

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Третьякова Ивана Васильевича

на диссертацию Чекушкина Артема Михайловича «Матрицы планарных кольцевых антенн с СИНИС-детекторами и матрицы криогенных фильтров» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 (Радиофизика)

Общая характеристика диссертационной работы:

Диссертация представлена на 146 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 94 наименования.

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. 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 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 ($SAI/SSIN=200$ и 3) и расстоянием от сверхпроводника до нормального металла (2 и 5 мкм). 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.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

Актуальность.

Диссертация Чекушкина А.М. посвящена исследованию актуального вопроса чувствительности и динамического диапазона матриц кольцевых антенн с болометрами типа Сверхпроводник-Изолятор-Нормальный металл-Изолятор-Сверхпроводник (СИНИС-болометр).

Приемные устройства на основе СИНИС-болометров интересны тем, что позволяют создать одни из самых чувствительных приемников мм и суб-мм диапазона наряду с детекторами на краю сверхпроводящего перехода (Transition edge sensor, TES) и детекторами на кинетической индуктивности (Kinetic inductance detector, KID) для решения задач наблюдательной астрономии в таких проектах как Миллиметрон, CORE, BOOMERANG, OLIMPO, LSPE, БТА, АРЕХ и СУФФА.

Использование матриц планарных антенн с интегрированными СИНИС-болометрами позволяет повысить допустимую приемную мощность, что особенно актуально для наземной радиоастрономии.

Новизна и достоверность.

В работе представлена концепция матриц электрически малых кольцевых антенн, в которые интегрированы СИНИС-болометры. Использование кольцевых антенн, существенно меньшего размера, чем длина волны, позволяет значительно повысить плотность компоновки СИНИС-болометров, улучшив чувствительность и повысив динамический диапазон приемной системы. Кроме того, в рамках работы произведена оптимизация технологии изготовления, которая позволила уменьшить число технологических циклов при изготовлении СИНИС-болометров и улучшить их качество.

Впервые предложен и разработан криогенный перестраиваемый фильтр, на основе интерферометра Фабри-Перо. Работоспособность фильтра была продемонстрирована при низких (270 мК) температурах и в полосе частот 100-500 ГГц. Данный фильтр позволяет проводить эксперимент по спектральной калибровке болометров, когда и фильтр и источник излучения находятся внутри закрытого криостата. Подобный тип эксперимента существенно упрощает оптический тракт в сравнении со случаем использования ЛОВ, которая всегда находится снаружи криостата.

Достоверность полученных результатов подтверждается корреляцией проведенных электродинамических расчетов параметров периодических массивов болометров в кольцевых

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.

Научная и практическая значимость.

Разработанные, изготовленные и измеренные приемные матрицы планарных кольцевых антенн, с интегрированными СИНИС-боллометрами, могут быть прототипом приемника для проведения измерений на радиотелескопах.

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

Разработанные матрицы кольцевых антенн с характерным размером существенно меньше, чем длина волны, позволят повысить плотность компоновки СИНИС боллометров.

Замечания.

* Во Введении к Диссертации и далее по тексту автор называет исследуемый в работе боллометр - Сверхпроводник-Изолятор-Нормальный металл-Изолятор-Сверхпроводник (СИНИС). Из текста Диссертации следует, что принцип работы СИНИС идентичен принципу работы боллометра на холодных электронах, в англоязычной литературе называемого Cold electron bolometer (CEB) with SIN tunnel junctions. Так как используемое автором название по сути дублирует существующее названия для такого типа приборов - боллометр на холодных электронах, Cold electron bolometer with SIN tunnel junctions, то полезно прямо указать принципиальные отличия СИНИС и Cold electron bolometer основываясь на соответствующих ссылках на литературу.

* Более подробное сравнение результатов экспериментальных измерений свойств разрабатываемых массивов боллометров и приведенных в Диссертации результатов электродинамических расчетов параметров периодических массивов боллометров в кольцевых антеннах могли бы существенно подкрепить выносимые на защиту положения Диссертации.

Данные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, которая выполнена на хорошем научном уровне.

Общая оценка диссертационной работы.

Диссертационная работа Чекушкина Артема Михайловича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение новой научной задачи о создании чувствительных, с широким динамическим диапазоном матриц кольцевых антенн с

боллометрами типа Сверхпроводник-Изолятор-Нормальный металл-Изолятор-Сверхпроводник. Решение данной задачи является существенным этапом в развитии радиофизики. Представленная диссертация является самостоятельным и завершенным научным исследованием. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Научные положения диссертации аргументированы и обоснованы, а содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности. 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. Результаты диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных научных конференциях, известны специалистам. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Чекушкин Артем Михайлович несомненно заслуживает присвоения ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 1.3.4 - радиофизика.

Официальный оппонент,
Кандидат физико-математических наук,
Старший научный сотрудник
Отдела приёмопередающих комплексов,
Лаборатории терагерцовых приборов и технологий,
Астрокосмический центр
Физического института им. П.Н.Лебедева
Российской академии наук.

Третьяков И.В.



«15» июня 2022 г.

Третьяков Иван Васильевич, кандидат физико-математических наук, 01.04.03 «Радиофизика», 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32 к. 706, +7(495) 333-14-34, ivantretykov@mail.ru, Астрокосмический центр Учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук (АКЦ ФИАН РАН), старший научный сотрудник лаборатории терагерцовых приборов и технологий, отдел приемопередающих комплексов.

Подпись Третьякова И.В. заверяю.

Ученый секретарь Физического института им. П.Н.Лебедева
Российской академии наук.



Колобов А.В.