

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Разработка элементов приемной системы на основе СИНИС-структур для
субтерагерцовой астрономии»**

Аспирант: Гунбина Александра Анатольевна

(подпись аспиранта)

Научный руководитель:

Вдовин Вячеслав Федорович

д.ф.-м.н., профессор, г.н.с. отдела 180

(подпись научного руководителя)

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:

01.04.03 Радиофизика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород

2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С конца 60-70-х годов XX века активно началось освоение терагерцового диапазона длин волн, а в настоящее время это одно из самых бурно развивающихся направлений, которое имеет большие перспективы в различных отраслях. Разработка высокочувствительной приемной аппаратуры этого диапазона в мире и в стране ведется довольно широким фронтом. Такие детекторы требуются в различных сферах [1]: медицина, биология, охранные системы и многое другое. В связи с этим актуальной стала задача их разработки [2].

Наиболее амбициозные требования к параметрам приемных систем предъявляет астрономия и здесь достигнуты наилучшие результаты. Научные работы в этой области направлены на изучение реликтового излучения вселенной (CMB – Cosmic Microwave Background), межзвездных газопылевых облаков, поиск возможных вариаций некоторых фундаментальных констант и в основном связаны с экспериментальной проверкой ранее разработанных теорий. Уже существует множество наземных обсерваторий, запущены и разрабатываются баллонные и космические миссии для исследований космоса в этом частотном диапазоне. В качестве примера можно привести такие проекты как ALMA [3], South Pole Telescope [4], OLIMPO [5], Planck [6], MILLIMETRON [7] и др. Хорошо известно, что характеристики полупроводниковой электроники давно не удовлетворяют необходимым требованиям по чувствительности при создании приемных систем для современных обсерваторий. Поэтому, в последние десятилетия используются и являются наиболее перспективными приёмники на основе сверхпроводниковых элементов с субмикронными и нанометровыми размерами. Основными конкурентами СИНИС-детекторов и мировыми лидерами являются болометры на краю сверхпроводящего перехода и детекторы на кинетической индуктивности.

Необходимо отметить, что детекторы терагерцового излучения находят широкое применение и в медицине. Существует большое количество публикаций о различных методах и исследованиях в области «терагерцовой медицины», одним из ключевых элементов которых является детектор. Например, в кратком обзоре [8] представлены такие приложения как, выявление рака, диагностика ран и ожогов, стоматологическая визуализация, ТГц эндоскопия. А в качестве возможного детектора рассматриваются болометры. Другой обзор [9] более подробно рассматривает современные терагерцовые методы и инструменты, применяемые в медицине. Как известно, ТГц излучение поглощается водой, что является препятствием для проникновения в ткани живого организма (например, глубина проникновения ТГц-излучения в кожу человека ограничена парой сотен микрометров). Для решения этой проблемы, авторы обзора [9] описывают метод заморозки тканей, т.к. коэффициент поглощения льда на порядок меньше,

чем у жидкой воды. Но этот метод имеет ограничение в клинической медицине, т.к. может вызывать некроз тканей. Другой метод по решению данной проблемы – использование «посредника» (например, глицерина) для увеличения глубины проникновения ТГц излучения в ткани, содержащие влагу. Представлено краткое описание метода обнаружения биохимических молекул и материалов на основе структуры типа метаматериалов. Относительно недавно (2018 г.) ученые Университета ИТМО совместно с российскими и зарубежными учеными [10] опубликовали обзор о современных методах диагностики и визуализации на основе излучения терагерцового диапазона [11]. Как отмечалось выше, терагерцовое излучение поглощается водой. На этом свойстве можно проводить ряд исследований биологических тканей, т.к. вода является универсальным маркером их состояния. Глава 3.2 из обзора [11] посвящена Фурье-спектрометру, который является основным инструментом для исследований в данной области. В качестве криогенного детектора авторы обзора говорят о болометрах на горячих электронах из InSb, сверхпроводящих болометрах или германиевых фотопроводниках. Другой пример можно увидеть в публикации [12] где представлен способ ТГц визуализации гистопатологических образцов, а неотъемлемой частью измерительной системы (рис. 6 из [12]) является болометрический приемник.

Также, свойства терагерцового излучения активно используются в различных системах безопасности. Многие материалы (например, взрывчатые, химические и биологические вещества) имеют характерные спектры в ТГц области, что является своеобразными «отпечатками пальцев». Например, в публикации [13] представлено применение терагерцовой визуализации и зондирования для обнаружения взрывчатых веществ, оружия и наркотиков. Эти приложения требуют многопиксельных матриц с большим динамическим диапазоном. В другой публикации [14] отмечается, что при наличии более мощных источников и более чувствительных детекторов терагерцовые методы обладают большим потенциалом для обнаружения и идентификации скрытых взрывчатых веществ. Другое перспективное направление в области «охранных систем» - обнаружение загрязнений в питьевой воде и пище [15]. В данном обзоре отмечается, что технология неразрушающего контроля пищевых продуктов и обнаружении загрязнений жидкостей (например, соков, напитков и алкоголя) при помощи ТГц излучения становится новой областью исследований. Обладая уникальным превосходством, ТГц-технология привлекла многих исследователей. В этой области уже достигнут большой прогресс, однако она все еще находится на начальном этапе, и есть еще много проблем, которые необходимо решить.

Другая перспективная область применения терагерцового излучения – военное дело. В кратком обзоре [16] рассматриваются такие важные приложения как: коммуникации (защищенная связь), радары, обнаружение химических, биологических и взрывчатых веществ. Авторы

публикации [17] предлагают ТГц систему измерения поперечного сечения летательных аппаратов. Другое важное приложение, представленное в [18] – обнаружение противопехотных мин.

Все перечисленное выше подтверждает тот факт, что разработка детекторов терагерцового и субтерагерцового диапазонов и улучшение их характеристик является важной и актуальной задачей, а результаты наших разработок: детекторы, технологии, считывающая аппаратура и экспериментальные стенды могут быть применимы в различных областях.

Степень разработанности темы исследований

Как было отмечено в актуальности – разработка высокочувствительных приемных систем миллиметрового и субмиллиметрового диапазона является одной из наиболее востребованных задач. Мировые лидеры в этой области это болометры на краю сверхпроводящего перехода (БКП) и детекторы на кинетической индуктивности (КИД). По своим характеристика предлагаемые СИНИС-детекторы являются конкурентноспособной моделью. Современные тенденции в разработках таких устройств направлены в сторону расширения динамического диапазона при условии сохранения высокой чувствительности детектирующего устройства. Одиночный СИНИС-детектор насыщается на уровне мощности примерно 1 пВт, однако, объединение таких устройств в матрицы (малый размер СИНИСа позволяет интегрировать их в разнообразные приемные конструкции) дает возможность существенно расширить рабочий диапазон. Также было проведено исследование таких структур при повышении рабочей температуры (выше критической температуры сверхпроводника детектора) и показана возможность их применения как детектора структуры металл-изолятор-металл-изолятор-металл (МИМИМ). Было показано, что для численного моделирования периодических (не фазированных) антенных решеток необходимо моделировать целую матрицу с источником облучения в дальней зоне, а методика одиночной ячейки с Флоке портами не применима в данном случае. Для повышения точности оценки спектрального отклика таких приемных матриц был усовершенствован экспериментальный стенд путем добавления дополнительных опорных каналов. Другое направление по улучшению характеристик приемных систем – снижение их собственных шумов. Для систем на основе СИНИС-детекторов снижение шумов можно добиться путем замены считывающей электроники. Ранее, для исследования таких структур применялась система считывания на основе полевых транзисторов работающих при комнатной температуре с шумами $20 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$. В рамках данной диссертационной работы было предложено применение микроволновой системы считывания на основе ниобиевого сверхпроводящего четвертьволнового копланарного резонатора и холодным (4К) усилителем. Ранее такой реализации для считывания сигнала с СИНИС-детектора не исследовалось. Другое важное направление, которое было рассмотрено в диссертации – разработка и апробация новых технологий изготовления устройств на

основе тонкопленочных туннельных переходов. Зачастую, реализация теоретических работ ограничивается возможностями технологического оборудования. Нами были предложены технологии по созданию туннельных переходов различной формы и площади (получен патент на изобретение и подана заявка на патент на изобретение) с высоким процентом выхода годных образцов. Одна из технологий может быть применима для промышленного производства. Нужно отметить, что вопрос внедрения сверхпроводникового приемника на обсерватории БТА – не новый. Впервые эта идея была опубликована в 2007 [19], где была предложена приемная система на основе БКП диапазона 350 ГГц, но, к сожалению никакой реализации не последовало. Спустя 10 лет нашим исследовательским коллективом было решено продолжить эти разработки, но уже с приемной системой на основе СИНИС-детектора. В данной диссертационной работе разработаны и рассмотрены элементы приемной системы, необходимые для установки сверхпроводникового детектора миллиметрового и субмиллиметрового диапазона на оптический телескоп БТА.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель настоящей диссертационной работы – разработка, изготовление и экспериментальное исследование элементов прототипа приемной системы на основе СИНИС-детекторов для оптического телескопа БТА. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработка, изготовление и экспериментальное тестирование микроволновой системы считывания на основе четвертьволнового сверхпроводящего резонатора из нитрида ниобия с интегрированным СИНИС-детектором.
2. Разработка, изготовление и экспериментальное тестирование различных матриц с интегрированными СИНИС-детекторами для работы в условиях высокой фоновой нагрузки (десятки пиковатт) на наземных обсерваториях. Была модернизирована экспериментальная установка и методика моделирования для получения более точной оценки спектрального отклика исследуемых приемных матриц.
3. Впервые изготовлены и исследованы сверхпроводящие матрицы электрически малых антенн с интегрированными СИНИС-детекторами.
4. Разработаны, апробированы и запатентованы новые (более надежные) технологии изготовления тонкопленочных туннельных переходов, включая технологию, позволяющую изготовление туннельных переходов в промышленном масштабе. Ранее, исследуемые образцы были изготовлены на базе Чалмерского технологического университета (Гётеборг, Швеция). Новая технология позволила перенести производство на отечественную технологическую базу в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

5. Проведена оценка возможности использования приемной системы на основе СИНИС-детекторов на обсерватории БТА САО РАН.

Научная новизна

- Впервые разработан, изготовлен, исследован прототип интегральной микросхемы, содержащей СИНИС детектор, сверхпроводниковую двойную щелевую сигнальную антенну, сверхпроводниковый четвертьволновый резонатор СВЧ считывания, связанный с сверхпроводниковым копланарным ответвителем.
- Разработаны и запатентованы новые оригинальные технологии изготовления тонкопленочных туннельных переходов. Впервые создана технология изготовления алюминиевых СИС переходов с использованием магнетронного напыления и прямой электронной литографии.
- Отработана методика моделирования матриц полуволновых и электрически малых антенн с интегрированными СИНИС-детекторами.
- Впервые в качестве опорного канала для спектральной калибровки СИНИС детектора использована длинная цепочка СИН переходов
- Впервые представлены результаты исследования матриц сверхпроводящих антенн с интегрированными СИНИС-детекторами.
- Предложена структурная схема и ключевые элементы приемной системы на основе СИНИС-детекторов для апробации субтерагерцового радиоастрономического приемника в реальных условиях на оптическом телескопе БТА (Большой Телескоп Альт-Азимутальный).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Отработана методика и выполнено моделирование приемных, не фазированных антенных решеток в программном пакете CST STUDIO SUITE.
2. Разработанные приемные матрицы на основе СИНИС-детекторов могут быть использованы для создания прототипа приемной системы для оптического телескопа БТА. Удачная апробация на телескопе БТА позволит перейти к созданию прототипа приемной системы для строящегося телескопа на плато Суффа, а также продвинуться в сторону баллонных и космических обсерваторий.
3. Разработанные технологии могут быть применимы для создания устройств на основе различных туннельных переходов: сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН), нормальный

метал-изолятор-сверхпроводник (НИС), сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), металл-изолятор-метал (МИМ).

4. Экспериментальная установка для исследования спектрального отклика с дополнительными опорными каналами внутри криостата для калибровки принимаемого сигнала может быть использована для исследования спектральных характеристик любых охлаждаемых приемных устройств.

Методология и методы исследования

1. Численное моделирование в программном пакете CST STUDIO SUITE элементов приемных матриц и системы считывания.

2. Аналитический расчет четвертьволнового копланарного резонатора для реализации микроволновой системы считывания.

3. Низкотемпературные исследования (рабочая температура 100 и 300 мК) изготовленных структур:

- Исследование спектрального отклика приемных элементов в модернизированной экспериментальной установке с тремя опорными каналами для калибровки принимаемого сигнала. Впервые в качестве опорного канала для калибровки спектрального отклика приемных элементов на основе СИНИС-детекторов была использована длинная цепочка СИН переходов (термометра). Такой термометр широкополосен и технологически совместим с разрабатываемыми детекторами (выполняются в одном технологическом цикле);

- Исследование S21-параметра СИНИС-детектора с микроволновой системой считывания в модернизированной экспериментальной установке с заведенными коаксиальными кабелями, холодным усилителем и ферритовым циркулятором.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработан и экспериментально исследован СИНИС-детектор с микроволновой системой считывания на основе сверхпроводящего копланарного резонатора, обеспечивающего частотное мультиплексирование для многоматричного приемника на основе СИНИС-детекторов и снижающего шумы системы, вносимые считывающей электроникой. Шумы были снижены с $20 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ до $0,12 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$.

2. Разработаны и апробированы новые технологии создания устройств на основе тонкопленочных туннельных переходов с высоким выходом годных образцов и не требующих сложного технологического оборудования, а также технологий создания СИНИС-детекторов с подвешенным поглотителем, допускающим широкий выбор его материалов.

3. Модернизирован субкельвинный экспериментальный стенд для оценки спектрального отклика субТГц приемных структур путем добавления опорных каналов внутри криостата для калиб-

ровки детектируемого сигнала: один канал снаружи криостата (пирозлектрический детектор) и два внутри (рутениевый резистор на холодной плите рядом с исследуемым образцом и цепочка туннельных СИН-переходов на исследуемом чипе). На модернизированном стенде измерены спектральные отклики созданных структур и внедрена новая микроволновая система считывания

4. Выполнен дизайн-проект субТГц приемника для оптического телескопа БТА.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов подтверждается совпадением расчетных характеристик и экспериментальных результатов: исследование спектрального отклика разрабатываемых структур в модифицированной экспериментальной установке с тремя опорными каналами для калибровки принимаемого сигнала, а также был получен отклик структуры с микроволновой системой считывания на частоте близкой к расчетной. Представленные технологии изготовления с их достоинствами и недостатками были апробированы для изготовления разрабатываемых структур, показали высокий уровень качества полученных туннельных переходов и высокий процент выхода годных образцов и могут быть применимы для промышленных масштабов.

Результаты исследований, приведенные в настоящей научно-квалификационной (диссертационной) работе, были представлены в 31 работе. Из них 7 публикаций в периодических изданиях, 16 публикаций в периодических изданиях по результатам конференций, 3 патента на изобретение и 1 заявка на патент на изобретение, 21 доклад на конференциях.

Личный вклад автора

Исследования, представленные в настоящей диссертационной работе, были выполнены автором в Институте прикладной физики РАН, Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева и проведены совместно с Институтом физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Специальной астрофизической обсерватории РАН и другими исследовательскими группами.

Автор диссертации, Гунбина А.А., лично выполнила:

- Моделирование электродинамики приемных ячеек.
- Аналитический расчет и численное моделирование параметров четвертьволнового копланарного резонатора для создания микроволновой системы считывания.
- Разработка технологий и изготовление образцов.
- Проведение экспериментальных исследований.

Краткое содержание научно-квалификационной работы

Во **Введении** представлена актуальность исследований и возможные приложения разрабатываемых устройств для практических приложений. Сформулированы цели и задачи диссертации, положения выносимые на защиту, научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, а также личный вклад автора рукописи.

Первая глава носит обзорный характер. В ней кратко рассмотрены актуальные задачи современной миллиметровой и субмиллиметровой астрономии и ключевые элементы приемных систем для их исследования. Приведен обзор и сравнение основных характеристик разрабатываемых СИНИС детекторов с лидирующими мировыми концепциями – болометром на краю сверхпроводящего перехода и детектором на кинетической индуктивности. Показано, что по своим характеристикам, детекторы на основе СИНИС-структур являются конкурентноспособной моделью и могут быть использованы в качестве элемента приемной системы на различных обсерваториях.

Во **второй главе** диссертации рассмотрен СИНИС-детектор, а именно: принцип работы такого устройства, возможные технологии изготовления тонкопленочных туннельных переходов, приемные матрицы с интегрированными СИНИС детекторами, экспериментальные стенды, считывающая электроника и результаты измерений.

Раздел 2.1 описывает принцип работы СИНИС-детекторов. Представлено сравнение двух подходов к оценке характеристик таких структур: классическая модель на основе уравнения теплового баланса и квантовая модель на основе кинетических уравнений и интеграл столкновений. В качестве примера, на рисунке 1 приведены измерения некоторых характеристик СИНИС-детекторов: отклик по напряжению на излучение черного тела (ЧТ) различной мощности и спектральный отклик матрицы электрически малых антенн.

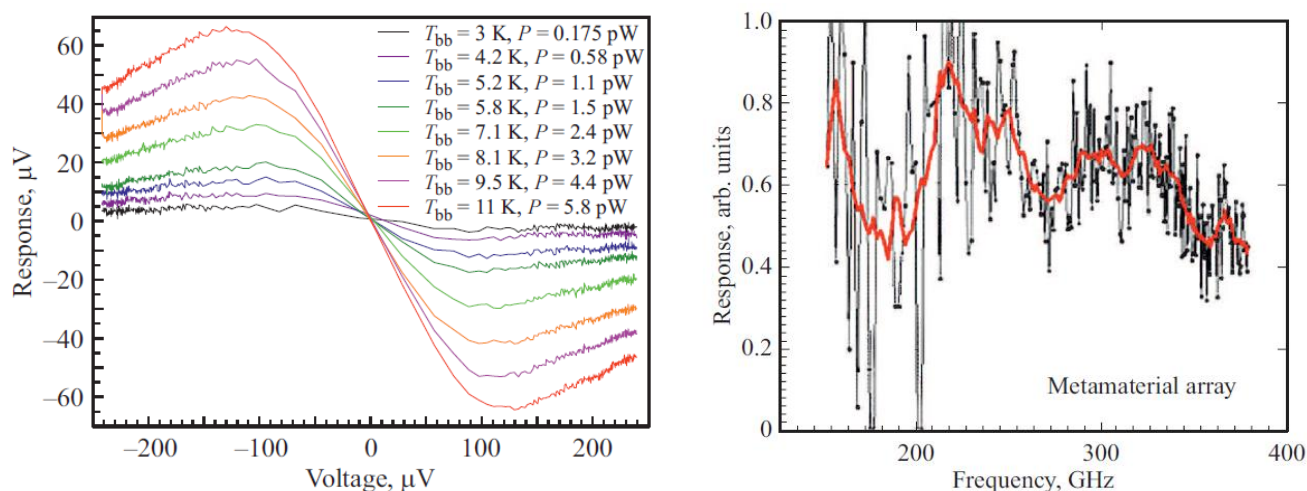


Рисунок 1 – Некоторые измеренные характеристики СИНИС-детекторов: а) - Отклики по напряжению при температуре 120mK на излучение ЧТ разной мощности из работы [20]; б) –

Измеренный спектральный отклик матрицы электрически малых антенн с интегрированными СИНИС детекторами из работы [21].

Типичные характеристики СИНИС-детекторов: вольт-ваттная чувствительность - не хуже 10^9 В/Вт, мощность эквивалентная шуму – на уровне 10^{-17} Вт/Гц^{1/2} (значение приведено для измерений с теплой JFET системой считывания и может быть улучшена путем модернизации считывающей электроники; этот вопрос будет рассмотрен ниже), возможность работы в условиях высокой фоновой нагрузки (десятки пиковатт) путем объединения одиночных детекторов в матрицы, высокая квантовая эффективность (в работе [20] была достигнута цифра 15 электронов на квант излучения с частотой 350 ГГц).

Рассмотрена работа СИНИС-детектора при температуре выше критической. Проведено сравнение идентичных матриц электрически малых антенн с интегрированными СИНИС и МИМИМ (металл-диэлектрик-металл-диэлектрик-металл) детекторами. Показано, что они имеют идентичные отклики, но чувствительно СИНИС структур в 30 раз выше.

В разделе 2.2 приведены различные технологии изготовления тонкопленочных туннельных переходов, включая оригинальные авторские разработки. Отдельно нужно отметить разработанную технологию магнетронного напыления с отдельной литографией [22-23]. Такая технология позволяет создавать туннельные структуры произвольной формы и площади, не требует сложного технологического оборудования с наклоном и поворотом подложки внутри рабочей камеры, обеспечивает высокий процент годных образцов и может быть применима для промышленных масштабов. Процесс изготовления туннельного перехода (рисунок 2, [22]): На поверхность диэлектрической подложки (1) наносят первый слой (4) резиста (например, сополимер MMA) и его запекают (при температуре 130-170°C в течение 5 мин), для создания отрицательного профиля резиста для первого слоя структуры. Затем наносят второй слой (3) резиста (например, марки PMMA) и проводят его запекание (при температуре 130-170°C в течение 5 мин) для формирования топологии первого слоя. Экспозиция резиста с засвечиванием областей, в которых будет удален резист, для формирования топологии первого. Напыление первого слоя (5) металла и удаление двухслойного резиста вместе с напыленными на него слоями металла. Чистка подложки, нанесение двухслойного резиста, проведение экспозиции и проявление двухслойного резиста для формирования топологии второго слоя. Плазменное или ионное травление (200 Вт, 4,5 мин, пост. смещение 900 В, давление аргона 6×10^{-3}) для удаления слоя окисла, возникающего из-за нарушения вакуума после напыления первого слоя (5), а также удаление прилегающего тонкого слоя первого металла. Формирование туннельного перехода (8) путем окисления в напылительной камере (давление 10 Торр, 10 минут). Напыление второ-

го слоя (7) металла. На заключительной стадии удаляется двухслойный резист вместе с напыленными на него слоями металла с получением искомого туннельного перехода.

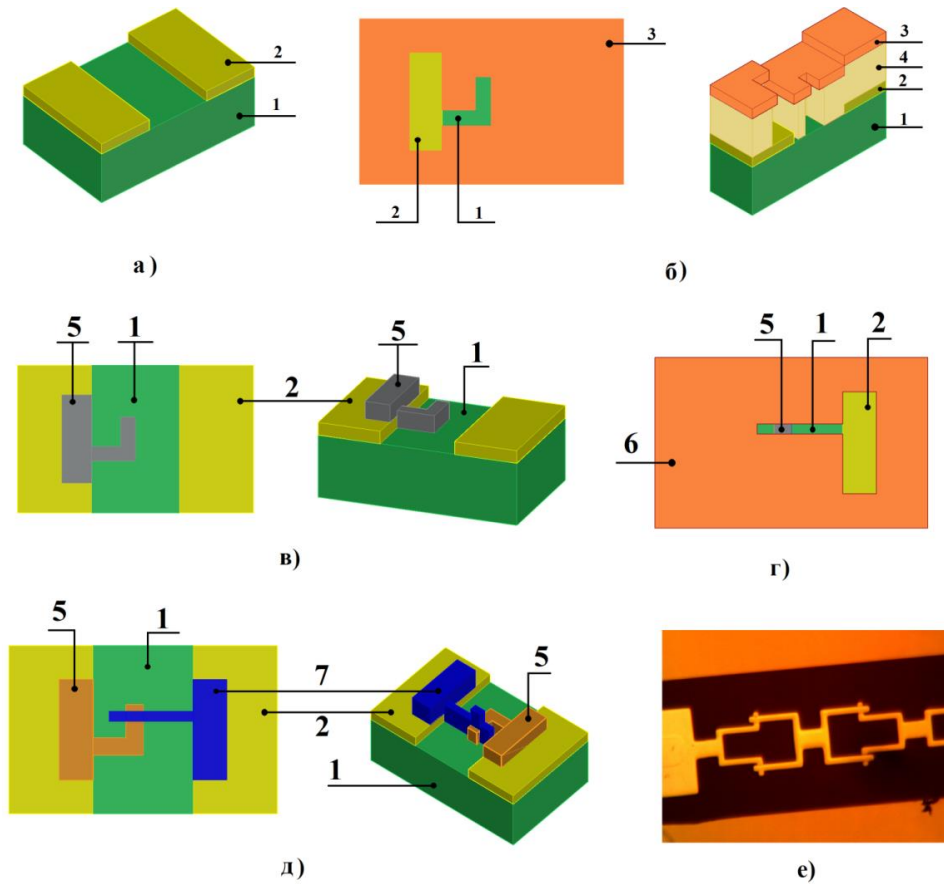


Рисунок 2 – Схематичное изображение технологии изготовления туннельных структур методом магнетронного напыления с раздельной литографией, [22]: а) – Кремниевая подложка с подводящими электродами; б) Двухмерное (слева) и трехмерное (справа) схематичное изображение резистивной маски для напыления первого слоя; в) Двухмерное (слева) и трехмерное (справа) изображение первого напыленного слоя; г) – Резистивная маска (вид сверху) для напыления второго слоя; д) Двухмерное (слева) и трехмерное (справа) изображение второго напыленного слоя; е) – Фотография фрагмента изготовленной цепочки СКВИДов

Раздел 2.3 посвящен методике численного моделирования матриц планарных антенн в программном пакете CST STUDIO SUITE. Показано, что для моделирование приемных периодических (не фазированных!) матриц планарных антенн необходимо моделировать полную матрицу с облучением сигналом из дальней зоны. Результаты моделирования матриц классических полуволновых и электрически малых антенн приведены на рисунке 3.

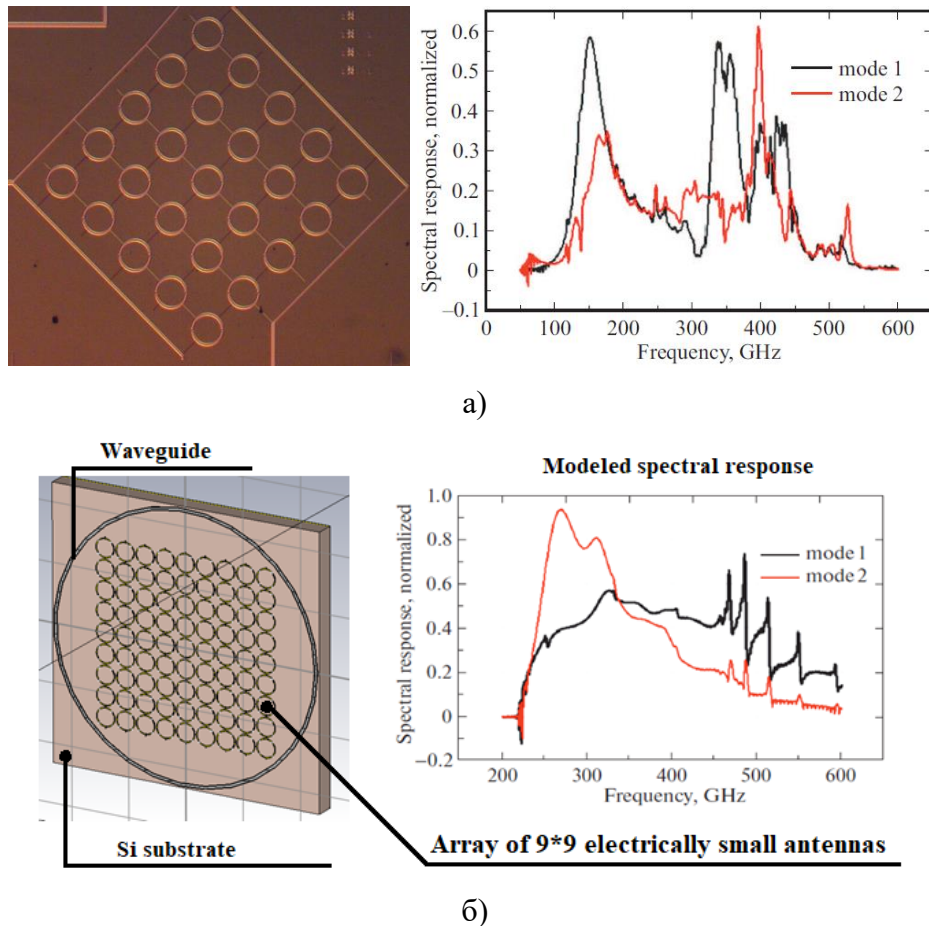


Рисунок 3 – Результаты моделирования путем облучения целой матрицы из дальней зоны [21], [24]: а) – Матрицы полуволновых антенн; б) – Матрицы электрически малых антенн

Также, в этом разделе кратко рассмотрен вопрос о применении сверхпроводников в качестве материалов антенн. Были изготовлены матрицы электрически малых антенн из сверхпроводящего алюминия, которые являлись продолжением сверхпроводящего электрода СИ-НИС-детектора. Результаты наглядно проявились в измерениях вольтамперных характеристик уже при 300 мК. Здесь критериями являются значение энергетической щели и отношение сопротивлений при нулевом смещении и далеко за щелью. При температуре 300 мК и малой площади сверхпроводящих электродов отношение сопротивлений матрицы не превышало 100, тогда как для аналогичной матрицы со сверхпроводящими антеннами отношение приближалось к 1000. А при температуре 100 мК отношение сопротивлений превышало 10000.

В разделе 2.4 приведены различные экспериментальные установки, которые были использованы для измерения характеристик приемных элементов на основе СИНИС-структур. Для исследования спектрального отклика разрабатываемых детекторов в качестве перестраиваемого источника сигнала использовали лампу обратной волны (ЛОВ) диапазона 270-380 ГГц. Уровень мощности выходного сигнала ЛОВ очень не равномерен по диапазону перестройки (в

качестве примера, на рисунке 4а приведена зависимость напряжения, снимаемого пироэлектрическим детектором от генерируемой ЛОВ частоты). Видно, что использовать «калибровочные таблицы», поставляемые вместе с ЛОВ использовать нельзя, в каждом экспериментальном цикле необходимо одновременно вместе с уровнем сигнала, снимаемого с исследуемого образца, отслеживать уровень сигнала-источника. Такая калибровка применялась ранее, например в работах, [25-28]. Но точность такой калибровки составляет не более 50%. Далее, на пути «источник - приемник» существует множество источников искажения сигнала: расстояния от источника до криостата, искажение на окнах криостата, множественные переотражения внутри криостата и др.. В связи с этим была модифицирована экспериментальная установка (рисунок 5), [21] для исследования спектрального отклика детектирующего устройства путем добавления еще двух опорных каналов внутри криостата: рутениевый резистор (который может быть использован в качестве детектора ММ и субММ излучения [29], рисунок 4б) на холодной плите рядом с исследуемым образцом и цепочка туннельных СИН-переходов на самом образце (рисунок 4в). Цепочка туннельных СИН-переходов дополнительно позволяет учесть нагрев подложки внеполосным излучением. Нужно отметить, что перечисленные выше «источники искажения» сигнала невозможно учесть при моделировании, т. к. необходима огромная вычислительная мощность, чтобы полностью воспроизвести весь приемо-передающий тракт. На рисунке 6 приведены измеренные спектральные отклики приемных матриц полуволновых и электрически малых антенн, сделанные на различных экспериментальных стендах.

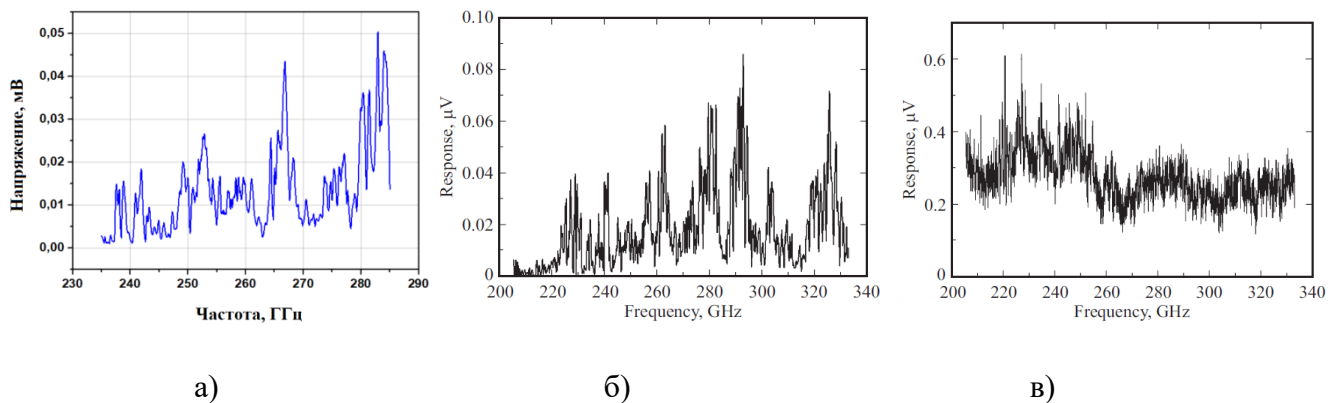


Рисунок 4 – Сигнал, снимаемый с опорных каналов [21]: а) – Пироэлектрический детектор; б) - Рутениевый резистор; в) – Цепочка СИН-переходов

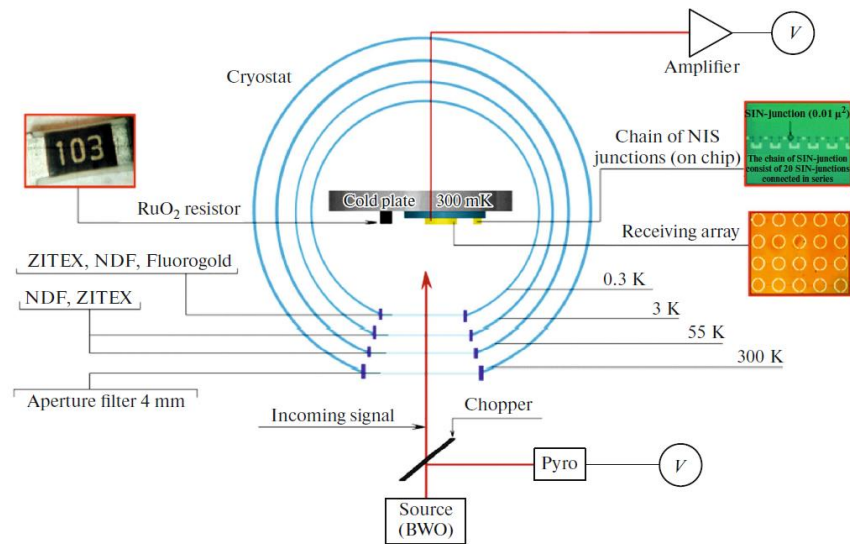
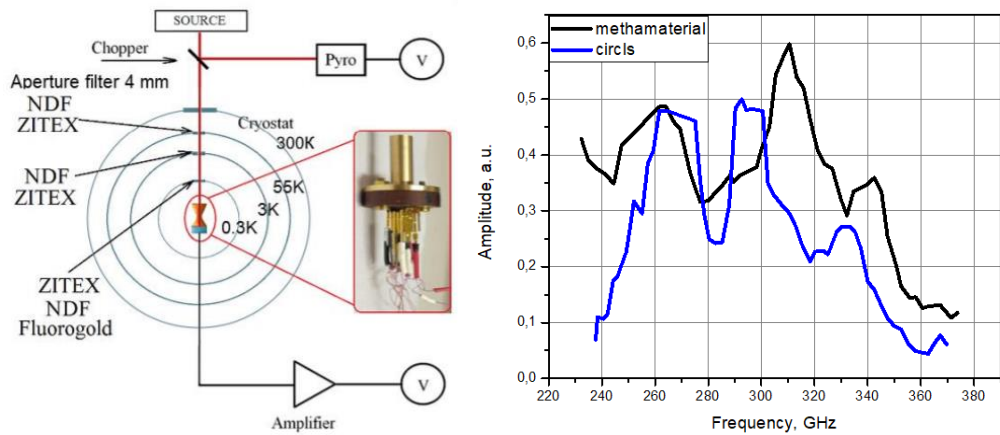
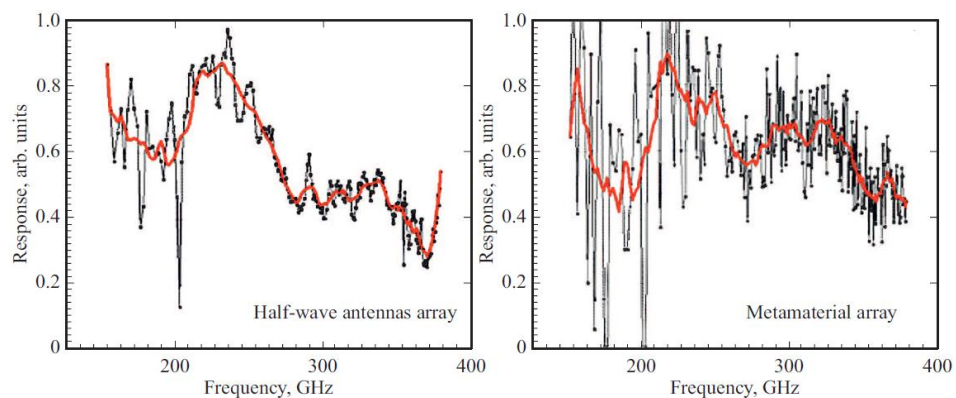


Рисунок 5 – Экспериментальная установка для исследования спектрального отклика разрабатываемых структур [21].



а)



б)

Рисунок 6 – Сравнение измерений спектрального отклика полуволновых матриц и матриц электрически малых антенн: а) – Схематичное изображение экспериментальной установки с одним опорным каналом [28] (слева) и измеренные спектральные отклики матриц (справа), [26], [30-31]; б) – Измеренные спектральные отклики с тремя опорными каналами матриц полуволновых антенн (слева) и электрически малых антенн (справа), [21].

Далее рассмотрен вопрос считывающей электроники. Впервые разработан, изготовлен, исследован прототип интегральной микросхемы, содержащей СИНИС детектор, сверхпроводниковую двойную щелевую сигнальную антенну, сверхпроводниковый четвертьволновый резонатор СВЧ считывания, связанный с сверхпроводниковым копланарным ответвителем и холодным усилителем. Шумы холодного усилителя составили $0,12 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$, что на два порядка меньше, чем у применяемой ранее считывающей электроники на основе полевых транзисторов. Смоделированный и измеренный S21-параметр приведены на рисунке 7.

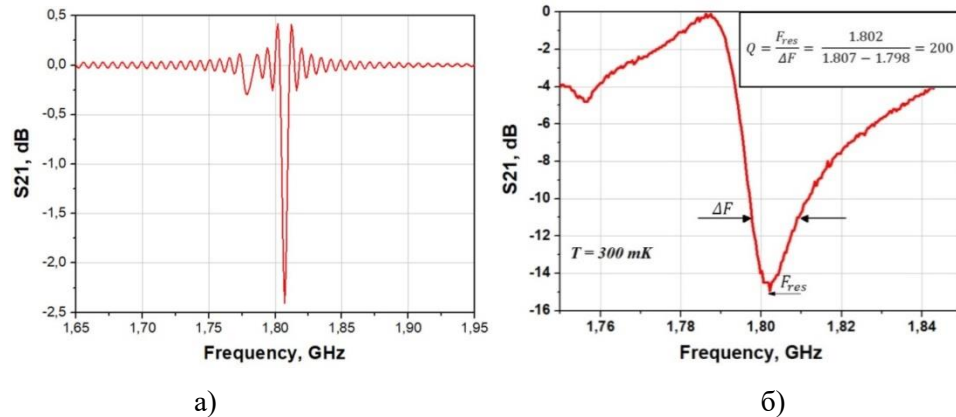


Рисунок 7 – Смоделированный (а) и измеренный (б) S21-параметр четвертьволнового копланарного резонатора длиной 13,85 мм с интегрированным СИНИС-детектором

Дальнейшее снижение собственных шумов считывающей электроники может быть получено путем применения джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны (ДПУБВ). Впервые были предложены, разработаны и изготовлены тестовые структуры ДПУБВ из толстых (сотни нм) алюминиевых пленок.

Третья глава научно-квалификационной работы посвящена вопросу внедрения приемной системы на основе СИНИС-детектора для проведения радиоастрономических исследований на оптическом телескопе БТА (Большой Телескоп Альт-Азимутальный). Это объясняется отсутствием крупномасштабных телескопов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона в России, где можно было бы испытать разрабатываемые приемные системы. Качество поверхности зеркала оптического телескопа заведомо удовлетворяет требованиям для исследований в субтерагерцовом диапазоне. Наблюдения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах могут проводиться ранним утром или поздним вечером, в отличие от наблюдений в оптическом диапазоне, которые проводятся только в ночное время в отсутствии фоновой засветки неба. Удачная реализация проекта позволит не только получить данные о работе СИНИС-детекторов на реальном инструменте, но и расширит возможности уникальной научной установки БТА в сторону миллиметровых и субмиллиметровых волн, ранее не использованных инструментом.

Таким образом, расширение функционала телескопа в субтерагерцовую область является дополнением к основной программе наблюдений и нисколько ей не мешает. Это является безусловным преимуществом предлагаемой схемы дополнения БТА субтерагерцовым приёмником. По исследованиям астроклиматических условий на площадке БТА [32], для наблюдений наиболее подходящим является диапазон волн 3 мм в зимнее время. Был рассмотрен вопрос согласования приходящего во второй фокус Несмита сигнал с приемной матрицей, установленной внутри системы криостатирования. Предложено согласование при помощи конструкции встречных рупоров (т.н. back-to-back horn) и контррефлектора, более подробно этот вопрос рассмотрен в работе [27]. Такая конструкция представляет собой некий эквивалент интегрирующей полости. Сигнал от источника попадает в рупор, многократно отражается от его стенок и контррефлектора и поглощается приёмной матрицей. Наличие металлических стенок можно рассматривать как зеркала, в которых отражается изображение нашей матрицы детекторов. Также нужно рассмотреть вопрос облучения матрицы приходящим сигналом. В работах [25], [27], [33-35] теоретически и экспериментально показано что в случае облучения сигнала со стороны металлизации (антенн) уровень поглощенного сигнала значительно выше.

Заключение содержит основные результаты работы:

Диссертационная работа посвящена разработке, изготовлению и экспериментальному исследованию элементов приемной системы на основе СИНИС-детекторов субтерагерцового диапазона для оптического телескопа БТА САО РАН и перспективных приемников миллиметровой астрономии. В ходе работы были получены следующие результаты:

1. Впервые разработан, изготовлен, исследован прототип интегральной микросхемы, содержащей СИНИС детектор, сверхпроводниковую двойную щелевую сигнальную антенну, сверхпроводниковый четвертьволновый резонатор СВЧ считывания, связанный с сверхпроводниковым копланарным ответвителем. Был измерен резонанс на частоте 1,8 ГГц с добротностью 200. Экспериментальные результаты согласуются с результатами аналитического и численного моделирования. Шумы холодного усилителя составляют $0,12 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$, что на два порядка меньше «теплой» считывающей электроники на основе полевых транзисторов, применяемой ранее. Также, такая система позволяет значительно снизить низкочастотный ($1/f$) фликкер-шум.
2. Впервые разработан, изготовлен исследован прототип джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на основе алюминиевых СИС переходов. Теоретически, шумы такого усилителя могут достигать квантового предела и шумовая температура составит 0,5 К в полосе 5 ГГц.

3. Рассмотрена методика численного моделирования периодических (не фазированных!) матриц планарных антенн. Показано, что для моделирования таких структур необходим расчет целой матрицы, а не единичной ячейки с Флоке портами.
4. Разработаны и апробированы новые технологии изготовления тонкопленочных туннельных переходов, позволяющие создавать переходы произвольной формы и площади с высоким выходом годных образцов. Впервые создана технология магнетронного напыления с отдельной литографией, которая не требует сложного технологического оборудования (с наклоном и поворотом подложки внутри рабочей камеры) и может быть применима для промышленных масштабов. Изготовление образцов субТГц приемных систем, изначально изготавливавшихся на технологическом участке Чалмерского университета технологии, полностью переведено на отечественную базу – технологический участок ИРЭ РАН и производственные участки ИПФ РАН
5. Модернизирован субкельвинный измерительный экспериментальный стенд для исследования спектрального отклика охлаждаемых приемных элементов путем добавления опорных каналов внутри криостата: рутениевый резистор на холодной плите рядом с исследуемым образцом и цепочка туннельных СИН-переходов на самом образце. Ранее используемая экспериментальная установка с одним опорным каналом (пирозлектрический приемник) снаружи криостата позволяла контролировать только уровень сигнала-источника. Новый экспериментальный стенд позволяет частично учесть переотражения на окнах и внутри криостата. Такой подход позволит точнее оценить форму спектрального отклика приемной структуры.
6. Исследованы сверхпроводящие матрицы электрически малых антенн и материалы для больших сверхпроводниковых субТГц антенн. Измеренное отношение сопротивлений при рабочей температуре 300 мК составило 1000, тогда как для аналогичной матрицы изготовленной не из сверхпроводящего материала (стандартная трехслойка Ti/Au/Pd) всего 100. При рабочей температуре 100 мК, измеренное отношение сопротивлений было уже 10000.
7. Выполнен дизайн - проект приемной системы для установки сверхпроводникового приемника на основе СИНИС-детекторов на оптическом телескопе БТА:
 - анализ астроклиматических исследований показал, что наиболее подходящие условия – измерения на 3 мм, а на длинах волн короче 3 мм - в зимнее время;
 - необходима разработка корректирующей оптики для фокусировки сигнала, собираемого зеркалом телескопа во второй фокус Несмита, где и будет установлена система криостатирования с приемным элементом;

- в качестве системы криостатирования наилучший вариант это портативный криостат-вставка с рабочей температурой 100 мК;
- в качестве приемного элемента - матрица сверхпроводящих электрически малых антенн диапазона 100 ГГц;
- для согласования приходящего излучения с приемной матрицей будет использована интегрирующая полость в виде конструкции встречных рупоров, а сама матрица будет расположена таким образом, чтобы облучение было со стороны металлизации (антенн).

Приложение А содержит информационные сведения об основах таких технологических процессов как литография и напыление тонких пленок, включая собственные заметки автора. Это приложение необходимо для лучшего восприятия раздела 2.2, в котором представлены новые технологии изготовления тонкопленочных туннельных переходов.

В Приложении Б кратко представлен процесс травления кремния для получения требуемой толщины подложки.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Тарасов М.А., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю., Чекушкин А.М. Способ изготовления тонкопленочных туннельных переходов методом раздельной литографии. Подана заявка на патент. Заявка №2021108441. Дата регистрации 30.03.2021.
- A2. Тарасов М.А., Нагирная Д.В., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю., Юсупов Р.А. Металл-Диэлектрик-Металл-Диэлектрик-Металл фотодетектор. Патент №№2020129457/28(052919). Приоритет. 07.09.2020.
- A3. Тарасов М.А., Нагирная Д.В., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю. Способ изготовления устройств с тонкопленочными туннельными переходами. Патент № 2733330 РФ. Дата государственной регистрации 01.10.2020.
- A4. Тарасов М.А., Соболев А.С., Чекушкин А.М., Юсупов Р.А., Гунбина А.А.. Широкополосный детектор терагерцового излучения. Патент №2684897. Дата государственной регистрации 16.04.2019.
- A5. Gunbina A.A., Tarasov M.A., Fominskii M.Yu., и др. Fabrication of aluminum nanostructures for microwave detectors based on tunnel junctions// Принята в печать в *Advances in Microelectronics: Reviews, Book Series*. 2021. Т. 3.
- A6. Tarasov M., Gunbina A., Yusupov R., и др. Non-Thermal Absorption and Quantum Efficiency of SINIS Bolometer// *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021. Т. 31, №5. 2300105.
- A7. Тарасов М.А., Гунбина А.А., Лемзяков С.А., и др. Разработка джозефсоновского параметрического усилителя бегущей волны на основе алюминиевых СИС переходов// Принята в печать в «Физика твердого тела». 2021.
- A8. Гунбина А.А., Тарасов М.А., Лемзяков С.А., и др. Arrays of electrically small antennas with SINIS detectors for SubTHz astronomy and atmosphere propagation research// Принят доклад на конференцию "МетаНано". 2021.
- A9. Gunbina A. и др. A 90GHz SINIS detector with 2GHz readout// *IEEE Applied Superconductivity*. 2020. Т. 31, №5. 1500805.
- A10. Тарасов М.А., Эдельман В.С., Лемзяков С.А., и др. Cryogenic Mimim and Simis Microwave Detectors// 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). 2021. С.25-27.
- A11. Балега Ю.Ю., Барышев А.М., Бубнов Г.М., и др. Сверхпроводниковые приёмники для космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых радиотелескопов // *Известия вузов. Радиофизика*. 2020. Т. 63, № 7. С. 533-556.
- A12. Юсупов Р.А., Гунбина А.А., Чекушкин А.М., и др. Квантовый отклик болометра на основе структуры СИНИС с подвешенным абсорбером. *Физика твердого тела*. 2020. Т. 62, №9. С. 1403-1406.

- A13. Тарасов М.А., Махашабде С., Гунбина А.А., и др. СИНИС-болومتر с микроволновым считыванием// Физика твердого тела. 2020 г. Т. 62, №9. С. 1415-1419.
- A14. А.А. Гунбина, М.А. Тарасов, С.А. Лемзяков, и др. Спектральный отклик матриц полуволновых и электрически малых антенн с СИНИС-болометрами// Физика Твердого Тела. 2020. Т. 62, №9. С. 1440-1446.
- A15. Гунбина А.А., Лемзяков С.А., Тарасов М.А., и др. Отклик на субмиллиметровое излучение СИНИС приемника с электронным охлаждением// Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 111, №10. С. 641–645.
- A16. Parshin V.V., Serov E.A., Bubnov G.M., и др. Terahertz Reflectivity of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ at Cryogenic Temperatures// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. Т. 30, № 8. 9001705.
- A17. Lesnov I.V., Bubnov G.M., Gunbina A.A., и др. Development and research of sub-terahertz astronomy and telecommunication equipment// AIP Conference Proceedings. 2020. Т. 2300, № 1. С. 020013-1 – 020013-4.
- A18. Tarasov M.A., Chekushkin A.M., Yusupov R.A., и др. Matching of Radiation with Array of Planar Antennas with SINIS Bolometers in an Integrating Cavity// Journal of Communications Technology and Electronics. 2020. Т. 65, №1. С. 65-74.
- A19. Tarasov M.A., Gunbina A.A., Mahashabde S., и др. Arrays of Annular Antennas With SINIS Bolometers// IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. Т. 30, №3. 2300106
- A20. Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A., и др. Annular Antenna Array Metamaterial with SINIS bolometer// Journal of Applied Physics. 2019. Т. 125, №17. С. 174501-1 – 174501-6.
- A21. М. Tarasov, А. Gunbina, М. Mansfeld, и др. SubTHz arrays of planar antennas with SINIS bolometers for BTA// EPJ Web of Conferences. 2018. Т. 195. 05014.
- A.22. Tarasov M., Gunbina A., Mansfeld M., и др. Arrays of annular cryogenic antennas with SINIS bolometers and cryogenic receivers for SubTHz observatories// EPJ Web of Conferences. 2018. Т. 195. 05010.
- A23. Sobolev A.S., Beiranvand B., Chekushkin A.M., и др. Wideband metamaterial-based array of SINIS bolometers// EPJ Web of Conferences. 2018. Т. 195. 05009.
- A24. Тарасов М.А., Махашабде С., Гунбина А.А., и др. Матрица кольцевых антенн с криогенными болометрами диапазона 345 ГГц в интегрирующей полости// Радиоэлектроника. 2018. Т. 1. 14 с.
- A25. Чекушкин А.М., Тарасов М.А., Юсупов Р.А., и др. Влияние ловушек из нормального металла, андреевского отражения и эффекта близости на охлаждение сверхпроводника в СИНИС структурах// Труды МФТИ. 2018. Т. 10, №2. С. 64-71.

- A26. Гунбина А.А., Тарасов М.А., Вдовин В.Ф., и др. Астрофизические задачи и приемник СубТГц волн на оптическом телескопе БТА// Материалы конференции «Наземная астрономия в России. XXI век» 2021.
- A27. Бейранванд Б., Вдовин В.Ф., Гунбина А.А., и др. Матрицы планарных антенн с интегрированными СИНИС болометрами для радиоастрономических исследований// Материалы конференции «6-ая Всероссийская Микроволновая конференция». 2018. С. 253-257.
- A28. Вдовин В.Ф., Гунбина А.А., Мансфельд М.А., и др. Согласование матрицы планарных антенн с СИНИС болометрами с внешним излучением диапазона 350 ГГц// Материалы конференции «28-ой Международной Крымской конференции». 2018. Т. 4.. С. 1563-1574.
- A29. Юсупов Р.А., Соболев А.С., Гунбина А.А., и др. Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами// Материалы докладов 28-ой Международной Крымской конференции. 2018. Т. 4. С.856-861.
- A30. Gordeeva A.V., Zbrozhek V.O., Pankratov A.L., и др. Observation of photon noise by Cold-Electron Bolometers //Applied Physics Letters. 2017. Т. 110, № 16. С. 162603-1 – 162603-5.
- A31. Kuzmin L.S., Shamporov V.A., Gunbina A.A., и др. Realization of Cold-Electron Bolometers with Ultimate Sensitivity due to Strong Electron Self-Cooling// 2017 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC). Publisher IEEE. 2018.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siegel P.H. THz Technology: An Overview // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2003. Т. 13, №2. С. 351-394
2. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays // Opto-Electronics Review. 2011. Т. 19, № 3. С. 346-404
3. Обсерватория ALMA [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.almaobservatory.org/en/home/>
4. Обсерватория The South Pole Telescope [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://pole.uchicago.edu..>
5. Обсерватория Olimpo [Электронный ресурс]. 2021. URL: <http://olimpo.roma1.infn.it>
6. Обсерватория Planck[Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/planck>
7. Обсерватория Миллиметрон [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://millimetron.ru/glavnaya>.
8. Heidari A. Terahertz Technology in the Future of Health and Medical Applications // Part of the Springer Series in Bio-/Neuroinformatics book. 2015 г. Т. 5. С. 663-670.
9. Son J.-H., Oh S.J., Cheon H. Potential clinical applications of terahertz radiation // Journal of Applied Physics. 2019. Т. 125, № 19. С. 190901-1 – 190901-11.
10. Смолянская О.А. О применении терагерцового излучения в медицине и биологии [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://news.itmo.ru/ru/science/life_science/news/8118/
11. Smolyanskaya O.A., Chernomyrdin N.V., Konovko A.A., и др. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids // Progress in Quantum Electronics. 2018 г. Т. 62. С. 1-77.
12. Knobloch P., Schildknecht C., Kleine-Ostmann T., и др. Medical THz imaging: an investigation of histo-pathological samples // Phys. Med. Biol. 2002., Т. 47., №21. С. 3875–3884.
13. Federici J.F., Schulkin B., Huang F., и др. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs // Semicond. Sci. Technol. 2005. Т. 20, №7. С. S266–S280.
14. Liu H.-B., Zhong H., Karpowicz N., и др. Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defense and Security Applications // Proceedings of the IEEE. 2007 г., Т. 95, №8. С. 1514-1527.
15. Ren A., Zahid A., Fan D., и др. State-of-the-art in terahertz sensing for food and water security – A comprehensive review // Trends in Food Science & Technology. 2019. Т. 85. С. 241-251.
16. Ergün S., Sönmez S.. Terahertz Technology for Military Applications // Journal of Management and Information Science. 2015. Т. 3, № 1. С. 13-16

17. Gente R., Jansen C., Geise R., и др. Scaled Bistatic Radar Cross Section Measurements of Aircraft With a Fiber-Coupled THz Time-Domain Spectrometer // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2012. Т. 2, № 4. С. 424 – 431.
18. Dodson C., Fitch M. J., Osiander R., Spicer J.B. Terahertz imaging for anti-personnel mine detection // *Terahertz for Military and Security Applications III, Proc. SPIE*. 2005. Т. 5790.
19. Выставкин А.Н., Шитов С.В., Банков С.Е. и др. Высокочувствительный матричный радиометр диапазона частот 0,13-0,38 ТГц на сверхпроводниковых болометрах для телескопа БТА // *Известия вузов. Радиофизика*. 2007. Т. 50, № 10-11. С. 852-857.
20. Юсупов Р.А., Гунбина А.А., Чекушкин А.М., и др. Квантовый отклик болометра на основе структуры СИНИС с подвешенным абсорбером. *Физика твердого тела*. 2020. Т. 62, №9. С. 1403-1406.
21. А.А. Гунбина, М.А. Тарасов, С.А. Лемзяков, и др. Спектральный отклик матриц полуволновых и электрически малых антенн с СИНИС-болометрами// *Физика Твердого Тела*. 2020. Т. 62, №9. С. 1440-1446.
22. Gunbina A.A., Tarasov M.A., Fominskii M.Yu., и др. Fabrication of aluminum nanostructures for microwave detectors based on tunnel junctions// *Принята в печать в Advances in Microelectronics: Reviews, Book Series*. 2021. Т. 3.
23. Тарасов М.А., Гунбина А.А., Фоминский М.Ю., Чекушкин А.М. Способ изготовления тонкопленочных туннельных переходов методом отдельной литографии. Подана заявка на патент. Заявка №2021108441. Дата регистрации 30.03.2021.
24. Гунбина А.А., Тарасов М.А., Лемзяков С.А., и др. Arrays of electrically small antennas with SINIS detectors for SubTHz astronomy and atmosphere propagation research// *Подан доклад на конференцию "МетаНано"*. 2021.
25. Tarasov M.A., Gunbina A.A., Mahashabde S., и др. Arrays of Annular Antennas With SINIS Bolometers// *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020. Т. 30, №3. 2300106
26. Tarasov M., Sobolev A., Gunbina A., и др. Annular Antenna Array Metamaterial with SINIS bolometer// *Journal of Applied Physics*. 2019. Т. 125, №17. С. 174501-1 – 174501-6.
27. Tarasov M.A., Chekushkin A.M., Yusupov R.A., и др. Matching of Radiation with Array of Planar Antennas with SINIS Bolometers in an Integrating Cavity// *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020. Т. 65, №1. С. 65-74.
28. Тарасов М.А., Махашабде С., Гунбина А.А., и др. Матрица кольцевых антенн с криогенными болометрами диапазона 345 ГГц в интегрирующей полости// *Радиоэлектроника*. 2018. Т. 1. 14 с.

29. Лемзяков С.А., Эдельман В.С. Использование RuO_2 -резисторов как широкополосных низкотемпературных приемников излучения// Приборы и техника эксперимента. 2016. Т. 59, №4. С. 146-151.
30. Sobolev A.S., Beiranvand B., Chekushkin A.M., и др. Wideband metamaterial-based array of SINIS bolometers// EPJ Web of Conferences. 2018. Т. 195. 05009.
31. Юсупов Р.А., Соболев А.С., Гунбина А.А., и др. Метаматериалы с интегрированными СИНИС болометрами// Материалы докладов 28-ой Международной Крымской конференции. 2018. Т. 4. С.856-861.
32. Bubnov G.M., Abashin E.B., Balega Yu.Yu., et. al. Searching for New Sites for THz Observations in Eurasia// IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. Т. 5, №1. С. 64-72.
33. Чекушкин А.М. Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-болометрами: дис. кан. ф.-м. наук. М., 2020. 127 с.
34. Вдовин В.Ф., Гунбина А.А., Мансфельд М.А., и др. Согласование матрицы планарных антенн с СИНИС болометрами с внешним излучением диапазона 350 ГГц// Материалы конференции «28-ой Международной Крымской конференции». 2018. Т. 4.. С. 1563-1574.
35. Бейранванд Б., Вдовин В.Ф., Гунбина А.А., и др. Матрицы планарных антенн с интегрированными СИНИС болометрами для радиоастрономических исследований// Материалы конференции «6-ая Всероссийская Микроволновая конференция». 2018. С. 253-257.