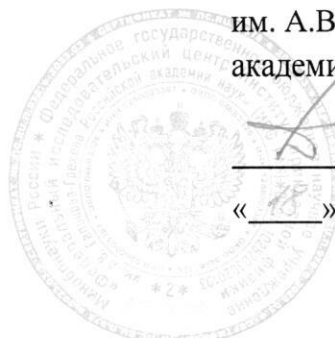


УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской
академии наук», д.ф.-м.н., академик РАН



Г.Г. Денисов

« 18 » октября

2023 г.

ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Меренкова Алексея Владимировича
**«Сверхпроводящий RF TES детектор на основе пленки гафния
при температурах 50-500 мК»**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Общие положения

Работа выполнена в лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы» и лаборатории криоэлектронных систем научно-образовательного центра квантовой инженерии НИТУ МИСИС.

Структурно диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 100 наименований. Работа включает 43 рисунка и 3 таблицы. Общий объем работы составляет 103 страницы.

Актуальность избранной темы диссертации

Направление представленных в диссертации исследований определяется потребностью в создании высокочувствительных матричных детекторов терагерцового диапазона частот для фундаментальных исследований космоса.

На сегодняшний день наиболее чувствительные сверхпроводящие детекторы, такие как детектор на краю сверхпроводящего перехода и его вариации, вытесняются из экспериментальных проектов детекторами на кинетической индуктивности, обладающих более простой и практичной системой считывания. Это позволяет строить на их основе матричные приемники, включающие в свой состав сотни или даже тысячи единичных

детекторов. Предложенный в диссертации сверхпроводящий RFTES детектор на основе пленки гафния потенциально может объединить в себе простую в реализации систему считывания и потенциально рекордную чувствительность. В связи с этим, актуальность выбранной автором темы диссертации не вызывает сомнений.

Краткое содержание работы

Первая глава содержит литературный обзор, посвященный детекторам на основе сверхпроводящих материалов и их основным характеристикам. Разобраны некоторые актуальные для диссертации аспекты сверхпроводимости: процессы релаксации в тонких пленках, модель электронного газа и теория аномального скин-эффекта в сверхпроводниках. Освещены основные типы сверхпроводящих детекторов и особенности их функционирования.

Вторая глава посвящена описанию общих принципов работы RFTES детектора и подходов к выбору чувствительного элемента детектора. В качестве чувствительного элемента рассмотрены основные материалы со сверхпроводящими свойствами ниже 1 К и выбран оптимальный вариант; проведено экспериментальное исследование пленок гафния с подтверждением его критической температуры согласно литературным данным. Проведены расчеты сверхпроводящего перехода на нескольких гигагерцовых частотах, на основании которых обоснован выбор проектируемой частоты резонансной цепи (1,5 ГГц). В главе также приведен краткий технологический процесс изготовления измеренных образцов.

Третья глава посвящена электромагнитному моделированию детектора: приведены основные этапы проектирования топологии болометрической системы. Описаны процессы проектирования двухщелевой антенны с центральной частотой 650 ГГц и подбора уровня слабой связи четвертьволнового резонатора с внешней цепью. Также рассмотрены вопросы согласования антенны с чувствительным элементом, проектирования частотно-заграждающих фильтров и их влияния на антенную систему. Подобраны соответствующая рабочей частоте длина резонатора и оптимальная точка включения микромостика в высокочастотный резонатор.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментальных установок для измерения детекторов. Приведена экспериментальная схема на базе рефрижератора растворения замкнутого цикла Oxford Instruments Triton DR-200 с базовой рабочей температурой 30 мК, используемая в различных вариациях во всех экспериментальных исследованиях, описанных в диссертационной работе. Отдельно описан оптический тракт с охлаждаемым источником термодинамического шума и держателем образца с

иммерсионной линзой для исследования чувствительности детектора. Также приведено описание экспериментальной установки для исследования быстродействия детектора, включающей в себя описанный выше криостат растворения, синхронный усилитель, анализатор спектра и различные микроволновые компоненты.

Пятая глава посвящена анализу полученных результатов. Приведены результаты измерений высокодобротного резонатора с микромостиком из гафния в широком интервале температур и мощностей считываемого сигнала; проведены оценки теплопроводности микромостика с использованием метода постоянной добротности. Описаны результаты эксперимента по измерению оптической чувствительности детектора: получена мощность, эквивалентная шуму, равная $3 \cdot 10^{-17}$ Вт/√Гц. Качественно объяснено искажение резонансных кривых при высоких уровнях считываемого сигнала. Обсуждены результаты эксперимента по исследованию быстродействия детектора с использованием дополнительного модулированного сигнала с несущей, соответствующей второй гармонике резонатора.

В заключении подведены итоги работы и приведены ее основные результаты.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов

- Предложен способ измерения теплопроводности мостика с нелинейным температурно-зависимым импедансом.
- Проведен теоретический анализ условий устойчивости сверхпроводящего перехода пленки $R(T)$ под действием СВЧ тока.
- Предложен и обоснован метод анализа вносимых потерь в высокодобротный резонатор методом парциальных нагрузок; метод позволяет получать заданную добротность при произвольных сопротивлениях мостика.
- Предложен метод измерения быстродействия болометрического детектора с резонатором путем воздействия на него модулированного сигнала на частоте вне полосы считывания, например, вблизи второй гармоники резонатора.

Степень обоснованности и достоверности положений и результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием теоретически обоснованных методов исследования, сравнением экспериментальных данных с результатами, полученными другими авторами, применением современного измерительного оборудования.

Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Диссертационная работа обладает как научной, так и практической ценностью.

Теоретическая значимость работы заключается в обоснование возможности наблюдения сверхпроводящего перехода пленки сверхпроводника под действием высокочастотного тока, разработке электродинамической модели RF TES детектора с резонансной частотой 1.5 ГГц, проведении численного расчета сверхпроводящих переходов пленок гафния на СВЧ на основе теории Маттиса-Бардина.

Практическая значимость

– Использование метода постоянной добротности резонатора позволяет определить теплопроводность термочувствительного элемента без использования интегрированного термометра, что актуально для широкого круга теплофизических задач за пределами данного исследования.

– Использование разных режимов электротермической обратной связи позволяет оптимизировать динамический диапазон детектора, меняя мощность насыщения.

– Демонстрация RF TES детектора с полосой входного сигнала 550-750 ГГц, чувствительностью $3 \cdot 10^{-17}$ Вт/√Гц в и быстродействием ~ 3 мкс при температуре 400 мК открывает перспективы пользования такого детектора в комбинации с криостатом сорбционного типа в невесомости на борту космических аппаратов, что означает новые возможности для фундаментальных радиоастрономических исследований.

Основные научные результаты работы:

1. Выбор материала для сенсора RF TES детектора основан на реализации в нем теплообмена, связанного с моделью электронного газа; исследование показало перспективность использования пленки гафния в диапазоне температур 200-400 мК.
2. Разработка электродинамической модели и топологии детекторов с микроволновым считыванием на предварительном этапе упрощается с использованием метода парциальных включений.
3. Поддержание устойчивого режима термометра в области его сверхпроводящего перехода в случае RF TES детектора связано с крутизной характеристики dR/dT , с мощностью накачки и с импедансом точки включения мостика в резонатор; существуют условия стабильности при положительной электротермической связи.
4. Определение теплопроводности микромостика при сверхнизких температурах методом постоянной добротности эквивалентен поддержанию постоянной

температуры электронной подсистемы, которая равна температуре криостат в режиме предельно малой накачки.

5. Определение оптической чувствительности RFTES детектора при температуре 400 мК проводилось с помощью термодинамического источника на основе резистивной пленки в диапазоне температур 2-10 К; чувствительность детектора составила $3 \cdot 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что с точностью до ошибки измерений соответствует предсказанию модели электронного газа.
6. Определение быстродействия RFTES детектора характеризует детектор как систему близкую к оптимальной; измеренное быстродействие составило ~ 3 мкс, лежит вблизи времени релаксации резонатора.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в рамках диссертационной работы результаты представляют большой интерес для исследователей, занимающихся созданием и совершенствованием высокочувствительных приемных систем для космических, баллонных и наземных радиообсерваторий.

Данные результаты могут быть использованы в таких научно-исследовательских институтах, как ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, АЦК ФИАН, МПГУ, ИПФ РАН и др. при разработке как отдельных сверхпроводниковых детекторов, так и комплексированных приемных систем.

Замечания по диссертационной работе

1. Увы, но замечания начинаются с первой страницы, с названия. Использование в названии диссертации англоязычной аббревиатуры весьма узко используемого термина, к тому же имеющего несколько десятков лет русское обозначение, представляется не оправданным. И автор использовал его в названии раздела 1.6.1., иначе создавалось впечатление, что он просто не знаком с ним.
2. Начало диссертации перегружено теорией: создается впечатление, что автор включил "теоретические разделы" для увеличения объема диссертации. Наоборот, вторую половину диссертации, посвященную собственным разработкам и исследованиям автора, имело бы смысл увеличить за счет более детального представления экспериментальных материалов. В частности, крайне слабо представлено и на семинаре в ведущей организации не получили

разъяснения подходы автора к оценке достоверности представленных результатов и величин погрешностей выполненных экспериментов.

3. Цель диссертации в тексте сформулирована крайне неудачно. Замысловатая и непонятная формулировка, будучи изложенной иначе, как это было сделано на семинаре ведущей организации, понятным и логично структурированным языком, становится много ясней.
4. Некоторая «сырость» заметна в представлении результатов. Например: в п. 5.3 на основе рис. 42 автор оценивает время реакции болометра без каких-либо сопутствующих пояснений насколько рис. 42 описывают реальную зависимость отклика устройства. Может иметь место ситуация, когда видимое в эксперименте уменьшение отклика вызвано емкостными связями в измерительной схеме.
5. Работа связана с серьезной и новой разработкой Центра квантовой инженерии МИСИС, подкреплена серией солидных публикаций и апробирована на авторитетных конференциях, однако в списке достижений нет ни одного патента. Вместе с тем автор утверждает в четырех положениях выдвигаемых на защиту «впервые...». Очевидно, что приоритет инженерных работ в первую очередь следует защищать патентами и они у автора существуют, но в диссертации не представлены.
6. Дефекты изложения, подобные п.2., обилие ошибок, небрежностей в оформлении, нарушение стандартов оформления являются довольно частыми по тексту диссертации, и портят впечатление от сильной экспериментальной работы. При желании можно написать целую страницу подобных замечаний, но их несложно увидеть при желании, например, на стр.15, 21, 23, 30, 58/59 и т.д.

Отмеченные недостатки не снижают теоретическую и практическую значимость диссертации и не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация Меренкова Алексея Владимировича «Сверхпроводящий RFTES детектор на основе пленки гафния при температурах 50-500 мК» представляет собой законченную научно-квалификационную работу по актуальной проблеме. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для дальнейших перспектив исследования сверхпроводниковых детекторов на краю перехода с

радиочастотным считыванием. Сделанные выводы состоятельны и полученные результаты обоснованы.

В диссертации имеются все необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе на научные работы соискателя.

По теме диссертации автором опубликованы в 5-ти рецензируемых научных изданиях, цитируемых в базах Scopus и Web of Science. Материалы трех докладов опубликованы в сборниках трудов научных конференций различных уровней.

Автореферат достаточно подробно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Меренкова А.В. удовлетворяет критериям п.2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС» п 710.05-22, утвержденному решением Ученого совета НИТУ «МИСиС» 17.03.2022 г. (протокол № 2-22).

Диссертационная работа полностью соответствует выбранной специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», а её автор – Меренков Алексей Владимирович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Диссертация была представлена автором на расширенном научном семинаре (протокол №2) Отдела Радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук 14 сентября 2023 г. В семинаре приняли участие также сотрудники других подразделений ИПФ РАН и других организаций, всего 21, в т.ч. 7 докторов наук и 6 кандидатов наук.

Отзыв составил:

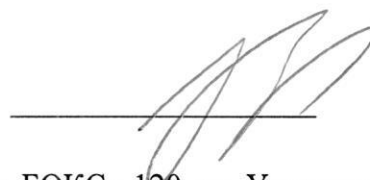
Вдовин Вячеслав Фёдорович

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ИПФ РАН.

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

Рабочий телефон: 8(831) 416-46-49.

e-mail: vdovin@ipfran.ru



Сведения о ведущей организации

Полное фирменное наименование: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Сокращенное фирменное наименование: ИПФ РАН

Место нахождения: г. Нижний Новгород, БОКС - 120, ул. Ульянова. 46.

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

Адрес сайта: <http://www.iapras.ru/>

Телефон: 8(831) 416-46-49