

125009, г. Москва,
ул. Моховая, д. 11, корп. 7,
ФГБУН Институт Радиотехники и
Электроники им. В. А. Котельникова
Российской Академии Наук,
Диссертационный совет ДОО2.231.02

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Юсупова Рената Альбертовича «Болометр на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник с подвешенным абсорбером», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 (Радиофизика).

Диссертационная работа содержит введение, 4 основных главы, которые разбиты на подглавы и подразделы, заключение, список условных обозначений, библиографию и одно приложение. Диссертация содержит 113 страниц, 58 рисунков и 2 таблицы.

Во **Введении** рассмотрена актуальность темы диссертации, определена цель и сформулированы конкретные задачи. Сформулирована научная и практическая ценность работы и положения, выносимые на защиту. Расписан личный вклад автора и апробация работы.

Первая глава является вводной и обзорной. В ней представлен обзор основных работ по тематике диссертации. Определена область применения высокочувствительных криогенных приемников. Описаны основные существующие высокочувствительные приемники субмиллиметрового диапазона, начиная с детекторов, работающих при комнатных температурах, заканчивая криогенными болометрами (TES, KID, NEB). Описан андреевский приемник и эволюция концепции болометра на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС). Кратко описан принцип работы СИНИС болометра.

Вторая глава посвящена обсуждению новой конструкции СИНИС болометра, в которой мостик из нормального металла подвешивается между двумя сверхпроводниковыми электродами. Сперва описывается мотивация создания такой конструкции и вводятся два режима работы СИНИС

болометра. В предлагаемой конструкции уменьшаются утечки тепла в подложку, а за счет выбора материалов уменьшаются потери тепла и в СИН переходы. Достаточно подробно описывается конструкция, схема изготовления (приводится полная технологическая карта в приложении) и полученные структуры. Приводятся результаты 3D моделирования двойной щелевой и логопериодической антенн, с которыми интегрируются исследуемые СИНИС болометры.

В третьей главе приводятся результаты измерений на постоянном токе. Описана экспериментальная схема считывания сигнала, приводится краткое описание используемых криостатов. Представлены вольт-амперные характеристики болометров при температурах до 100 мК. Показано достаточно высокое отношение дифференциального и нормального сопротивления при таких температурах. Рассмотрена особенность на кривой дифференциального сопротивления при нуле напряжений и приведены результаты измерений с магнитным полем. Описана проблема подавления щели в сверхпроводнике и обоснована вторая конструкция с двумя травлениями, описанная в разделе 2.2. Проведены измерения отклика на нагрев постоянным током в специально разработанной структуре.

Четвертая глава содержит основные результаты работы. Дальнейшие эксперименты связаны с детектированием электромагнитного излучения, источником которого служило чёрное тело. Приводится схема оптических измерений, описаны фильтры, а также используемое чёрное тело. Измерены отклики на излучение чёрного тела с температурой от 3 до 11 К. Рассмотрен вопрос расчёта мощности излучения, падающего на болометр. На основе измеренных откликов рассчитаны вольт-ваттные, ампер-ваттные характеристики, эквивалентная мощность шума, эквивалентные шуму разницы температур. Представлены результаты измерения времени отклика изготовленных болометрических структур.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Актуальность темы выполненной работы

Главным стимулом бурного развития сверхпроводниковой электроники в последние годы является возможность создания приборов с рекордными характеристиками. Это объясняется с одной стороны чрезвычайно высокой нелинейностью таких элементов, а с другой – их предельно низкими собственными шумами, обусловленными физикой работы данных элементов и криогенной рабочей температурой. Одним из наиболее успешно развиваемых направлений является разработка сверхчувствительных приемных устройств терагерцевого диапазона. В последние годы отмечается значительный рост интереса к этому частотному диапазону, который находит

всё более широкое применение, как для решения научных задач, так и в практических разработках. Среди областей использования терагерцевого излучения можно отметить радиоастрономию, лабораторную спектроскопию, медицину, создание систем безопасности и др. Для всех перечисленных приложений необходимы высокочувствительные детекторы терагерцевого излучения, причём в отдельных случаях высокая чувствительность должна сочетаться со сравнительно высоким быстродействием устройств. В работе предлагается новая конструкция болометра на основе структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник. По совокупности измеренных характеристик предлагаемые устройства могут составить конкуренцию таким криогенным болометрам, как детекторы на кинетической индуктивности и болометры на краю сверхпроводящего перехода.

Оценка научной новизны исследования и практическая значимость полученных результатов

Разработана оригинальная технология создания устройств со свободно висящими микромостиками. С использованием данной технологии созданы болометры на СИНИС структурах с вольт-ваттной чувствительностью до 10^8 В/Вт. Объект исследования является новым. В изготовленных структурах исследованы процессы поглощения электромагнитного излучения, эффекта близости в СИН переходах, андреевского отражения. Впервые измерено время отклика изготовленного болометра. Проведено моделирование интегрированных с такими болометрами планарных антенн. Болометры такой конструкции могут быть использованы в матрицах планарных антенн и в решетках с высокочастотным считыванием. Созданные приемники могут быть использованы также в ряде других радиоастрономических проектов космического и наземного базирования.

Достоверность результатов исследования не вызывает сомнений. Использовались достоверные методы исследований, приведены все необходимые результаты. Также результаты исследований докладывались и обсуждались на ведущих научных конференциях, в том числе международных. Все результаты опубликованы в реферируемых журналах, в том числе в зарубежных с высоким индексом цитирования (Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics).

Основные результаты и положительные стороны исследования

- 1) Впервые реализована конструкция СИНИС болометра с подвешенным микромостиком (абсорбером).
- 2) Впервые в качестве металла абсорбера СИНИС болометра использован гафний.

3) Проведено исследование основных характеристик и процессов, происходящих в таких структурах.

4) Впервые реализован болометр на основе СИНИС структуры с квантовым выходом более 10 электронов на квант (350 ГГц).

5) Впервые проведено измерение постоянной времени СИНИС болометра, которое составило порядка 2 мкс при 100 мК.

Недостатки и замечания

1) Мотивация выбора материала абсорбера могла быть представлена в диссертации более ясно. В чём преимущество использования гафния по сравнению с алюминием?

2) Итоговые параметры, характеризующие чувствительность, рассчитаны для болометра отдельно, а не указаны для системы в целом (включая антенну и линзу), как это принято делать при характеристике приёмных систем. Это создаёт сложности при сравнении данной системы с другими существующими болометрическими системами.

3) Автор уделил достаточное внимание измерению постоянной времени исследуемого болометра, но при этом характеризует этот параметр на основе данных, полученных в эксперименте, связанном с измерением времени нарастания сигнала на импульс. Данный подход не всегда оказывается корректным. Для исключения этой неопределённости было бы полезно охарактеризовать также спад сигнала на импульс с болометра, а также его стационарное состояние. Получается ли в этих случаях то же значение постоянной времени?

4) На странице 91 указано, что «квантовая эффективность достигла 15 электронов на квант». Данную величину корректнее было бы называть «квантовым выходом».

5) Дискуссия по поводу поиска причин ухудшения экспериментального отклика болометра по сравнению с теоретическими предсказаниями могла быть выстроена автором более чётко. В чём по мнению автора состоят основные причины этого расхождения? Может ли этот факт быть связан с неоднородностью разогрева абсорбера?

Указанные недостатки не меняют общей положительной оценки диссертационной работы Р.А. Юсупова. Диссертация является самостоятельным законченным исследованием, выполненным на современном уровне и имеющим большое научное и практическое значение.

Оформление диссертации соответствует предъявляемым требованиям. Автореферат и публикации по теме диссертации с достаточной полнотой отражают её содержание. Основные результаты проведённых исследований представлены в 42 работах, в том числе в 18 статьях в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, из них 9 – в журналах, индексируемых в Web of Science или Scopus, в 21 докладе на международных и российских конференциях с публикацией расширенных тезисов, а также в 3 патентах.

Диссертационная работа Юсупова Р.А. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, предусмотренным пп.9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика».

Официальный оппонент, Селиверстов

Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, (спец. 01.04.03 «Радиофизика»),

старший преподаватель кафедры общей и экспериментальной физики МПГУ

+7(964)562-94-19

sv.seliverstov@mpgu.edu

Селиверстов Сергей Валерьевич
(ФИО)

«11» мая 2020 г.

ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет» (Институт физики, технологии и информационных систем)

119435, город Москва, улица Малая Пироговская, дом 29/7, строение 4

