

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 ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 (Радиофизика).

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

Во **Введении** излагаются актуальность выполненной работы, её цели и конкретные задачи, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и апробация работы.

Первая глава содержит обзор литературы по тематике диссертации. Дается подробное описание применения криогенных приемников терагерцового и суб-терагерцового диапазонов частот в радиоастрономии. Представлен сравнительный обзор основных возможных высокочувствительных болометрических приемных элементов, работающих при различных температурах, от комнатной температуры до температуры жидкого гелия и ниже. Дается описание физических принципов работы болометра на основе микронной интегральной структуры сверхпроводник – изолятор – нормальный металл – изолятор – сверхпроводник (СИНИС). Приводится обзор публикаций, в которых развивается концепция СИНИС болометров от первых конструкций, в которых использовались «андреевские» контакты для подключения абсорбера к антенне, до конструкций с использованием СИН переходов и дальнейших модификаций таких устройств.

Вторая глава начинается с рассмотрения внутренних процессов в СИНИС датчике и возможных режимов работы такого болометра, даются ссылки на теоретические работы, которые позволяют сформулировать набор мер для дальнейшего развития и совершенствования болометров на основе СИНИС структур. Затем в этой главе излагается предлагаемая новая конструкция болометра для достижения существенного улучшения его чувствительности - СИНИС болометра с подвешенным абсорбером. Устранение прямого контакта абсорбера с подложкой для предотвращения утечки тепла в подложку – основная физическая идея предлагаемого нового болометра. Для реализации такого болометра предлагается подвешивать мостик из нормального металла между двумя лежащими ниже сверхпроводниковыми электродами. Излагается разработанная технология изготовления, включая используемые материалы и основные шаги изготовления с одним и двумя процедурами травления. Приведены примеры получаемых в электронном микроскопе изображений изготовленных СИНИС структур с подвешенным нормальным абсорбером. Излагаются результаты 3-х-мерного численного моделирования двойной щелевой и логопериодической антенн, с которыми интегрируются СИНИС болометры.

В первой части **третьей главы** дается описание использованного криогенного оборудования, а также описание методик и схемы экспериментальных исследований изготовленных устройств. Во второй части приведены результаты низкотемпературных исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных СИНИС структур в широком диапазоне температур, нижняя граница которого достигала 100 мК, в том числе, в присутствии приложенного магнитного поля. Полученные результаты позволили внести актуальные изменения в топологию болометров для устранения негативного влияния близости нормальных «проводов» (соединения с антенной) к области туннельного контакта сверхпроводящих пленочных элементов с нормальным абсорбером.

В **четвертой главе** излагаются результаты исследования основных болометрических характеристик изготовленных устройств, включая вольт-ваттные и ампер-ваттные характеристики, эквивалентные шуму мощность и температурную разность, а также характерное время отклика. Эти исследования основаны на измерения отклика болометра на нагрев абсорбера постоянным током и откликов на излучение черного тела при температуре от 3 К до 11 К в полосе 70 ГГц с центральной частотой 345 ГГц. Дается подробное описание методики исследований и схемы измерений откликов болометров на излучение суб-терагерцового диапазона частот, включая описание источников излучения, использованных в качестве источников излучения черного тела, а также описание использованных полосовых фильтров. В **Заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Автор диссертации Юсупов Ренат Альбертович выполнил большой объем исследовательской работы, включающий в себя разработку пленочной технологии создания СИНИС болометров с подвешенным абсорбером, изготовление таких СИНИС болометров с использованием различных металлов в качестве абсорбера (медь, гафний), интегрированных как с двойной щелевой, так и с логопериодической антеннами, экспериментальное изучение изготовленных болометров в при различных температурах, вплоть до 100 мК и анализ полученных результатов. Экспериментальные исследования в этой работе дополняются выполнением численного трехмерного моделирования характеристик используемых антенн.

В результате выполненных исследований были разработаны и созданы высокоэффективные СИНИС болометры, при экспериментальном изучении которых в условиях регистрации суб-терагерцовому излучения (в полосе 70 ГГц с центральной частотой 345 ГГц) продемонстрирована их высокая чувствительность, характеризуемая крутизной отклика напряжения $dV/dW = 2 \cdot 10^8$ В/Вт. При этом следует отметить, что указанная в работе величина эквивалентной шуму мощности $\delta W / \sqrt{\Gamma\text{ц}} = 10^{-16}$ Вт/Гц^{1/2}, которая близка к значениям для лучших известных болометров, является не предельной характеристикой данного болометра, а лишь технической характеристикой исследованной приемной системы. Полученная рекордно высокая крутизна отклика тока болометра $dI/dW = 10^4$ А/Вт соответствует квантовой эффективности болометра, составляющей 15 электронов на квант регистрируемого излучения с частотой $f = 3,5 \cdot 10^{11}$ Гц, что более чем на порядок превышает квантовую эффективность болометров, достигнутую ранее при использовании конструкции болометров с абсорбером, лежащим непосредственно на подложке. Короткое время отклика болометра, составляющее согласно выполненным измерениям $\tau \approx 1,8$ мкс, делает такие высокочувствительные болометры весьма перспективными для использования в матрицах планарных антенн и в решетках с высокочастотным считыванием. Это определяет высокую прикладную значимость данной диссертационной работы.

В качестве недостатков данной работы следует отметить наличие опечаток в изложении диссертационной работы, присутствие жаргонных выражений и терминов, таких как «термализация», «мгновенная мощность», «оптический отклик», «СЭМ изображение», «сопротивление на половине щели», неудачных выражений, затрудняющих понимание смысла текста, а также слишком краткие, без должного объяснения, подписи ко многим рисункам, что делает неудобным восприятие графической и иной информации, представленной на этих рисунках. Также было бы целесообразным иметь единую формулировку концептуальных отличий разработанного болометра от предшествующих болометров подобного типа.

Все отмеченные недостатки относятся в основном к оформлению и изложению диссертации и не влияют на высокую положительную оценку диссертационной работ, выполненной на высоком научном уровне. Полученные результаты имеют большое прикладное значение для создания высокочувствительных приемников терагерцового и суб-терагерцового диапазонов частот.

Содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности. Основные результаты проведенных исследований представлены в 42 работах, в том числе в 18 статьях в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, из них 9 в журналах индексируемых в Web of Science или Scopus, в 21 докладах на международных и российских конференциях с публикацией расширенных тезисов, получено 3 патента. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Юсупова Р. А. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, предусмотренными пунктами 9 и 10 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Юсупов Ренат Альбертович заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика».

Официальный оппонент:

Корнев Виктор Константинович,
профессор, доктор физико-математических наук
(спец. 01.04.04 «Физическая электроника»),
kornev@phys.msu.ru +7 (910) 464-28-61

119992 Москва, Ленинские Горы, 1,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
физический факультет, кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники,
профессор


(Корнев В. К.)


«03» июля 2020 г.

Подпись Корнева В. К. удостоверяю.

Декан физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

профессор




Н. Н. Сысоев