуемой полосы частот: полосно-пропускающие фильтры, перестраиваемый фильтр на основе интерферометра Фабри-Перо и капиллярный фильтр на основе волноводов. Разработаны, изготовлены и исследованы 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 на основе интерферометра Фабри-Перо. Расчет фильтра проводился для диапазона частот от 50 до 1000 ГГц. Значение добротности составило 34. Минимально возможная перестройка фильтра по частоте 1 ГГц. Коэффициент пропускания составил 0,4, ширина полосы пропускания 4 ГГц для центральной частоты 280 ГГц и 20 ГГц для центральной частоты 420 ГГц. Представлена идея и реализован фильтр на основе матрицы из тонких волноводов. Изготовлена

серия капиллярных матричных фильтров с различными длинами капилляров (1-4 мм) и диаметром 0,54 мм. Затухание фильтра составило более 40 дБ на частотах ниже 200 ГГц. На частотах выше 350 ГГц затухание не превышает 5 дБ, что соответствует теоретическому расчету.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию спектральных и сигнальных параметров матриц кольцевых антенн с интегрированными в них СИНИС-детекторами.

Исследовано влияние близости нормального металла и объема сверхпроводника на свойства СИН-переходов. Было показано, что больший объем сверхпроводника ($V_{Al}/V_{SIN}=200$ против $V_{Al}/V_{SIN}=3$) и удаленность от нормального металла от сверхпроводника на 5 мкм вместо 2 мкм заметно улучшают свойства переходов. Были исследованы образцы с двумя последовательно соединенными СИНИС-структурами. Дифференциальные сопротивления этих образцов приведены на рисунке 1, нумерация на графике следующая:

1) сверхпроводящие электроды лежат поверх толстой (200 нм) трехслойной структуры из металлов Ti/Au/Pd, расстояние до нормальной ловушки 2 мкм. Наблюдаем уменьшение значения сверхпроводящей щели от табличных 185 мкВ до 125 мкВ;

2) конфигурация аналогична первой, но сверхпроводящие электроды лежат на тонком (35 нм) слое из Ti/Pd. В первом и втором случаях отношение площади сверхпроводящего алюминия к площади СИН-перехода (S_{Al}/S_{SIN} - составляет всего 3). Видно, что значение сверхпроводящей щели сравнимо с первым случаем (125 мкВ);

3) В структуре была значительно увеличена площадь сверхпроводящего алюминия ($S_{Al}/S_{SIN}=200$), сверхпроводящий электрод лежит на тонкой двухслойной структуре из металлов Ti/Pd, но расстояние от СИН перехода до нормального металла такое же, как и в предыдущих двух случаях (2 мкм). В этом случае наблюдаемое значение энергетической щели в сверхпроводнике 150 мкВ.;

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. Для этого образца значение сверхпроводящей щели для одного СИН-перехода составило 187 мкВ, что близко к табличным значениям.

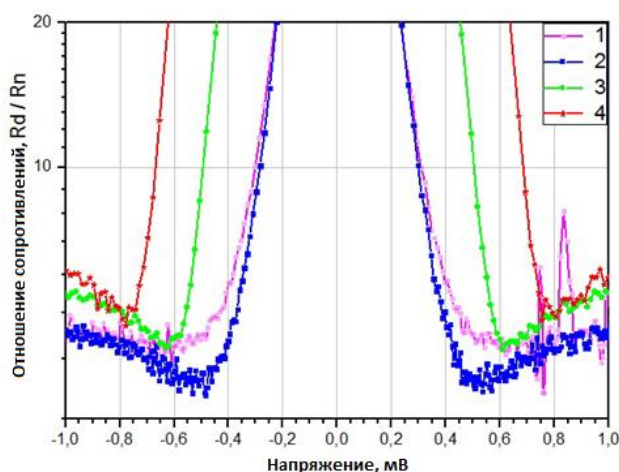


Рисунок 1. Зависимости дифференциального сопротивления от напряжения смещения для четырех модельных образцов, которые представляют собой 2 последовательных СИНИС-детектора.

Из рисунка 1 можно сделать вывод, что толщина электродов из 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. Последний является доминантным параметром.

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

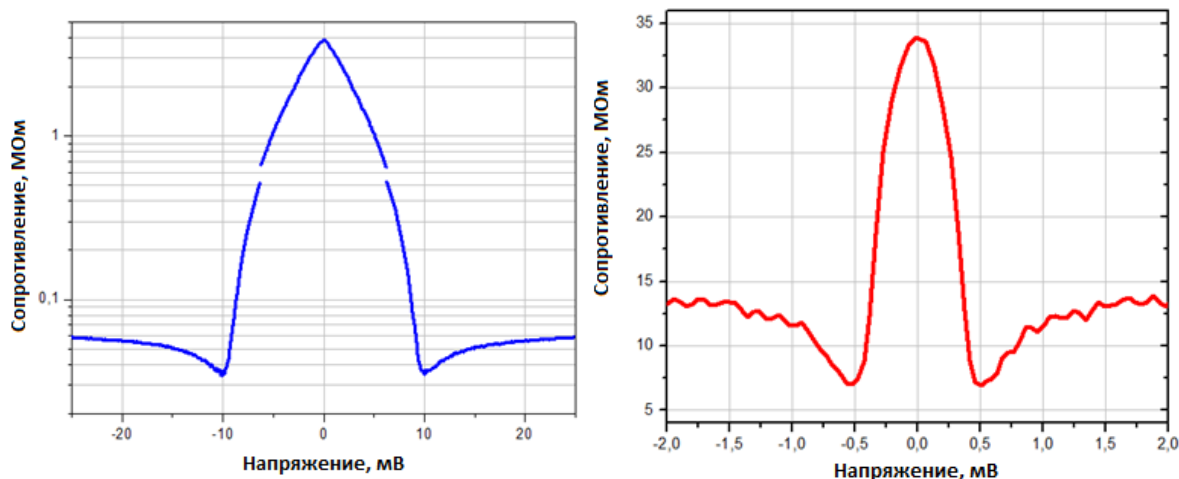


Рисунок 2. Дифференциальное сопротивление структуры из 25 колец соединенных последовательно (слева) и параллельно (справа).

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-детекторами на излучение ЧТ 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.

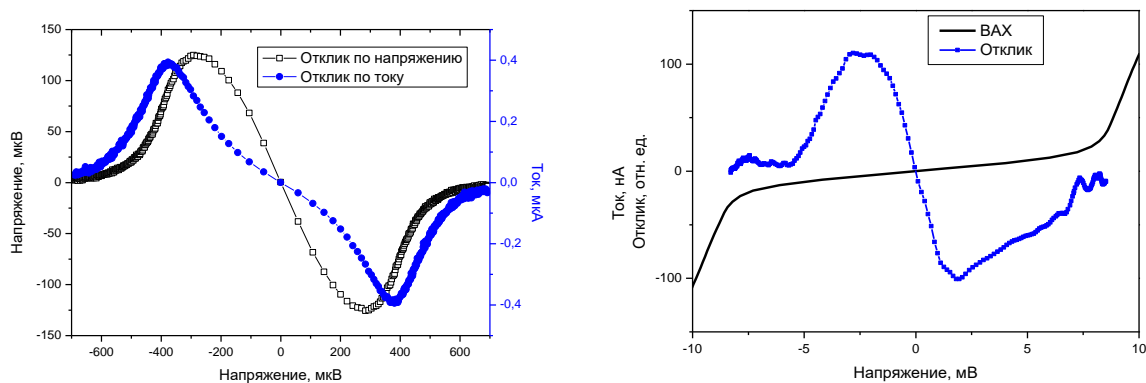


Рисунок 3. Слева: Оптический отклик матрицы параллельно соединенных антенн на излучение черного тела температурой 10К, расположенного внутри криостата
Справа: Оптический отклик матрицы последовательно соединенных антенн на излучение черного тела, расположенного снаружи криостата

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 $2,6 \cdot 10^9$ В/Вт для 30 фВт до $5 \cdot 10^8$ В/Вт для 3 пВт. Исследуемые образцы находились при температуре 100 мК.

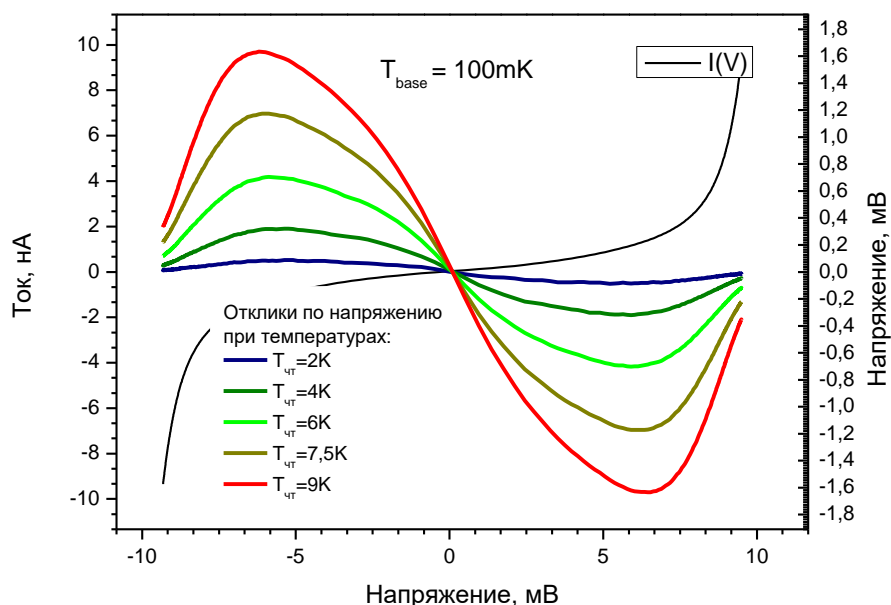


Рисунок 4. Оптический отклик по напряжению для матрицы 25 кольцевых антенн, соединенных последовательно, для температур ЧТ 2-9 К. VCC - ВАХ матрицы без облучения.

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 К, 3 К, 0,3 К с ослаблением более 20 дБ, фильтр низких частот и полосно-пропускающий фильтр. Одновременно измерялись сигнал от детектора 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.

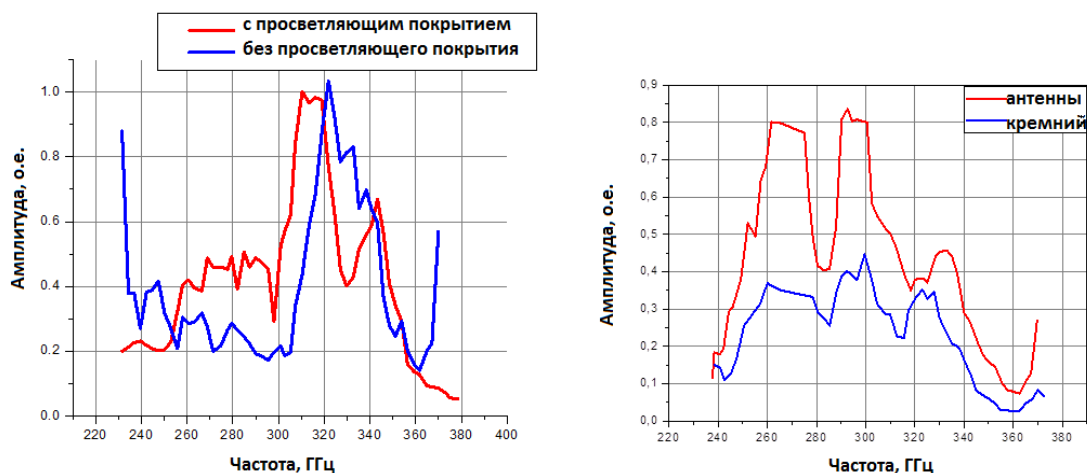


Рисунок 5 Слева: влияние просветляющего покрытия на спектральную характеристику. Справа: спектральный отклик образцов двух типов на сигнал с ЛОВ. Красный-облучение со стороны антенны, синий-облучение со стороны диэлектрика.

Произведены измерения матриц электрически малых кольцевых антенн с СИНИС-детекторами. 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 (рисунок 8). 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.

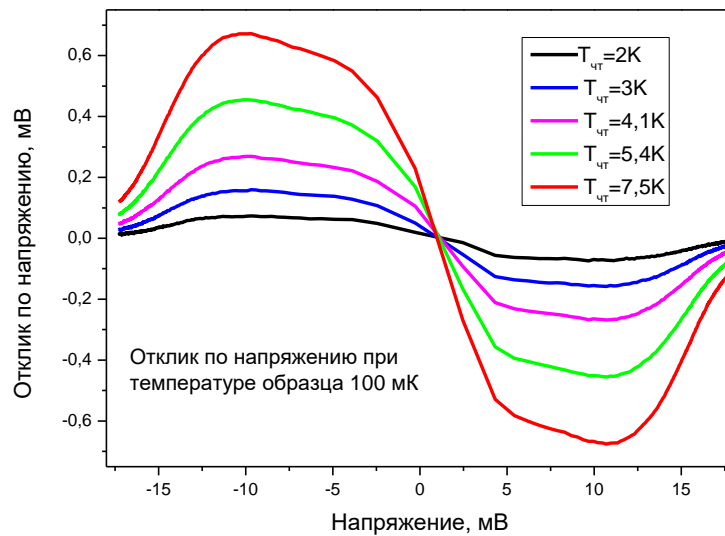


Рисунок 6. Экспериментально измеренный отклик по напряжению на излучение черного тела для последовательной матрицы из 81 электрически малой антенны при температурах ЧТ от 2 К до 7,5 К. Температура образца 100 мК.

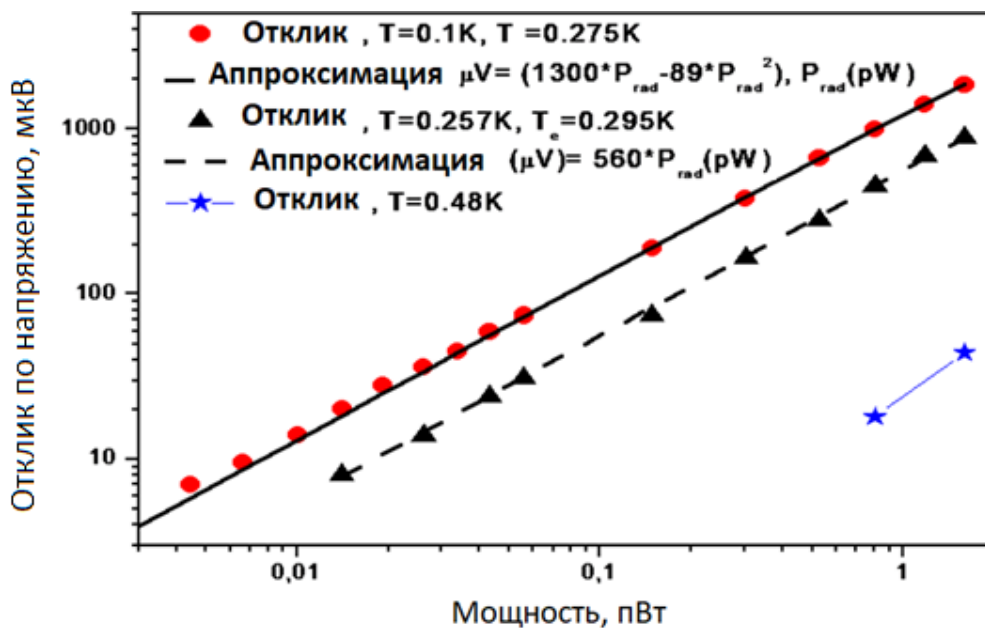


Рисунок 7. Динамический диапазон принимаемой мощности матрицы из 81 ЭМА с СИНИС-детекторами составил более 30 дБ. Антенны соединены последовательно.

При измерении спектрального отклика в качестве источника использовали лампу обратной волны (ЛОВ). Сигнал от ЛОВ, проходя через окна криостата, поступает на исследуемый образец. Результаты спектральных измерений кольцевых антенн с СИНИС-детекторами и кольцевых электрически малых антенн с СИНИС-детекторами представлены на рисунке 8.

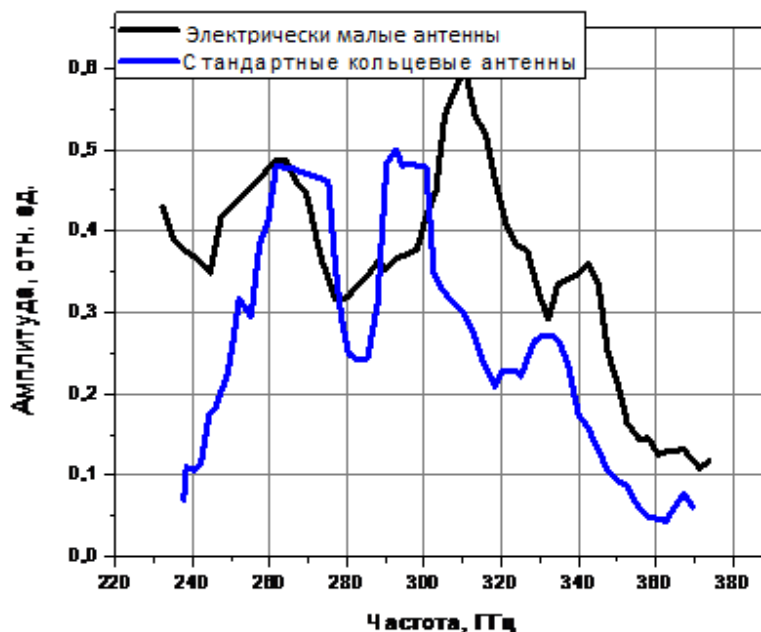


Рисунок 8 Сравнение спектрального отклика электрически малых кольцевых антенн и кольцевых антенн с характерным размером в полдлины волны на облучение с ЛОВ.

Неоднородность и изрезанность спектрального отклика по большей части связана с не идеальностью квазиоптического тракта из-за трех оптических окон на разных температурных ступенях. Общее падение спектрального отклика на частотах ниже 350 ГГц связано с полосой пропускания фильтра.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны, изготовлены и измерены квазиоптические фильтры для криогенных электромагнитных измерений: полосно-пропускающие, перестраиваемый на основе интерферометра Фабри-Перо, капиллярные матричные фильтры. 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. Волноводные фильтры с характерным диаметром волновода 0,54 мм имеют пропускание выше 350 ГГц на уровне 40%. Затухание на частотах ниже 200 ГГц более 40 дБ.

2. Разработана и успешно использована методика изготовления матриц планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-детекторами, в которых убран слой «тонкого золота». Это позволило упростить технологическую карту изготовления образцов, 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 матрицы планарных кольцевых антенн для приема внешнего электромагнитного излучения диапазона 345 ГГц с интегрированными в них СИНИС-детекторами. 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 кольцевых антенн с характерным диаметром 300 мкм. Для последовательной матрицы из 25 антенн с детекторами 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 детекторами составляет $2 \cdot 10^4$ А/Вт.

5. Экспериментально измерены спектральные характеристики матриц кольцевых антенн с СИНИС-детекторами. Ширина полосы пропускания превышает 100 ГГц. Исследовано влияние расположения образца на однородность и мощность приема сигнала при облучении: с обратной стороны подложки, со стороны антенн.

6. Разработана, изготовлена и экспериментально исследована приемная матрица электрически малых антенн с СИНИС-детекторами, характерный диаметр кольца антенны 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 130 ГГц. Использование матрицы кольцевых антенн типа метаматериала позволило увеличить полосу пропускания в сравнении с матрицей полуволновых кольцевых антенн.

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 детекторов // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №. 1.
- [A3] М.А. Тарасов, С. Махашабе, 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 детекторами 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-детекторами// Нелинейный мир, №1, 2019, С.74-78

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

- [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 детекторами в интегрирующей полости// *Радиотехника и электроника*. — 2020. — Т.65, № 1. — С. 65–74.)
- [A14] A.A.Gunbina, M.A.Tarasov, S.A.Lemzyakov, A.M.Chekushkin, R.A.Yusupov, D.V.Nagirnaya, M.A.Mansfeld, V.F.Vdovin, D.Winkler, A.S.Kalaboukhov, V.S.Edelman, Spectral response of arrays of half-wave and electrically small antennas with SINIS bolometers, *Physics of Solid State*, 2020, vol. 62, No. 9, pp. 1504-1611 DOI: 10.1134/S1063783420090097. А.А. Гунбина, М.А. Тарасов, С.А. Лемзяков, А.М. Чекушкин, Р.А. Юсупов, Д.В. Нагирная, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, Д. Винклер, А.С. Калабухов,

В.С. Эдельман, Спектральный отклик матриц полуволновых и электрически малых антенн с СИНИС детекторами, Нанозифика и нанозлектроника, XXIV Междунар. симп., 10-13 марта 2020, Н.Новгород, т. 1, с. 56-57. Физика твердого тела, 2020, в. 9, стр. 1440-1446 DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49767.35H.

- [A15] M.A. Tarasov, S. Mahashabde, A.A. Gunbina, R.A. Yusupov, A.M. Chekushkin, S.A. Lemzyakov, D.V. Nagirnaya, M.A. Mansfeld, V.F. Vdovin, A.S. Kalaboukhov, D. Winkler, SINIS bolometer with microwave readout, *Physics of Solid State*, 2020, vol. 62, No. 9, pp. 1580-1584 DOI: 10.1134/S1063783420090292. М.А. Тарасов, С. Махашабде, А.А. Гунбина, Р.А. Юсупов, А.М. Чекушкин, С.А. Лемзяков, Д.В. Нагирная, М.А. Мансфельд, В.Ф. Вдовин, В.С. Эдельман, Д. Винклер, А.С. Калабухов, СИНИС детектор с микроволновым считыванием, Нанозифика и нанозлектроника, XXIV Междунар. симп., 10-13 марта 2020, Н.Новгород, т. 1, с. 120-121. Физика твердого тела, 2020, в. 9, стр. 1415-1419 DOI: 10.21883/FTT.2020.09.49763.17H.
- [A16] R.A. Yusupov, A.A. Gunbina, A.M. Chekushkin, D.V. Nagirnaya, S.A. Lemzyakov, V.S. Edelman, M.A. Tarasov, Quantum response of a bolometer based on the SINIS structure with a suspended absorber, *Physics of Solid State*, 2020, vol. 62, No. 9, pp. 1567-1570 DOI: 10.1134/S106378342009036X. Р.А. Юсупов, А.А. Гунбина, А.М. Чекушкин, Д.В. Нагирная, С.А. Лемзяков, В.С. Эдельман, М.А. Тарасов, Квантовый отклик детектора на основе структуры СИНИС с подвешенным абсорбером, Нанозифика и нанозлектроника, XXIV Междунар. симп., 10-13 марта 2020, Н. Новгород, т. 1, с. 144-145. Физика твердого тела, 2020, в. 9, стр. 1403-1406, DOI 10.21883/FTT.2020.09.49761.11H.
- [A17] Yu.Yu. Balega, A.M. Baryshev, G.M. Bubnov, V.F. Vdovin, S.N. Vdovichev, A.A. Gunbina, P.N. Dmitriev, V.K. Dubrovich, I.I. Zinchenko, V.P. Koshelets, S.A. Lemzyakov, D.V. Nagirnaya, K.I. Rudakov, A.V. Smirnov, M.A. Tarasov, L.V. Filippenko, V.B. Haikin, A.V. Khudchenko, A.M. Chekushkin, V.S. Edelman, R.A. Yusupov, G.V. Yakopov, Superconducting receivers for space, balloon, and ground-based sub-terahertz radio telescopes, *Radiophysics and Quantum Electronics*, Vol. 63, No. 7, Dec. 2020, pp. 479-500, DOI: 10.1007/s11141-021-10073-z. Ю.Ю. Балегга, А.М. Барышев, Г.М. Бубнов, В.Ф. Вдовин, С.Н. Вдовичев, А.А. Гунбина, П.Н. Дмитриев, В.К. Дубрович, И.И. Зинченко, В.П. Кошелец, С.А. Лемзяков, Д.В. Нагирная, К.И. Рудаков, А.В. Смирнов, М.А. Тарасов, Л.В. Филиппенко, В.Б. Хайкин, А.В. Худченко, А.М. Чекушкин, В.С. Эдельман, Р.А. Юсупов, Г.В. Якопов, Сверхпроводниковые приемники для космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых телескопов, *Изв. ВУЗов Радиофизика*, т.63, №7,2020, с. 533-556.
- [A18] M. Tarasov, A. Gunbina, R. Yusupov, A. Chekushkin, D. Nagirnaya, S. Lemzyakov, V. Vdovin, V Edelman, A. Kalaboukhov, D. Winkler, Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer, *IEEE TAS 2021*, vol. 31, No 5, Aug.2021, P. 2300105, DOI: 10.1109/TASC.2021.3057327
- [A19] A.A. Gunbina, S. Mahashabde, M.A. Tarasov, G.V. Yakopov, R.A. Yusupov, A.M. Chekushkin, D.V. Nagirnaya, S.A. Lemzyakov, V.F. Vdovin, A.S. Kalaboukhov, D. Winkler, A 90 GHz SINIS detector with 2 GHz readout, *IEEE TAS*, vol. 31, No 5, 1500805, Aug. 2021, DOI: 10.1109/TASC.2021.3068999
- [A20] M. Tarasov, A. Gunbina, S. Lemzyakov, M. Fominsky, A. Chekushkin, G. Yakopov, V. Vdovin, V. Edelman, Matrices of SINIS detectors for Terahertz radioastronomy, *Bulletin of*

the Lebedev Physics Institute, 2021, vol. 48, No 9, pp. 262-267; DOI: 10.3103/S1068335621090086. М. Тарасов, А. Гунбина, С. Лемзяков, М. Фоминский, А. Чекушкин, Г. Якопов, В. Вдовин, В. Эдельман, Матрицы детекторов сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник для терагерцевой радиоастрономии, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, с. 10-18, 2021.

- [A21] M. Tarasov, A. Gunbina, S. Lemzyakov, D. Nagirnaya, M. Fominsky, A. Chekushkin, V. Koshelets, E. Goldobin, A. Kalaboukhov, Development of Josephson travelling-wave parametric amplifier based on aluminum SIS junctions, *Phys. of Sol. State*, 2021, Vol. 63, No.9, pp.1377-1381. DOI: 10.1134/S1063783421090419. Тарасов М., Гунбина А., Лемзяков С., Нагирная Д., Фоминский М., Чекушкин А., Кошелец В., Голдобин Э., Калабухов А., Разработка джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на основе алюминиевых СИС-переходов, *Физика твердого тела*, 2021, вып. 9, стр. 1223, DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51242.11H.
- [A22] M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, V. Vdovin, A. Kalaboukhov, Arrays of sub-terahertz cryogenic metamaterial, *Appl. Sci.* 2021, 11, 9649; DOI: 10.3390/app11209649.
- [A23] M. Tarasov, A. Gunbina, M. Fominsky, A. Chekushkin, V. Vdovin, V. Koshelets, E. Sohina, A. Kalaboukhov, V. Edelman, Fabrication of NIS and SIS nanojunctions with aluminum electrodes and studies of magnetic field influence on IV curves, *Electronics* 2021, 10, 2894; DOI: 10.3390/electronics10232894.
- [A24] M. Tarasov, V. Edelman, S. Lemzyakov, A. Gunbina, R. Yusupov, A. Chekushkin, D. Nagirnaya, V. Vdovin, A. Kalaboukhov, Cryogenic MIMIM and SIMIS microwave detectors, 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), 25-27 Nov 2020, pp.25-27, Moscow, Russia, DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312267.
- [A25] Фоминский М. Ю. и др. Изготовление сверхпроводниковых туннельных структур с использованием электронно-лучевой литографии //Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – №. 9. – С. 1228-1232.
- [A26] Чекушкин А. М. и др. Оптимизация режимов изготовления пленок Nb, NbN, NbTiN и высококачественных туннельных переходов на их основе для приемных структур терагерцевого диапазона //Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №. 10. – С. 1577-1582.
- [A27] Artem M. Chekushkin, Lyudmila V. Filippenko, Vadim V. Kashin, Mikhail Yu. Fominskiy, Valery P. Koshelets. Investigation of thin films for fabrication of Nb/AlN/NbN tunnel junctions and microstrip lines of NbTiN-SiO₂-Al. *RENSIT*, 13(4), 419-426, 2021, DOI: [10.17725/rensit.2021.13.419](https://doi.org/10.17725/rensit.2021.13.419)
- [A28] Fominsky, M. Y., Filippenko, L. V., Chekushkin, A. M., Dmitriev, P. N., & Koshelets, V. P. (2021). Fabrication of Superconducting Nb–AlN–NbN Tunnel Junctions Using Electron-Beam Lithography. *Electronics*, 10(23), 2944.

Публикации в книгах:

- [A29] А.А. Гунбина, М.А. Тарасов, М.Ю. Фоминский, А.М. Чекушкин, Р.А. Юсупов, Д.В. Нагирная, Fabrication of aluminum nanostructures for microwave detectors based on tunnel junctions, chapter in the book “Advances in Microelectronics: Reviews, Vol.3” 2021, ISBN: 978-84-09-33338-7 e-ISBN: 978-84-09-33339-4 pp. 183-212

Патенты автора:

- [A30] 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

- [A31] Тарасов М.А, **Чекушкин А.М.**, Юсупов Р.А, Способ изготовления устройств со свободно висящими микромостиками, Патент № 2632630. Дата государственной регистрации 06.10.2017
- [A32] 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
- [A33] 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
- [A34] М.А. Тарасов, А.А. Гунбина, Д.В. Нагирная, Р.А. Юсупов, А.М. Чекушкин, Способ изготовления устройств с тонкопленочными туннельными переходами, заявка № 2019123125/28(045127) , положительное решение от 18.02.2020, патент RU2733330C1.
- [A35] М. Тарасов, А. Гунбина, А. Чекушкин, М. Фоминский, Способ изготовления тонкопленочных туннельных переходов методом отдельной литографии, заявка на изобретение, № 2021108441 от 30.03.2021, патент № 2757762