

  
«Утверждаю»  
Директор  
Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской  
академии наук» (ИПФ РАН),

член – корр. РАН  
Г.Г. Денисов

«17» апреля 2020 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Юсупова Рената Альбертовича  
**«Болометр на основе структуры сверхпроводник – изолятор - нормальный металл - изолятор – сверхпроводник с подвешенным абсорбером»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

В диссертационной работе Юсупова Р.А. «Болометр на основе структуры сверхпроводник – изолятор - нормальный металл - изолятор – сверхпроводник с подвешенным абсорбером» разработана и исследована новая конструкция болометров ТГц диапазона, которые могут найти применение в будущих радиоастрономических проектах.

Проведенные ранее исследования показывают, что в основу требуемых для решения актуальных задач терагерцовой астрономии некогерентных приемников могут быть положены болометры структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл - изолятор - сверхпроводник (СИНИС), обладающие мощностью эквивалентной шуму (МЭШ), сравнимой с МЭШ болометров на краю сверхпроводящего перехода (БКП), но имеющими более широкий динамический диапазон и на три порядка большее быстродействие. Одной из проблем существующих конструкций является то, что поглотитель лежит непосредственно на подложке, что влечет за собой большие утечки тепла в подложку. Дополнительно существует проблема утечки тепла и в сверхпроводниковые электроды из-за применения алюминия как в качестве сверхпроводника, так и нормального металла. Данная работа посвящена решению проблем утечки тепла из абсорбера в подложку, а также проблемы утечки тепла в сверхпроводниковые электроды в существующих

конструкциях болометров на основе СИНИС структуры. Была разработана конструкция СИНИС болометра, в которой реализуется болометрический режим работы, в соответствии с предсказаниями, сделанными в ряде теоритических статей. В новой конструкции реализуется на порядок лучшая квантовая эффективность, что значительно приближает параметры такого приемника к предельным оценкам.

Диссертация состоит из Введения, 4 глав, Заключения, Списка условных обозначений, Библиографии и одного приложения. Общий объём диссертации 113 страниц, включая 58 рисунков 2 таблицы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации и определены её цели. Сформулированы научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту. Рассмотрены вопросы авторства в публикациях результатов.

**Первая глава** является обзорной. Представлен обзор литературы по тематике диссертационной работы, в том числе рассмотрены основные существующие типы приемников субММ диапазона, рассмотрена эволюция концепции СИНИС болометра и общий принцип работы таких болометров.

Во **второй главе** предложен новый тип СИНИС болометра, в котором мостик из нормального металла подвешивается между двумя сверхпроводниковыми электродами, что решает проблему высокоэффективной тепловой развязки абсорбера и подложки. Приведена конструкция и основные шаги изготовления с использованием в качестве нормального металла гафния и меди. Рассмотрен процесс приема ТГц излучения такими структурами, рассмотрены два режима работы СИНИС болометра: режим фотонного счетчика и болометрический режим. Проведено моделирование основных характеристик планарных антенн, в которые интегрируются изготовленные болометры. В заключительном подразделе приводятся фотографии изготовленных СИНИС структур, в том числе снятые под углом, которые подтверждают, что действительно удалось сформировать структуры с «подвешенным» мостом.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию изготовленных болометрических структур. Приведена схема измерений по постоянному току. Исследована температурная зависимость ВАХ изготовленных болометров. Исследована проблема несоответствия измеренной сверхпроводниковой щели с табличными данными для алюминия. Обосновано применение еще одного травления верхнего слоя нормального металла. Представлены результаты измерений отклика исследуемой структуры на нагрев постоянным током.

**Четвертая глава** содержит основные результаты данной работы - измерение отклика на внешнее излучение черного тела различной мощности. Приведена подробная схема измерений отклика на внешнее излучение, описаны использующиеся полоснопропускающие фильтры и ЧТ. Подробно

представлен способ расчета мощности, приходящей на антенну в случае использования источника излучения ЧТ с определенной температурой. Продемонстрирована схожесть формы дифференциального сопротивления при нагреве внешним излучением и при увеличении фоновой температуры, что свидетельствует о том, что в таких болометрах получена высокая эффективность термализации принятого излучения, что и обеспечивается высокой квантовой эффективностью.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертации.

**Основные научные результаты работы состоят в том, что:**

1) Разработана, реализована и исследована новая оригинальная конструкция болометра на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник с подвешенным абсорбером, позволяющая решить проблему утечки тепла, поглощенного абсорбером, в подложку, что было проблемой в ранее создававшихся конструкциях. Разработана технология изготовления таких болометров с использованием различных материалов в качестве абсорбера. Исследована и решена проблема подавления сверхпроводимости в области СИН перехода.

2) Исследованы болометры, интегрированные в двойную щелевую и в логопериодическую антенны терагерцового диапазона частот, основные характеристики которых были рассчитаны с помощью трехмерного компьютерного моделирования.

3) Проведены измерения изготовленных болометров в криостате растворения при температурах до 85 мК. Была исследована температурная зависимость дифференциального сопротивления и продемонстрировано наличие эффекта андреевского отражения при температурах ниже 150 мК. Измерен электрический отклик на нагрев постоянным током абсорбера в специальной структуре и оптический отклик. Электрический отклик составил более  $10^9$  В/Вт,

4) Измерен оптический отклик, на частоте 345 ГГц при температуре 100 мК, составил более  $2 \cdot 10^8$  В/Вт с учетом рассогласования импедансов антенны и болометра. Точковый отклик при той же мощности излучения составил  $1.1 \cdot 10^4$  А/Вт, квантовая эффективность достигает 15 электронов на квант. Оптическая МЭШ в лабораторном измерении оценена на уровне  $10^{-16}$  Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ . Значение ограничено системой считывания, и сравнительно легко за счет использования менее шумящей считывающей электроники и в условиях меньшей фоновой нагрузки может достичь уровней, представленных в следующем абзаце.

Значимость диссертации для практических применений заключается в развитии приемных систем для радиоастрономических исследований. Это направление активно развивается в последнее время и требования, предъявляемые к приемным системам всё ужесточаются (например, для строящейся космической миссии МИЛЛИМЕТРОН заявлена

чувствительность на уровне не хуже  $10^{-19}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>). Для наземных и баллонных обсерваторий в условиях высокой фоновой нагрузки также важна высокая чувствительность приемных систем. В связи с этим, разработки в области улучшения характеристик приемного элемента являются необходимыми.

Диссертация была представлена автором на расширенном научном семинаре Отдела Радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики РАН 27 марта 2020. В семинаре приняли участие также сотрудники других подразделений ИПФ РАН (включая филиал - ИФМ РАН) и других организаций, всего участников 18, в т.ч. 8 докторов наук. По заключению, поддержанному участниками семинара, диссертация Р.А. Юсупова представляет законченный результат добротной и актуальной работы, имеющей большое значение для развития болометрических некогерентных приемников. Выносимые на защиту положения доказаны экспериментальными результатами и их сопоставлениям с существующими теоретическими моделями.

Основные результаты опубликованы в 18 журнальных публикациях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и образования РФ, в том числе 9 публикаций в журналах индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, прошли апробацию на более чем полутора десятках российских и международных конференций.

Однако, по диссертационной работе есть ряд **замечаний**:

1. Слишком подробно представлена история развития болометров на основе СИН- структур (начиная от Андреевского приемника). Более полезной была бы сравнительная таблица основных характеристик современных болометров, TES, KID, NEB и SINIS.
2. В диссертации недостаточно подробно представлено математическое моделирование создаваемых болометрических структур, в то же время очевидно, что автор проектировал свои болометры не методом простого перебора вариантов, а осознанного и теоретически обоснованного на моделях выбора. Также не представлена аргументация выбора антенн (логопериодической и двойной щелевой антенны), которая также могла бы быть подкреплена результатами численного моделирования и сопоставления различных вариантов.
3. Приведены оценки мощности эквивалентной шуму (МЭШ), но не представлены графики экспериментальных измерений шумовых характеристик.
4. Для современных исследований на обсерваториях необходимо создание матриц с большим числом элементов. Не представляется доказанной достаточность воспроизводимости и надежности

предлагаемой автором технологии для изготовления одновременно на одном чипе десятков и сотен таких структур.

5. Нельзя не отметить высокое качество редакторской работы автора над текстом, практическое отсутствие опечаток и отступлений от оформительских стандартов, но автор не смог избежать не вполне корректной терминологии и слэнга. Как по тексту, так в большей мере в иллюстрациях, присутствует смесь русско- и англо-язычной терминологии.

Отмеченные недостатки, тем не менее, нисколько не снижают общего положительного впечатления от диссертации. Текст автореферата полностью и адекватно отражает содержание диссертации. Диссертация работа Р.А. Юсупова полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, советуем выбранной специальности 01.04.03 – «Радиофизика», а её автор – Юсупов Ренат Альбертович, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник ФИЦ ИПФ  
РАН, доктор физ-мат наук, доцент по специальности.

Рабочий почтовый адрес: 603950, г. Нижний  
Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46.

Рабочий телефон: 8(831) 416-46-49.

e-mail: [vdovin@ipfran.ru](mailto:vdovin@ipfran.ru)



Вдовин  
Вячеслав  
Федорович