

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Ким Татьяны Михайловны «Источники шума для калибровки усилителей и детекторов при сверхнизких температурах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния» и состоявшейся в НИТУ МИСИС 6 октября 2023 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 27.06.2023, протокол №12.

Диссертация выполнена в лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы» и лаборатории криоэлектронных систем Научно-образовательного центра квантовой инженерии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, и.о. заведующего лабораторией криоэлектронных систем НИТУ МИСИС Шитов Сергей Витальевич.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 12 от 27.06.2023) в составе:

1. Мухин Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС – председатель комиссии;

2. Ильичев Евгений Вячеславович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории сверхпроводниковых квантовых технологий НИТУ МИСИС;

3. Гольцман Григорий Наумович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Института физики, технологий и информационных систем Московского педагогического государственного университета (МПГУ);

4. Арутюнов Константин Юрьевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук;

5. Григорьев Павел Дмитриевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора электронных и оптических свойств твердых тел Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук.

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Предложен метод шумовой термометрии микроразмерного пленочного поглотителя, интегрированного с планарной антенной, основанный на сравнении с дробовым шумом туннельного сверхпроводящего перехода.

- Предложен метод расчета коэффициента поглощения термодинамического излучателя на основе резистивной пленки на диэлектрической подложке с использованием модели прямоугольного волновода.
- Разработан 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.
- Предложен метод генерации термодинамического излучения терагерцового диапазона частот с помощью пленочного микрорезистора, интегрированного с планарной антенной, разогреваемого током высокочастотного резонатора.
- Предложен и разработан метод изготовления RFTES болометра, включающего в себя высокодобротный резонатор из ниобия, микромостик из гафния и терагерцовую антенну с применением оптической литографии с разрывом вакуумного цикла.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Предложенная электродинамическая модель чернотельного поглотителя в прямоугольном волноводе позволяет определить и, при необходимости, оптимизировать параметры термодинамического излучателя в заданном диапазоне частот.
- Предложенный метод разогрева термодинамического излучателя – сверхпроводящего микромостика позволяет определить теплопроводность и эффективную температуру такого микромостика.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- Успешная реализация предложенной технологии RFTES болометра открывает путь к созданию нового поколения сверхчувствительных болометрических детекторов, в том числе изображающих матриц с частотным разделением пикселей
- Применение микроминиатюрных источников термодинамического шума позволяет кардинально снизить их тепловыделение и открывает перспективы для интеграции таких источников непосредственно на чипе микросхемы при температуре ~30 мК.
- Метод разогрева с помощью тока резонатора позволяет использовать наноразмерные пленки поглотителя, что повышает их надежность; для таких структур возможна калибровка температуры без применения традиционных термометров, она основана на измерении теплопроводности пленки поглотителя.
- Использование метода шумовой термометрии с применением дробового шума сверхпроводящих туннельных переходов на основе трехслойной структуры $Al/AlO_x/Al$ оптимально для аттестации сверхнизкотемпературных цепей (усилителей) с уровнем собственного шума ~ 1 К (и ниже).
- Полученные патенты на изобретение источников калиброванного шума с использованием сверхпроводящих термодинамических микроизлучателей и комбинации таких микроизлучателей со сверхпроводящими источниками дробового шума подтверждают экономический потенциал проведенных исследований в области научного приборостроения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- Обработка и анализ полученных экспериментальных данных проводились с использованием современных методов моделирования и обработки, включая: среду электродинамического моделирования Cadence AWR Design Environment, визуальное программирование в пакете MathCAD, программирование в среде Python, программные пакеты Origin и IRTECON.
- Результаты компьютерного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Результаты и выводы, представленные в диссертации, получили положительную апробацию на международных и российских конференциях. Достоверность также подтверждается публикациями результатов в рецензируемых научных изданиях.

Личный вклад соискателя состоит в:

Автором спроектированы и рассчитаны электродинамические модели микросхемы источников дробового шума на основе СИС перехода в диапазоне частот 1–2 ГГц, а также микросхемы, объединяющей источники дробового и термодинамического шумов для диапазонов частот 1–2 ГГц и 550–750 ГГц соответственно, проведено электродинамическое моделирование и оптимизация термодинамического источника на основе тонкопленочного поглотителя на диэлектрической подложке с использованием пакета электромагнитного моделирования Cadence AWR Design Environment. Автором отработаны технологические этапы изготовления элементов структур, включая туннельные структуры $Al/AlO_x/Al$ (туннельные СИС переходы); а также проведено конструирование микросхем источников на основе созданных моделей, изготовлены экспериментальные образцы сверхпроводящих источников шума и детекторов. Автором проведены эксперименты по измерению шумовых параметров усилителей с использованием источника дробового шума на основе изготовленных СИС переходов, вольтамперных характеристик СИС переходов с применением среды IRTECON, а также эксперименты по исследованию источников термодинамического шума на основе тонкопленочного резистивного поглотителя и сверхпроводящего микромостика, в том числе с использованием сверхпроводящего RF TES детектора.

Соискатель представил 10 печатных работ, из которых 2 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и в базы Web of Science/Scopus, 2 - патента.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук НИТУ МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Ким Татьяны Михайловны соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании выполненных автором исследований разработаны источники калиброванного шума на основе сверхпроводников для применения при сверхнизких температурах в диапазоне частот 1–1000 ГГц, в том числе разработан метод взаимной внутренней калибровки физической температуры термодинамического микроизлучателя на основе дробового шума сверхпроводящего туннельного перехода. Разработанные подходы позволяют на несколько порядков снизить тепловыделение источников шума и использовать их для калибровки современных высокочувствительных терагерцевых детекторов, в том числе в

составе излучающей матрицы на борту космических аппаратов. В диссертации проведена экспериментальная демонстрация эффективности источника дробового шума с использованием сверхпроводящего туннельного перехода на основе трехслойной структуры $Al/AlO_x/Al$, обеспечивающего шумовой сигнал с эффективной температурой от 2 К, что апробировано с полупроводниковыми охлаждаемыми усилителями и позволит проводить подобную калибровку перспективных параметрических усилителей для квантовых вычислений.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Татьяне Михайловне Ким ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 4 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 4, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



С. И. Мухин

06.10.2023