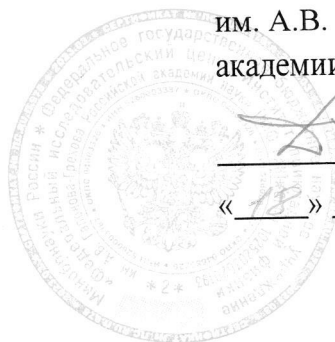


УТВЕРЖДАЮ

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 » сентября 2023 г.



ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ким Татьяны Михайловны
**«Источники шума для калибровки усилителей и детекторов
при сверхнизких температурах»**

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, списка литературы из 65 наименований. Работа включает 84 рисунков и 4 таблицы. Общий объем работы составляет 116 страниц.

Актуальность избранной темы диссертации

Направление представленных в диссертации исследований определяется потребностью экспериментаторов в создании систем для калибровки чувствительных охлаждаемых сенсоров и необходимостью совершенствования традиционных подходов в исследовании шумов устройств, используемых для приема и обработки сверхмалых сигналов при сверхнизких температурах, включая цепи для квантовых вычислений.

В качестве совершенствования методов калибровки собственных шумов предлагается использовать новые подходы к созданию микроминиатюрных источников калиброванного шума: создать калибратор шумовой температуры охлаждаемого сенсора,

основанный на сочетании фундаментальных свойств термодинамического и дробового шума, используя сверхпроводниковые источники микронных размеров. Это позволит снизить уровень тепловыделения термодинамических источников, использовать известные критические температуры сверхпроводящего перехода, снизить порог эквивалентной температуры дробового шума, а также увеличить скорость модуляции сигнала. В связи с этим, актуальность выбранной автором темы диссертации не вызывает сомнений.

Краткое содержание работы

Первая глава содержит литературный обзор, посвященный источникам шума, особенностям источников термодинамического и дробового шумов на основе сверхпроводящих пленок. Выделены основные характеристики, определяющие шумы источников, а именно физическая температура источников термодинамического шума и туннельный ток, протекающий через переход, в источниках дробового шума. Приведены примеры сверхпроводящих туннельных переходов типа сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник, используемых в качестве генераторов дробового шума для калибровки шумовой температуры высокочувствительных устройств при сверхнизких температурах.

Вторая глава посвящена описанию разработанных концептуальных моделей сверхпроводящих источников шума, описываются микросхемы источников термодинамического и дробового шума для калибровки шумов охлаждаемых усилителей, интегральная схема устройства для взаимной калибровки источников термодинамического и дробового шумов, приведены данные электродинамического моделирования и оптимизации топологий этих устройств.

Третья глава посвящена описанию этапов изготовления образцов: описаны основные технологические этапы изготовления планарных структур на диэлектрических подложках, в том числе печатной платы для источника дробового шума. Изготовление образцов проводится в условиях чистой зоны с использованием методов тонкопленочных технологий и включает несколько основных этапов: подготовка поверхности диэлектрических подложек, осаждение тонких пленок материалов на подложки и формирование необходимой структуры. В зависимости от задачи и осаждаемых материалов используется тот или иной способ литографии.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментальных систем для измерения изготовленных экспериментальных образцов сверхпроводящих источников шума. Приведено описание систем для измерения электрофизических параметров туннельных СИС переходов. Описана экспериментальная схема на базе рефрижератора растворения

Oxford Instruments Triton DR200 при температуре 30 мК для исследования усилительной системы на основе источника дробового шума туннельного СИС перехода Al/AlOx/Al и криогенных малошумящих усилителей. Приведено описание экспериментальной установки для исследования образца источника термодинамического излучения на основе микромостика из ниобия в копланарном резонаторе с терагерцовой двущелевой антенной из ниобия при температуре 1,3–6,5 К на базе сухого криостата Oxford Instruments Triton 1,5 К.

Пятая глава посвящена описанию деталей экспериментов, обработки и анализа полученных результатов. Описаны результаты эксперимента по исследованию источника дробового шума на основе туннельного СИС перехода Al/AlOx/Al на входе усилительной системы. Приведены результаты эксперимента по исследованию термодинамического источника на основе ниобиевого излучателя. Определена резонансная частота резонатора в тестовом образце микромостика из тонкой пленки ниобия (толщина 15 нм) с температурой критического перехода 6,76 К вблизи данной температуры при 6,5 К и подаваемой мощности –30 дБм. Приведено описание результатов эксперимента по исследованию отклика болометрического детектора из гафния на излучение термодинамического источника в виде пленки поглотителя на диэлектрической подложке.

В заключении подведены итоги работы и приведены ее основные результаты.

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов

– Разработан и апробирован метод изготовления RF TES болометра, включающего в себя высокодобротный резонатор из ниобия, микромостик из гафния и терагерцовую антенну с применением оптической литографии с разрывом вакуумного цикла.

– Предложен и теоретически обоснован метод расчета коэффициента черноты термодинамического излучателя на основе резистивной пленки на диэлектрической подложке с использованием электродинамической модели прямоугольного волновода.

– Предложен метод генерации термодинамического излучения терагерцового диапазона частот с помощью пленочного микрорезистора, интегрированного с планарной антенной.

– Предложен метод нагрева термодинамического источника на основе резистивной пленки поглотителя на диэлектрической подложке за счет прямого пропускания тока; впервые предложено использовать метод токового гистерезиса пленки сверхпроводника для управления температурой микрорезистора.

– Предложен метод шумовой термометрии микрорезистора, основанный на сравнении с дробовым шумом туннельного сверхпроводящего перехода.

– Разработан метод генерации термодинамического шума в терагерцовом диапазоне частот с использованием сверхпроводящего микромостика, разогреваемого током высокочастотного резонатора.

– Разработан, изготовлен и экспериментально продемонстрирован при температуре 30 мК источник дробового шума, оптимизированный для стандарта 50 Ом, на основе туннельного сверхпроводящего перехода Al/AlO_x/Al с эквивалентной температурой шума менее 2 К.

Степень обоснованности и достоверности положений и результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием теоретически обоснованных методов исследования, сравнением результатов с результатами, полученными другими авторами, применением современного измерительного оборудования и значительным объемом экспериментальных данных, обеспечивающим статистическую состоятельность полученных результатов.

Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Диссертационная работа обладает как научной, так и практической ценностью.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании подходов к созданию терагерцовых излучателей из ниобия с излучающей антенной для исследования RF TES болометра диапазона частот 550–750 ГГц с калибровкой температуры излучения по тепловому гистерезису тонкопленочного микромостика, источников дробового шума на основе туннельной структуры Al/AlO_x/Al для калибровки в диапазоне частот 1–2 ГГц с подключением в стандарте 50 Ом, генераторов шума с внутренней калибровкой термодинамического терагерцового излучателя с помощью источника дробового шума.

Практическая значимость

– Реализация предложенной технологии RF TES болометра открывает путь к созданию нового поколения сверхчувствительных болометрических детекторов, в том числе изображающих матриц с частотным разделением пикселей.

– Электромагнитная модель чернотельного поглотителя в прямоугольном волноводе позволяет определить и оптимизировать параметры термодинамического излучателя в заданном диапазоне частот.

– Применение микроминиатюрных источников термодинамического шума позволяет снизить их тепловыделение и использовать такие источники при температурах ~ 30 мК.

– Применение прямого токового нагрева поглотителя упрощает конструкцию термодинамических излучателей пленочного типа.

– Использование метода шумовой термометрии с применением дробового шума сверхпроводящих туннельных переходов, слабо зависящего от физической температуры, позволяет создавать универсальные источники шума в широком диапазоне частот (1–1000 ГГц).

– Метод разогрева с помощью тока резонатора позволяет использовать наноразмерные пленки поглотителя без риска электрических шоков, что повышает надежность.

Основные научные результаты работы:

1. В области шумовой термометрии использование микроабсорбера снижает уровень тепловыделения и повышает скорость изменения температуры такого термодинамического источника.

2. Шумовой сигнал калибровочного качества, не зависящий от окружающей температуры, может быть получен при использовании сверхпроводящего туннельного перехода на основе трехслойной структуры Al/AlO_x/Al, обеспечивающего шумовой сигнал с эффективной температурой ниже 2 К благодаря небольшому значению щелевого напряжения сверхпроводящего алюминия.

3. Проблема калибровки физической температуры термодинамического источника шума без использования термометра может быть эффективно решена новым методом взаимной внутренней калибровки, где в качестве первичного калибратора использован сверхпроводящий туннельный переход, в котором при достаточно низкой температуре спектральная плотность мощности дробового шума не зависит от физической температуры.

4. Проведена оптимизация технологических этапов изготовления сверхпроводящих микросхем для используемых материалов. Подтверждена возможность изготовления туннельных СИС переходов на основе трехслойной структуры Al/AlO_x/Al методом прямого осаждения с разрывом вакуумного цикла.

5. Калибровка шумов на выходе усилительной системы с источником дробового шума туннельным СИС переходом с учетом свойств соединительных цепей позволяет выявить проблемные места при сверхнизких температурах, возникающие, например, из-за термических стрессов в процессе охлаждения и которые нельзя обнаружить при комнатной температуре.

6. Нагрев термодинамического источника – сверхпроводящего микромостика из ниобия – СВЧ током на частоте 1,3 ГГц и использование метода постоянной добротности позволяет определить теплопроводность и физическую (эффективную) температуру такого мостика.

7. Методы измерения собственных шумов терагерцовых детекторов предложено усовершенствовать с использованием в качестве термодинамического источника серого тела с коэффициентом черноты 50%, достигаемого двухсторонним покрытием сапфировой подложки толщиной 500 мкм пленкой с поверхностным сопротивлением 200 Ом/квадрат.

8. Проведенная апробация разработанных сверхпроводящих источников шума микроизлучателя и туннельного СИС перехода, позволяет применить их в дальнейшем как компоненты разработанной схемы устройства внутренней калибровки.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в рамках диссертационной работы результаты в первую очередь представляют интерес для исследовательских групп, занимающихся созданием криогенных источников шумового сигнала для калибровки высокочувствительных криогенных детекторов. Описанные теоретические методы будут востребованы среди исследователей, занимающихся верификацией экспериментальных оценок в рамках теоретических моделей.

Данные результаты могут быть использованы в таких научно-исследовательских институтах, как ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ), ИПФ РАН (ИФМ), ИФП СО РАН, АО «ОКБ «АСТРОН» и др. при разработке прецизионных криогенных детекторов (болومترических матриц) и создании методик контроля их параметров.

Замечания по диссертационной работе

1. В формулировке выносимого на защиту Положения 1 диссертации (стр. 10): «Кардинальное снижение тепловыделения и повышение быстродействия термодинамического излучателя оптического типа...» нуждается в уточнении сравнительная степень. «Кардинальное снижение» - это во сколько: в 100 или 10000 раз?

2. В работе ведется речь о калиброванных криогенных источниках шума в достаточно обширном диапазоне частот (1-1000 ГГц), но информация об известных аттестованных в указанном частотном диапазоне эталонах, как и об имеющихся при этом сопутствующих проблемах, по тексту диссертации отсутствует. Отсутствует и схема

передачи размера единицы величины от первичного эталона к разрабатываемому устройству.

3. Во 2 главе диссертации не достаёт обоснования условий использования и соответствующих ограничений, при (и для) которых получены запатентованные и выносимые на защиту устройства. Приведенные в работе рассуждения следовало бы дополнить большим числом математических преобразований, аналитических расчетов моделей и выводов. А также рассмотреть вопросы стабильности работы, влияния внешних факторов, условий хранения и эксплуатации разрабатываемых автором устройств.

4. В работе часто встречаются необщепринятые в русском языке и отечественной технической литературе термины и словосочетания. Например, вместо «краткая схема» (подпись к рис. 4.10, стр. 79) корректнее использовать «упрощенная схема». Также при оформлении рукописи желательно выдерживать единство терминологии, например, словосочетания на стр. 19, связанные с эффектом Джозефсона: «джозефсоновский переход» и «джозефсоновский контакт», являющиеся эквивалентными понятиями, заменить единым термином, а термин «джозефсоновский ток» все же писать везде с маленькой буквы согласно правилам русского языка.

5. Результаты экспериментов (глава 5) следовало бы в большей степени сравнить с результатами расчетов или с результатами численного моделирования. Совместное изображение экспериментальных и расчетных графиков позволило бы качественнее оценить полученные автором результаты.

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

Заключение

Диссертация Ким Татьяны Михайловны «Источники шума для калибровки усилителей и детекторов при сверхнизких температурах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу по актуальной проблеме. Новые научные результаты, полученные диссертантом, имеют существенное значение для разработки криогенных источников шума, предназначенных для калибровки высокочувствительных криогенных детекторов. 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 3 статьи: 1 в рецензируемом научном издании, цитируемом в базах Scopus и Web of Science, 2 в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 2 патента РФ на изобретения. Материалы 5-ти докладов опубликованы в сборниках трудов научных конференций различных уровней.

Автореферат достаточно подробно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Ким Т.М. 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 – Ким Татьяна Михайловна, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Диссертация была представлена автором на расширенном научном семинаре Отдела Радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук 14 сентября 2023 г (протокол №2). 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:

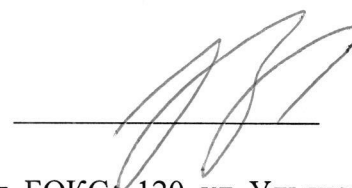
Вдовин Вячеслав Фёдорович

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