

На правах рукописи  
УДК 537.86+621.396.67

Уваров Андрей Владимирович

Иммерсионные линзовые антенны и квазиоптические  
системы на их основе для высокочувствительных  
приемников миллиметрового и субмиллиметрового  
диапазонов длин волн

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва.

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН  
**Шитов Сергей Витальевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор,  
декан факультета Информационных систем и компьютерных технологий Российского нового университета  
**Крюковский Андрей Сергеевич**

кандидат физико-математических наук,  
научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН  
**Соболев Александр Сергеевич**

**Ведущая организация:** Институт прикладной физики РАН

Защита состоится «\_\_\_» декабря 2010 г. В \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. На заседании Диссертационного совета Д 212.156.06 при Московском физико-техническом институте (государственном университете) по адресу: 117393 г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, корп. В-2.

Отзывы можно направлять по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, МФТИ, Диссертационный совет Д 212.156.06. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ (ГУ).

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.156.06  
кандидат технических наук, доцент



Н. П. Чубинский

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

В настоящее время заметно возрос интерес к чувствительным приемникам терагерцового диапазона частот, в котором традиционные решения с использованием волноводов и рупорных антенн являются не только дорогостоящими, но и находятся на грани существующих технологических возможностей. К перспективным детекторам терагерцового излучения следует отнести смесители на основе сверхпроводниковых туннельных переходах типа СИС (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) и смесители на болометрах с горячими электронами, которые являются наиболее чувствительными преобразователями частоты вниз в диапазонах частот 100-1000 ГГц и 1-5 ТГц соответственно, а также детекторы на эффекте высокочастотной кинетической индуктивности и болометры на краю перехода в сверхпроводящее состояние – чувствительными прямыми детекторами. Они все шире используются для астрономии и наземной радиоастрономии. Возможно также использование в задачах радиовидения. Решение проблемы передачи энергии путем канализации излучения в квази-оптический тракт является неотъемлемой фазой конструирования таких смесителей и детекторов. Широкополосные интегральные иммерсионные линзовые антенны (далее по тексту – ИИЛА), состоящие из диэлектрической плоско-выпуклой линзы и планарного облучателя, помещенного в фокус линзы непосредственно на ее плоской поверхности, находят в последнее время все более широкое применение не только в лабораторных исследованиях, но и в практических приемниках субмиллиметровых волн. Объясняется это такими преимуществами линзовых антенн перед рупорными, как дешевизна, простота изготовления и отсутствие ограничений на размер кристалла микросхемы приемника. Следует отметить, что в настоящее время разработаны только единичные экспериментальные модели радиометров с интегральными линзовыми антеннами. Синтез диаграмм направленности облучателей на основе ИИЛА,

сравнимых по коэффициенту использования поверхности рефлектора телескопа, симметрии и коэффициенту поляризации со скалярными рупорами является непростой задачей, что вызвано как неизбежными погрешностями изготовления комплексной антенной структуры, так и наличием фундаментальных ограничений волновой оптики, напрямую связанных с геометрией линзы и способом ее облучения. Исследование свойств и подходов анализа ИИЛА, а так же возможностей использования в сложных квазиоптических системах субмиллиметрового диапазона являются актуальными задачами, представляющими как научный, так и большой практический интерес применительно к вопросам разработки высокочувствительных приемников и детекторов на новых физических принципах.

### **Цель диссертационной работы**

Целью данной работы являются исследование методов электромагнитного анализа, изучение свойств и оптимизация характеристик ИИЛА как облучателя квази-оптических систем, например, радиоастрономического телескопа, для высокочувствительных измерений в субмиллиметровом диапазоне длин волн, что включает в себя анализ устойчивости характеристик, поиск наиболее стабильной конфигурации, повышение интегральной эффективности облучения и исследование шумового вклада в систему.

### **Научная новизна**

Предложен принцип построения многолучевого облучателя с плотным заполнением фокальной плоскости телескопа на основе иммерсионной линзовой антенны, с матрицей планарных облучателей помещенной в фокус линзы.

Проведен анализ допусков и выявлена наиболее стабильная конфигурация ИИЛА, дано объяснение устойчивости свойств оптимальной конфигурации.

Предложена и апробирована методика построения и оптимизации характеристик криогенного чернотельного калибратора, согласованного с диаграммой направленности антенны калибруемого детектора.

### **Практическая значимость результатов работы**

Предложены и апробированы методы численного анализа ИИЛА, разработаны конструкции ИИЛА на несколько частотных диапазонов (200-300 ГГц и 800-950 ГГц), разработано устройство позиционирования кристалла с интегральным планарным облучателем и микросхемой приемника в фокус линзы. Подобные решения могут быть применены для широкого класса приемников и детекторов субмиллиметрового диапазона длин волн.

Разработана и оптимизирована квазиоптическая схема стенда измерения характеристик смесителей на сверхпроводниковых туннельных переходах диапазона 800-950 ГГц. Подобная система может быть применена как в лабораторных, так и в промышленных конфигурациях высокочувствительных приемников субмиллиметрового диапазона.

Спроектирована микросхема детектора диапазона 200-300 ГГц на основе тонкопленочного ниобиевого болометра, включенного в планарный облучатель иммерсионной линзовой антенны, для макетирования сложных квазиоптических систем с ИИЛА и исследования их свойств при комнатной температуре. Разработанный детектор имеет расчетную предельную чувствительность (эквивалентную шумовую мощность) на уровне  $10^{-9} \dots 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, что сравнимо с чувствительностью оптоакустического преобразователя (ячейки Голея) и позволяет использовать детектор в широком спектре задач, включая лабораторные исследования, медицинскую диагностику и безопасность.

Спроектированный, изготовленный и апробированный чернотельный калибратор с диапазоном яркостных температур 3-20 К и диапазоном частот 200-300 ГГц может быть использован для калибровки различных типов низкотемпературных высокочувствительных детекторов включенных в ИИЛА.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Впервые теоретически продемонстрирован и обоснован способ увеличения фактора заполнения фокальной плоскости радиоастрономического телескопа за счет использования в качестве облучателя системы на основе многолучевой интегральной иммерсионной однолинзовой антенны.
2. Показано, что свойства ИИЛА, ДН которой сформирована за счет эффекта дифракции на апертуре линзы, наиболее устойчивы к погрешностям изготовления системы «планарный облучатель – линза».
3. Предложена и апробирована методика проектирования криогенного чернотельного излучателя, полностью согласованного с диаграммой направленности ИИЛА, для калибровки сверхчувствительных низкотемпературных детекторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн в диапазоне яркостных температур 3-20 К
4. Экспериментально продемонстрировано, что чувствительность смесителей выполненных по квазиоптической технологии (включенных в ИИЛА) сравнима с чувствительностью волноводных смесителей, а их различие определяется оптическими свойствами ИИЛА, которые могут, аналогично волноводным структурам, быть оптимизированы для достижения фундаментального предела чувствительности.
5. Предложен метод электродинамического замещения низкотемпературных болометров терагерцового диапазона

боллометрами на основе пленки ниобия, работающими при комнатной температуре, с целью настройки квазиоптической системы охлаждаемого радиометра при комнатной температуре. Для реализации подхода разработан детектор диапазона 200-300 ГГц продемонстрировавший лучшие характеристики в своем классе и сравнимую с оптоакустическим преобразователем чувствительность  $\sim 10^{-10}$  Вт / Гц<sup>1/2</sup>.

### **Личный вклад автора**

Вошедшие в диссертацию оригинальные результаты, представленные в главах 3 и 6, получены автором лично.

Расчет и оптимизация квазиоптической системы стенда измерения характеристик смесителей на сверхпроводниковых туннельных переходах, описанные в главе 4 были проведены автором лично. Экспериментальные результаты, относящиеся к измерению свойств материалов в субмиллиметровом диапазоне, а так же измеренные характеристики смесителей получены совместно с Корюкиным О. В.

Выбор метода расчета, анализ свойств и оптимизация согласования черного тела с антенной калибруемого детектора проводились автором лично, а изготовление – совместно с Корюкиным О. В.; совместно с Кон И. А. проводились низкотемпературные измерения и экспериментальное изучение свойств опытного образца в температурном диапазоне 3-20 К.

Микросхема детектора на основе тонкопленочного ниобиевого боллометра, описанного в главе 7, была предложена и разработана автором лично. Схема измерения электрических свойств образцов пленок боллометра была предложена, топологии опытных образцов боллометров были разработаны, а экспериментальные результаты измерения электрических характеристик этих образцов были получены совместно с Кузминым А. А. Опытные образцы боллометров были изготовлены Кузминым А. А.

## **Апробация результатов**

Основные положения и результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях и семинарах: 16th International Symposium on Space Terahertz Technology, Gothenburg, Sweden, pp. 165-168, 1-4 May, 2005; Semi-Annual Meeting of the Astronomical Society of Japan, Sapporo, Japan, 6-8 October, 2005; 6th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Purple Mountain Observatory, NAOC, CAS, Nanjing, China, 8-10 Dec., 2005; 4<sup>th</sup> ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications, MilliLab, Espoo, Finland, Feb. 15-17, 2006; 17th International Symposium on Space Terahertz Technology, Paris, Report P1-18, 10-12 May, 2006; 7th International Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE-7), Noordwijk, The Netherlands, 21-23 June 2006; Applied Superconductivity Conference (ASC-2006), Seattle, USA, August 27 – September 01, 2006; Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 12-15 марта 2007 г.; 18th International Symposium on Space Terahertz Technology, California Institute of Technology, Pasadena, USA, March 21-23, 2007; XI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Звенигород, 21 - 26 мая 2007 г.; 6<sup>th</sup> International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'07), Kharkov, Ukraine, June 25-30, 2007; 2007 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2007), Niigata, Japan, August 20-24, 2007; Joint 32<sup>nd</sup> International Conf. on Infrared and Millimetre Waves and 15<sup>th</sup> International Conference on Terahertz Electronics, Cardiff, UK, 2-7 September, 2007; 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07), Sevastopol, the Crimea, Ukraine, 17-21 September, 2007; конкурс молодых ученых им. И. В. Анисимкина, Москва, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2007; 50-ая научная конференция МФТИ, 2007; Eighth International Workshop on Low Temperature Electronics, Jena/Gabelbach, Germany, June 22-25, 2008; 19<sup>th</sup> International Symposium on Space Terahertz Technology, Groningen, The



Netherlands, April 28-30, 2008; Международная научно-техническая конференция «Нанотехнологии и наноматериалы», 30-31 марта, 1 апреля 2009г., МГОУ, Москва; III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», Москва, ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009 г; 7th Intern. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter waves (MSMW'10) and Workshop on Terahertz Technology (TERATECH'10), Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 21 печатная работа, 6 из них – в журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, и 15 – в сборниках трудов отечественных и зарубежных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы, в ней 185 страниц текста, 70 рисунков и 13 таблиц.

## Краткое содержание работы

Во **Введении** дана общая характеристика диссертации и ее структуры, сформулирована цель работы, обоснованы актуальность и научная новизна, определена практическая значимость работы.

**Глава 1** представляет собой краткий обзор по приемным устройствам с планарными интегральными антеннами. В ней проанализированы подходы к синтезу узкой ДН, необходимой для облучения рефлектора телескопа, с помощью планарных антенн и конструкций на их основе. В качестве одной из возможностей создания высоконаправленной антенны описана конфигурация интегральной иммерсионной линзовой антенны (см. рис. 1), которая состоит из диэлектрической плоско-выпуклой линзы и планарного облучателя, помещенного в фокус линзы непосредственно на ее плоской поверхности. Описана концепция и принцип действия ИИЛА. Проведено сравнение с другими подходами, такими как многоэлементные антенные решетки, планарные антенны на тонких мембранах и заполненные диэлектриком параболические отражатели с планарным облучателем. Выявлены преимущества ИИЛА, заключающиеся в простоте изготовления, эксплуатации, а так же высоком качестве ДН, и устойчивости к погрешностям изготовления. Так же проведено сравнение ИИЛА с гофрированными рупорными антеннами в контексте использования в качестве облучателей рефлекторных радиотелескопов.

Отдельное место в главе 1 занимает описание численных методов моделирования и анализа свойств ИИЛА. Основная трудность расчетов заключается в больших размерах структуры по сравнению с длиной волны, что приводит к нехватке оперативной памяти и затрудняет применение коммерческих электромагнитных пакетов САПР для моделирования свойств структуры как единого целого. В связи с этим для анализа ИИЛА был применен метод расчета основанный на комбинации подходов геометрической и физической оптики. Решение задачи дифракции на линзе сводилось к вычислению интеграла Кирхгофа-Гюйгенса. Распределение

токов по поверхности линзы в свою очередь находилось по заданному распределению токов планарного облучателя. Такой подход дает решение с разумной точностью и не противоречит результатам, получаемым с помощью других методов.

**Глава 2** посвящена выбору параметров структуры ИИЛА и возможностям настройки антенны. Рассмотрены различные типы планарных облучателей: двойная щелевая антенна и двойная дипольная антенна с контр-рефлектором, – для каждого из которых определена оптимальная конфигурация. Детально описано решение проблемы двухполяризационного приема излучения с помощью скрещенной двойной щелевой антенны в качестве планарного облучателя иммерсионной линзы. Приведены примеры опытных образцов микросхем смесителей на сверхпроводниковых туннельных переходах и детекторов (болометров) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов включенных в планарные антенны. Рассмотрены способы согласования импеданса чувствительных элементов с антенной для описанных устройств. Приведены экспериментально измеренные ДН ИИЛА с включенным в нее СИС-смесителем в диапазоне 800-950 ГГц, подтвердившие применимость численного метода анализа и показавшие необходимость детального изучения влияния погрешностей изготовления антенны на ее характеристики.

**Глава 3** посвящена анализу устойчивости свойств иммерсионных линзовых антенн к погрешностям изготовления. Часто конструкция приемников основывается на симметрии планарной структуры, в том числе симметрии возбуждения элементов планарного облучателя (например, щелей в двойной щелевой антенне) и точности установки кристалла микросхемы с планарной антенной в фокус линзы. В данной главе определены возможные причины деградации диаграммы направленности для ИИЛА с двухвибраторным планарным облучателем: нарушение симметрии возбуждения вибраторов вызванное рассовмещением слоев во время фотолитографического процесса, неточность установки чипа с планарной

антенной структурой в фокус линзы, неточность нанесения просветляющего покрытия.

Приведены данные численного анализа двух наиболее перспективных конструкций СИС смесителей: с двойной щелевой антенной и двойной дипольной с контр-рефлектором – для применения в составе спектральных приемников диапазона 700-1000 ГГц. Продемонстрировано, что двойная дипольная антенна с контр-рефлектором более устойчива к неизбежным неточностям изготовления, в силу эффективно большего числа элементов.

Проведено сравнение двух характерных конфигураций иммерсионной линзы: синтезированного эллипсоида и апланатической – с точки зрения устойчивости к погрешностям изготовления. Продемонстрировано, что, несмотря на больший КИП рефлектора телескопа, характеристики апланатической линзы более подвержены воздействию неточностей изготовления и асимметрии возбуждения структуры, которые приводят к появлению остаточных дифракционных максимумов внутри главного лепестка. Вместе с тем, синтезированная эллипсоидальная линза благодаря формированию ДН за счет дифракции на своей апертуре менее подвержена к нарушению формы и симметрии главного лепестка. Основной эффект ослабления эффективности согласования с телескопом связан с неточностью позиционирования планарного облучателя в фокус линзы. Наклон ДН вызванный недостаточной точностью установки планарного облучателя иммерсионной линзы, возможно, компенсировать, за счет механической юстировки системы, введением дополнительных регулировочных винтов, обеспечивающих компенсирующий наклон ДН. Описана методика прецизионного позиционирования планарного облучателя в фокус иммерсионной линзы с микронной точностью.

Так же проведен анализ влияния на антенные характеристики и чувствительность приемника не идеальности настроечных цепей балансного смесителя на сверхпроводниковых туннельных переходах. Выявлено, что наибольший эффект ослабления согласования ДН антенны смесителя с

телескопом связан с частотной зависимостью фазового набега в линии задержки тракта ПЧ. Однако, абсолютное ослабление КИП телескопа оказалось  $<10\%$  во всем диапазоне ПЧ, что подтвердило применимость предложенной концепции балансного смесителя на сверхпроводниковых туннельных переходах.

В главе 4 рассмотрены подходы к построению квазиоптического стенда измерения предельной (шумовой) чувствительности смесителей на сверхпроводниковых туннельных переходах методом двух нагрузок в диапазоне 800-950 ГГц (см. рис. 2). Проведенное сравнение двух типов квазиоптических диплексеров субмиллиметрового диапазона позволило выбрать для удобства проведения грубых измерений приемников, когда требуется большой динамический диапазон мощности сигнала гетеродина – метало-сеточный диплексер, а для уточнения характеристик наилучших образцов – тонкопленочный диплексер из пленки полиимида толщиной 25 мкм.

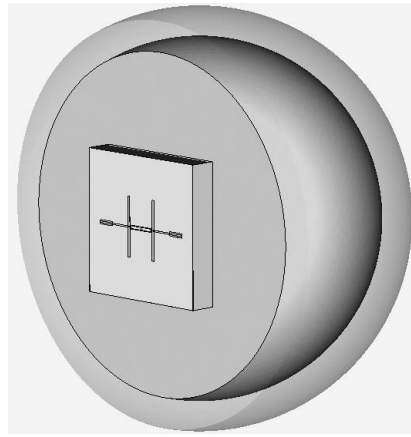
Центральное место в данной главе занимает описание подхода и результатов оптимизации согласования квазиоптических пучков для эффективного использования мощности сигнала гетеродина. Методика заключалась в моделировании ДН каждой антенны эквивалентным гауссовым пучком (основной гауссовой модой), дальнейший расчет преобразования гауссова пучка квази-оптическими фокусирующими элементами сводился к математической операции матричного перемножения. Простота вычислений и достаточная точность метода для расчета согласования смесителя с гетеродином делают его эффективным инструментом анализа. Подход моделирования ДН рупорных антенн гауссовым пучком, был расширен на еще один класс облучателей квазиоптических систем – ИИЛА, для которых нормированная свертка с основной гауссовой модой (коэффициент связи) достигает 0,8, что является точность выбранного приближения. Результаты расчета и итоговые оптимальные квазиоптические схемы согласования представлены для двух

конфигураций стенда: для измерения квазиоптических смесителей с ИИЛА и для измерения волноводных смесителей с диагональной рупорной антенной.

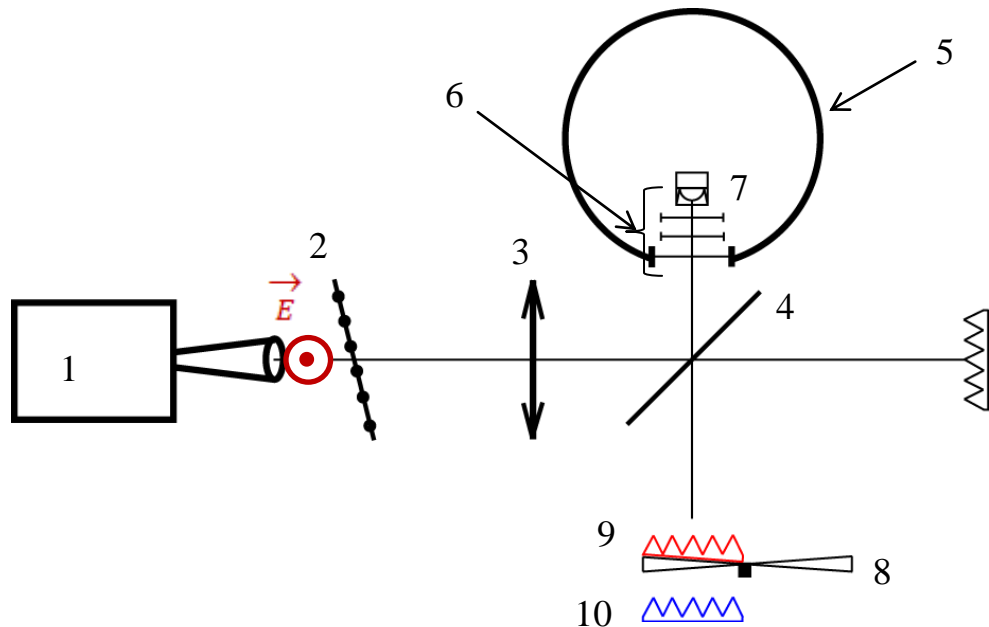
Детально исследованы свойства материалов элементов квазиоптической системы стенда в субмиллиметровом диапазоне длин волн, с применением Фурье-спектрометрических измерений. Данный анализ позволил корректно учесть вклад квазиоптической системы стенда в шумовую температуру смесителя и скорректировать экспериментальные результаты.

Экспериментально измеренные характеристики опытных образцов смесителей в диапазоне 800-950 ГГц так же приведены в данной главе. Измеренная шумовая температура в 300 К смесителей на сверхпроводниковых туннельных переходах сравнима с лучшими мировыми аналогами.

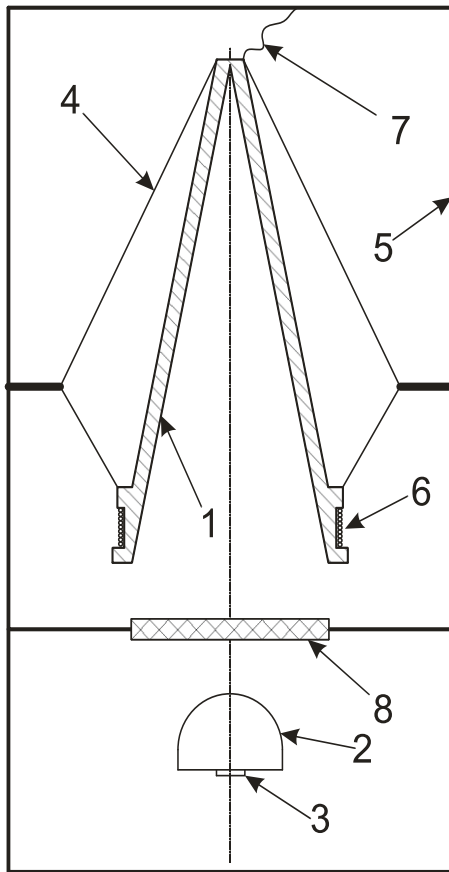
**Глава 5** посвящена калибровке детекторов на краю перехода в сверхпроводящее состояние с помощью чернотельного излучателя. В данной главе описаны результаты исследования, основной задачей которого являлась разработка излучателя на основе черного тела (далее по тексту – ЧТ) для калибровки высокочувствительных сверхпроводниковых приемников и детекторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, например, болометров на краю перехода в сверхпроводящее состояние. Рабочая температура подобных детекторов может лежать в пределах 0,1 – 1 К, а чувствительность (эквивалентная шумовая мощность) – достигать значений  $\sim 10^{-18}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Однако такие детекторы могут обладать достаточно низкой мощностью насыщения, что требует применения калиброванных излучателей с яркостными температурами в диапазоне 3 – 20 К.



**Рис. 1.** Типичная конфигурация иммерсионной линзовой антенны. В фокус диэлектрической линзы с просветляющим покрытием помещена микросхема с планарным облучателем типа «двойная щель» и настроечными цепями. Рисунок схематический, соотношения между размерами линзы и размерами планарного облучателя не соблюдены из соображений наглядности.



**Рис. 2.** Конфигурация квазиоптического стенда измерения шумовой температуры смесителей на сверхпроводниковых туннельных переходах диапазона 800-950 ГГц. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – гетеродин на основе ЛОВ ОВ-82, 2 – квазиоптический аттенюатор на основе металосеточного поляризатора, 3 – полиэтиленовая линза с фокальным расстоянием 120 мм, 4 – диплексер, 5 – криостат, 6 – квазиоптическая система криостата, включающая в себя вакуумное окно и два инфракрасных фильтра закрепленных на азотной и гелиевой ступенях криостата, 7 – смеситель с иммерсионной линзовой антенной, 8 – обтюратора обеспечивающий периодическое переключение антенны смесителя между горячей (9) и холодной (10) нагрузками. Основная поляризация (поляризация антенны гетеродина и смесителя) – вертикальная (перпендикулярна плоскости рисунка).



а)



б)

**Рис. 3.** а) Схема расположения черного тела и калибруемого детектора с иммерсионной линзовой антенной в криостате. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – коническое черное тело, 2 – иммерсионная линзовая антенна детектора закрепленная на ступени 0,3 К криостата, 3 – детектор – чувствительный элемент (болометр на краю перехода в сверхпроводящее состояние) включенный в планарную антенну, помещенную в фокус линзы, 4 – теплоизолирующий подвес из синтетического волокна Kevlar для тепловой изоляции ЧТ от 3 К ступени криостата, 5 – радиационный экран 3 К ступени криостата, 6 – нагреватель ЧТ, 7 – тепловой шунт на ступень 3 К криостата с рассчитанной теплопроводностью, 8 – инфракрасный фильтр, для снижения потока излучения ИК диапазона на ступень 0,3 К криостата.

б) Фотография опытного образца ЧТ.

Для расчета согласования антенны калибруемого детектора с чернотельным излучателем был предложен гибридный подход, основанный на методе статистических весов при обратной трассировке лучей с учетом ДН антенны детектора. Выбранные в результате анализа параметры конструкции ЧТ позволили получить характерное время равномерного



прогрева менее 1 с при коэффициенте черноты не менее 0,99. Разработанная конструкция криогенного чернотельного излучателя (см. рис. 3), представляет собой медный конус, являющийся одновременно механическим каркасом-подложкой и теплопроводом. На внутреннюю поверхность конуса нанесен слой поглотителя толщиной 1,5 мм. ЧТ, закрепленное на теплоизолирующем подвесе из синтетических нитей, снабжено тепловым шунтом на ступень криостата 3 К. Тепловой шунт выполнен в виде отрезка медной проволоки, имеющего расчетную теплопроводность. Изменение температуры черного тела достигается за счет разогрева медного конуса-подложки с помощью электронагревателя, представляющего собой проволочный резистор из манганина и закрепленный на внешней поверхности ЧТ. Температура черного тела измеряется термометром, выполненным на основе диода с высокой зависимостью крутизны вольт-амперной характеристики от температуры в диапазоне 2-25 К.

**Глава 6** посвящена описанию многолучевой интегральной иммерсионной линзовой антенны для создания матричного радиометра. Детально исследованы свойства предложенной конфигурации многолучевой ИИЛА, состоящей из одной иммерсионной линзы с матрицей планарных облучателей, помещенных в ее фокус. Продемонстрирована возможность достижения увеличенного на 25% фактора заполнения фокальной плоскости телескопа для многолучевой ИИЛА по сравнению с решеткой рупорных антенн. Выведенное из критерия допустимых аберраций крайних элементов антенной решетки ограничение на минимальный диаметр иммерсионной линзы показало применимость рассмотренного типа антенн в качестве облучателя телескопов с малым размером фокальной области.

**В главе 7** описаны результаты исследования тонкопленочных ниобиевых болометров работающих при комнатной температуре и возможность их интеграции в планарную структуру двойного щелевого облучателя ИИЛА диапазона 200-300 ГГц. Приведена схема измерения вольт-ваттной чувствительности и шумов опытных образцов болометров.

Полученные экспериментальные значения вольт-ваттной чувствительности совместно с температурным коэффициентом сопротивления позволили оценить эквивалентную шумовую мощность болометра (предельную чувствительность), которая составила  $\sim 10^{-10}$  Вт / Гц<sup>1/2</sup>, что сравнимо с чувствительностью оптоакустического преобразователя (ячейки Голея).

Предложенная топология микросхемы детектора на основе ниобиевого болометра интегрированного в двойной щелевой облучатель ИИЛА диапазона 200-300 ГГц описана в завершении главы 7.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Предложенный принцип построения многолучевого облучателя радиоастрономических телескопов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн на основе иммерсионной линзы с матрицей планарных антенны типа «двойная щель», помещенной в фокус такой линзы, позволил увеличить фактор заполнения фокальной плоскости телескопа на 25% по сравнению с матрицей рупорных антенн.
2. Экспериментально выявлена необходимость детального учета погрешностей изготовления на характеристики ИИЛА и систем на их основе.
3. Проведен анализ допусков и влияния погрешностей изготовления на характеристики иммерсионной линзовой антенны. Сравнение эллиптической и апланатической конфигураций иммерсионных линз показало, что эллиптическая конфигурация ИИЛА более устойчива к погрешностям изготовления. Сравнение различных топологий планарных облучателей, а именно двойной дипольной с контр-рефлектором и двойной щелевой продемонстрировало, что при примерно одинаковых эффектах влияния погрешностей изготовления на ДН облучателя, более устойчивыми характеристиками обладает двойная дипольная антенна.

4. Разработана методика расчета и оптимизации согласования чернотельного излучателя с ДН антенны калибруемого детектора в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн.
5. Спроектирован, изготовлен и апробирован чернотельный излучатель с диапазоном яркостных температур 3-20 К на диапазон частот 200-300 ГГц, предназначенный для калибровки болометров на краю перехода в сверхпроводящее состояние, интегрированных в планарный облучатель иммерсионной линзы.
6. Разработан стенд измерения шумовой температуры СИС смесителей диапазона 800-950 ГГц для смесителей двух конфигураций: с диагональной рупорной антенной (волноводной) и с ИИЛА (квазиоптической).
7. Проведено сравнение различных типов диплесеров квазиоптических пучков субмиллиметрового диапазона частот.
8. Измерена шумовая температура смесителя выполненного по квазиоптической технологии (включенного в ИИЛА) в 400 К на частоте 890 ГГц, что сравнимо с лучшими достигнутыми значениями для волноводных смесителей.
9. Разработан детектор на основе тонкопленочного ниобиевого болометра включенного в ИИЛА, работающий при комнатной температуре и предназначенный для электродинамического замещения низкотемпературных болометров терагерцового диапазона для тестирования и настройки квазиоптической системы радиометра. Приведенная в единичному току смещения чувствительность детектора составила  $\sim 10^4$  В / Вт А, что является рекордным для данного класса болометров. Оцененная предельная шумовая мощность составила  $\sim 10^{-10}$  Вт / Гц<sup>1/2</sup>, что сравнимо с чувствительностью оптоакустического преобразователя.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Shitov S. V., Noguchi T., Matsunaga T., Tamura T., Uvarov A. V., Cohn I. A., Hasegawa T. A SIS mixer for ALMA band 10: development concept // Proc. of 16th International Symposium on Space Terahertz Technology, Gothenburg, Sweden. 2005. Pp. 165-168.
2. Shitov S. V., Uzawa Y., Noguchi T., Shan W. L., Matsunaga T., Tamura T., Endo A., Koryukin O. V., Uvarov A. V., Cohn I. A. Development of a SIS receiver for ALMA Band-10 // Proc. 4<sup>th</sup> ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications, MilliLab, Espoo, Finland. Feb. 15-17 2006. ESA WPP-258. Pp. 465.
3. Shitov S. V., Koryukin O. V., Uzawa Y., Noguchi T., Uvarov A. V., Cohn I. A. Development of Balanced SIS Mixers for ALMA Band-10 // Proceedings of 17th International Symposium on Space Terahertz Technology, Paris. 2006. Pp. 90-93.
4. Vystavkin A. N., Shitov S. V., Kovalenko A. G., Pestriakov A. V., Cohn I. A., Uvarov A. V. Arrays of TES direct detectors for supersensitive imaging radiometers of 1.0 – 0.2 mm waveband region // 7th International Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE-7), Noordwijk, The Netherlands. ESA Proceedings WPP-264. 2006.
5. Uvarov A. V., Shitov S. V., Koryukin O. V., Bukovski M. A., Takeda M., Wang Z., Krough M., Uzawa Y., Noguchi T. Tolerance analysis of THz-range lens-antenna and balanced SIS mixer // Proceedings of 18th International Symposium on Space Terahertz Technology, California Institute of Technology, Pasadena, USA. 2007. Pp. 60-65.
6. Уваров А. В., Шитов С. В., Выставкин А. Н., Банков С. Е. Интегральные линзовые антенны субмиллиметрового диапазона длин волн в дифракционном пределе: допуски при проектировании // Труды XI Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». Звенигород. 21 - 26 мая 2007. С. 42-44.
7. Shitov S. V., Koryukin O. V., Uvarov A. V., Bukovski M. A., Uzawa Y., Noguchi T., Takeda M., Wang Z., Krough M., Vystavkin A. N. Study on SIS mixers for “ALMA” Band-10 // Proceedings of 6<sup>th</sup> International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves,

- Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'07). Kharkov. Ukraine. June 25-30 2007. report W-12. Pp. 219-221.
8. Vystavkin A. N., Shitov S. V., Kovalenko A. G., Pestryakov A. V., Cohn I. A., Uvarov A. V., Koryukin O. V., Vdovin V. F., Perminov V. G., Trofimov V. N., Chernikov A. N., Mingaliev M. G., Yakopov G. V., Zabolotny V. F. An array radiometer for 0.13-0.38 THz based on superconducting bolometers for BTA // Proceedings of 6<sup>th</sup> International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'07). Kharkov. Ukraine. 2007. report W-4. Pp. 195-197.
  9. Shitov S. V., Koryukin O. V., Uzawa Y., Noguchi T., Uvarov A. V., Bukovski M. A., Cohn I. A. Design of Balanced Mixers for ALMA Band-10 // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2007. V. 17. No. 2. Pp. 347-350.
  10. Uvarov A. V., Shitov S. V., Uzawa Y., Vystavkin A. N. Tolerance Analysis of THz-range Integrated Lens Antennas // Proceedings of 2007 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2007). Niigata. Japan. report POS2-3. 2007.
  11. Uvarov A. V., Shitov S. V., Bankov S. E., Zabolotny V. F., Koryukin O. V. and Vystavkin A. N. Integrated Immersion Lens Antennas for Millimeter and Submillimeter Wave Array Detectors // Proceedings of 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07). Sevastopol, the Crimea, Ukraine. 2007. Pp. 379-381.
  12. Выставкин А. Н., Шитов С. В., Банков С. Е., Коваленко А. Г., Пестряков А. В., Кон И. А., Уваров А. В., Вдовин В. Ф., Перминов В. Г., Трофимов В. Н., Черников А. Н., Мингалиев М. Г., Якопов Г. В., Заболотный В. Ф. Высокочувствительный матричный радиометр диапазона частот  $\sim 0,13 - 0,38$  ТГц на сверхпроводниковых болометрах для телескопа БТА // Известия ВУЗов, Радиофизика. 2007. Том L. № 10-11. С. 941-947.
  13. Уваров А. В., Шитов С. В., Многолучевая иммерсионная линзовая антенна для высокочувствительного матричного радиометра миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн // Труды 50-ой научной конференции МФТИ. 2007. Часть 5. С. 152-154.

14. Vystavkin A.N., Shitov S.V., Bankov S.E., Kovalenko A.G., Pestryakov A.V., Kon I.A., Uvarov A.V., Vdovin V.F., Perminov V.G., Trofimov V.N., Chernikov A.N., Mingaliev M.G., Yakopov G.V., Zabolotniy V.F., High-sensitivity 0.13 - 0.38-THz matrix radiometer based on superconducting bolometers for the BTA telescope // Radiophysics and Quantum Electronics. 2007. T. 50. № 10-11. С. 852-857.
15. Vystavkin A. N., Kovalenko A. G., Shitov S. V., Pestryakov A. V., Bankov S. E., Zabolotny V. F., Frolova E. V., Cohn I. A., Koryukin O. V. , Kuzmin A. A., Zubovich A. A., Uvarov A. V., Il'in A. S., Trofimov V. N., Chernikov A. N., Vdovin V. F., Perminov V. G., Bol'shakov O. S., Mingaliev M. G., Yakopov G. V. "Development of high-sensitive 1.2 mm imaging radiometer with two-polarization antenna-coupled TES-bolometer array for ground-based 6-m optical telescope // Proc. SPIE 7020, 702024. 2008.
16. Bukovski M. A., Shitov S. V., Uvarov A. V., Koryukin O. V., Uzawa Y. SIS mixers for ALMA band-10: comparison of epitaxial and hybrid circuits // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen. The Netherlands. 2008. P. 540-543.
17. Shitov S. V. , Inatani J., Shan W.-L., Takeda M., Uvarov A. V., Uzawa Y., Vystavkin A. N. Measurement of emissivity of the ALMA antenna panel at 840 GHz using NbN-based heterodyne SIS receiver // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen. The Netherlands. 2008. P. 263-266.
18. Уваров А. В., Шитов С. В., Выставкин А. Н., Многолучевая иммерсионная линзовая антенна для высокочувствительного матричного радиометра миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн // Нелинейный мир. 2008. Т. 6. № 4. С. 253-253.
19. Выставкин А. Н., Коваленко А. Г., Шитов С. В., Корюкин О. В., Кон И. А., Кузьмин А. А., Уваров А. В., Ильин А. С. Сверхпроводниковые наноболометры-сенсоры на горячих электронах для сверхчувствительных матричных радиометров терагерцового диапазона частот // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 6. С. 757–763.
20. Уваров А. В., Шитов С. В., Выставкин А. Н. Анализ свойств многолучевой иммерсионной линзовой антенны для

высокочувствительного радиометра субмиллиметрового диапазона длин волн на основе болометров на краю перехода в сверхпроводящее состояние // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 8. С. 43-50.

21. Уваров А. В., Шитов С. В., Выставкин А. Н. Анализ и конструирование криогенного квазиоптического чернотельного калибратора миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн // Метрология. 2010. № 9. С. 3-14.

Уваров Андрей Владимирович

Иммерсионные линзовые антенны и квазиоптические системы на их основе для высокочувствительных приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн

Подписано в печать 11.10.2010 г.

Печать трафаретная

Усл.п.л. – 1,5

Заказ №

Тираж: 100 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

[www.autoreferat.ru](http://www.autoreferat.ru)