

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

Ким Татьяна Михайловна

Источники шума для калибровки усилителей и детекторов при сверхнизких
температурах

Специальность 1.3.8 –
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Шитов Сергей Витальевич

Москва – 2023

Общая характеристика работы

Возрастающий интерес научного сообщества к фундаментальным исследованиям Вселенной и к проблеме квантовых вычислений требуют все более и более чувствительных инструментов в нише усилителей с квантовым уровнем собственного шума и сверхнизкотемпературных детекторов терагерцового излучения. В последние годы в этих областях наблюдается быстрый прогресс, и новые разработки связаны с применением эффектов сверхпроводимости. Это требует совершенствования методов измерения шумовых параметров с целью надежной и достоверной оценки чувствительности на уровне квантовых флуктуаций новых детекторов и элементов квантовых схем [1, 2, 3, 4]. Требуется проведение измерений шумовых параметров при сверхнизких температурах 10–300 мК, и актуальными становятся решения, которые позволят не только уменьшить тепловую нагрузку на рефрижераторы, но позволят с достаточной точностью контролировать уровень сигнала и получать калиброванный шумовой сигнал малого уровня в широком диапазоне частот (1–1000 ГГц). Исследования при сверхнизких температурах позволяют подавлять тепловые флуктуации в устройствах для квантовых вычислений на основе сверхпроводников, а также в тепловых детекторах, но при этом возникает проблема малого запаса тепловой мощности охлаждающих устройств. Шумовая метрология, применяемая для калибровки высокочувствительных сенсоров, основана на сравнении шумов исследуемого устройства с калиброванными шумами стандартных источников, которые широко применяются в измерительных системах известных производителей [5, 6, 7].

Широко известны источники калиброванного дробового шума в вакуумных или полупроводниковых приборах [8], высокоинтенсивные газоразрядные источники шума [9], охлаждаемые чернотельные (ЧТ) источники [10]. Использование традиционных термометров, а также чернотельных источников при сверхнизких температурах затруднено из-за их влияния на температурный режим исследуемого устройства, что часто не позволяет достоверно измерять шумовые параметры [10, 11]. Модуляция постоянного [11, 12] или импульсного [13] нагрева ЧТ излучателя мощностью ~ 1 мВт ведет к перегреву системы при использовании рефрижератора растворения с мощностью охлаждения ~ 100 мкВт. Известен пленочный ЧТ излучатель, нагреваемый импульсами напряжения ~ 10 В и представляющий собой аналог композитного болометра размером $\sim 10 \times 10$ мм массой $\sim 0,1$ г. Полученная скорость нарастания фронта ~ 1 мс позволяет проводить калибровку чувствительности и скорости реакции изображающих матриц [14]. Однако высокое эффективное время цикла нагрев–охлаждение подобного ЧТ излучателя, равное $\tau \sim 2$ с, не позволяет реализовать радиометр с частотами модуляции $f_m > 1$ Гц. Оценки

показывают, что при $f_m \sim 10$ Гц температурная амплитуда ЧТ излучателя снижается $\sim (\tau f_m)^{-1}$, и такая модуляция становится малоэффективной.

Использование источников дробового шума низкого уровня, не зависящих от температуры и определяемого пропускаемым током, позволяет получать калиброванный уровень шумового сигнала. В качестве такого источника можно использовать источник дробового шума сверхмалого уровня на основе туннельного перехода типа СИС (сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник), смещенный током на участок нормального сопротивления [15, 16, 17]. Шум такого источника слабо зависит от температуры и определяется пропускаемым через него туннельным током, что позволяет при температуре криостата $\sim 2\text{--}5$ К разместить такой источник вблизи исследуемого сенсора. На сегодня широкое распространение получили туннельные СИС переходы Nb/Al-AlO_x/Nb, минимальный уровень шума которых находится вблизи напряжения смещения $V_g \approx 3$ мВ и составляет более 17 К, что примерно на порядок больше оптимального значения $\sim 1\text{--}2$ К.

Общими недостатками традиционных термодинамических источников являются значительное тепловыделение и большие габариты, что часто приводит к неточности установки физической температуры, например, при пористой структуре или из-за большим временем температурной релаксации (до 10 с [18]), вызывая нестабильность температурного режима экспериментальной установки. Таким образом, в области сверхнизкотемпературных исследований, например, при исследовании новых RFTES болометров [1], возникла острая необходимость в калибровке шумов малой интенсивности с высокой скоростью модуляции сигнала и малым тепловыделением.

Актуальность работы

Получение калиброванного шума для аттестации высокочувствительных сенсоров является первостепенной задачей метрологии чувствительных цепей. Калибровка по термодинамическим шумам термодинамических источников дает возможность установить соответствие между шумовой температурой, мощностью шумового сигнала и физической температурой, используя традиционные контактные термометры. Однако большая тепловая инерция традиционных источников препятствует быстрому разогреву черного тела, и быстрая перестройка теплового режима экспериментальной системы становится невозможной, так как это требует большой мощности за пределами возможностей большинства криорефрижераторов.

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. Предлагаемые подходы позволяют проводить быструю модуляцию шумового сигнала, обеспечивая одновременно сверхмалое тепловыделение. Источником сверхширокополосного термодинамического шума в разработанном калибраторе выступает резистивный микроабсорбер, шум которого определяется его физической температурой.

Создание подобных систем для калибровки чувствительных охлаждаемых сенсоров является необходимой задачей в области сверхнизкотемпературного эксперимента и развитием традиционных подходов в исследовании шумов устройств для приема и обработки сверхмалых сигналов, включая цепи для квантовых вычислений.

Актуальность работы также подтверждается ее выполнением в рамках проекта гранта РФФИ № 20-37-90094 «Интегральные сверхпроводящие источники широкополосного шума и исследование микроволновых сенсоров при сверхнизких температурах» (2020–2022).

Целью диссертационной работы является: поиск и разработка теоретических и технологических подходов к созданию и экспериментальному исследованию нового поколения источников калиброванного шума на основе сверхпроводников для применения при сверхнизких температурах в диапазоне частот 1–1000 ГГц.

Для достижения цели были поставлены следующие теоретические и экспериментальные **задачи**:

1. Теоретически оценить перспективы микроминиатюризации известных источников калиброванного широкополосного шума, совместимых со сверхпроводящими цепями в тонкопленочном исполнении при сверхнизких температурах.

2. Теоретически оценить эффективность и найти пути оптимизации термодинамического излучателя на основе площадного поглотителя из резистивной пленки на диэлектрической подложке массой менее 0,1 г.

3. Обосновать теоретические и технологические подходы к созданию терагерцового излучателя из ниобия с излучающей антенной для исследования RFTES болометра диапазона частот 550–750 ГГц с калибровкой температуры излучения по тепловому гистерезису тонкопленочного микромостика и провести экспериментальное исследование такого источника.

4. Обосновать теоретические и технологические подходы к созданию источника дробового шума на основе туннельной структуры Al/AlO_x/Al для калибровки в диапазоне частот 1–2 ГГц с подключением в стандарте 50 Ом; изготовить экспериментальные образцы и провести исследование такого источника.

5. Обосновать теоретические и технологические подходы к созданию генератора шума с внутренней калибровкой термодинамического терагерцового излучателя с помощью источника дробового шума.

6. Изготовить экспериментальные образцы RFTES болометра и исследовать отклик такого детектора на излучение тонкопленочного поглотителя на диэлектрической подложке; оценить излучательную способность RFTES болометра в диапазоне частот 550–750 ГГц.

Научная новизна

1. Впервые разработан и апробирован 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.

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

3. Впервые предложен метод генерации термодинамического излучения терагерцового диапазона частот с помощью пленочного микрорезистора, интегрированного с планарной антенной.

4. Впервые 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.

5. Впервые предложен метод шумовой термометрии микрорезистора, основанный на сравнении с дробовым шумом туннельного сверхпроводящего перехода.

6. Впервые разработан метод генерации термодинамического шума в терагерцовом диапазоне частот с использованием сверхпроводящего микромостика, разогреваемого током высокочастотного резонатора.

7. Впервые 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.

Практическая значимость

1. Успешная реализация предложенной технологии RFTES болометра открывает путь к созданию нового поколения сверхчувствительных болометрических детекторов, в том числе изображающих матриц с частотным разделением пикселей.

2. Электромагнитная модель чернотельного поглотителя в прямоугольном волноводе позволяет определить и, при необходимости, оптимизировать параметры термодинамического излучателя в заданном диапазоне частот.

3. Применение микроминиатюрных источников термодинамического шума позволяет кардинально снизить их тепловыделение и использовать такие источники при температурах ~ 30 мК; сверхнизкое тепловыделение (1–10 нВт) открывает перспективы для интеграции таких источников непосредственно на чипе микросхемы при температуре ~ 30 мК.

4. Применение прямого токового нагрева поглотителя упрощает конструкцию термодинамических излучателей пленочного типа; метод теплового гистерезиса позволяет определить теплоотвод сверхпроводящей пленки с известной критической температурой в резистивном состоянии и установить температуру разогрева такого пленочного микрорезистора без применения традиционных термометров.

5. 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); применение 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).

6. Метод разогрева с помощью тока резонатора позволяет использовать наноразмерные пленки поглотителя без риска электрических шоков, что повышает их надежность; для таких структур возможна калибровка температуры без применения традиционных термометров, она основана на измерении теплопроводности пленки поглотителя.

7. Использование технологии RFTES болометров позволяет создать новое поколение сверхчувствительных детекторов; такие болометры могут быть также использованы в качестве генератора терагерцового шума.

8. 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.

Методы исследования, используемые в работе:

1. Методы тонких пленок для изготовления микрочипов в чистых технологических зонах класса ISO 7, включая: осаждение тонких пленок металлов и диэлектрических материалов с применением установок магнетронного и электронно-лучевого распыления Plassys MEBTM 550S; литографическая обработка тонких пленок с применением безмаскового лазерного литографа Heidelberg μ PG 501, методами химического и реактивного ионного травления с

применением установки Sentech Instruments SI 591 Compact; аттестация планарных структур с применением, профилометра KLA - Tencor P – 7, оптических микроскопов фирмы Leica.

2. Методы определения электрофизических параметров сверхпроводящих структур с использованием измерительного комплекса, включающего: криостат растворения Oxford Instruments Triton DR200 с базовой температурой 10 мК, сухого криостата Oxford Instruments Triton 1.5 К; электронных систем сканирования вольтамперных характеристик на основе SIS Bias Supply (SRON, Нидерланды), нановольтметр фирмы Keithley модель 2182А, источник тока фирмы Keithley модель 6221; анализатора сигналов фирмы Keysight модель EXA Signal Analyzer N9010В, векторных анализаторов цепей Agilent Technologies PNA-X N5242А и Keysight PNA-X N5242В, сигнальные цепи с охлаждаемыми усилителями, аттенюаторами и высокочастотными теплоизолирующими коаксиальными и теплоизолирующими цепями постоянного тока.

3. Компьютерные методы моделирования, включая: среду электродинамического моделирования Cadence AWR Design Environment, визуальное программирование в пакете MathCAD, программирование в среде Python.

4. Компьютерные методы управления, регистрации и обработки экспериментальных данных, включая пакет Origin, программный пакет IRTECON, программы, разработанные на основе языка программирования Python в лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ МИСИС.

Положения, выносимые на защиту

1. Кардинальное снижение тепловыделения и повышение быстродействия термодинамического излучателя оптического типа достигается при использовании микроразмерного пленочного поглотителя, интегрированного с планарной линзовой антенной, что делает такой излучатель эффективным инструментом для тестирования (калибровки шума) чувствительных цепей при сверхнизких температурах ~ 30 мК.

2. Резистивная пленка на поверхности диэлектрической подложки является термодинамическим излучателем оптического типа с максимальным коэффициентом черноты около 50%, физическая температура которого может регулироваться пропусканием постоянного тока непосредственно через пленку поглотителя.

3. Источник дробового шума на сверхпроводящем туннельном переходе является эффективным калибратором для определения термодинамической температуры микроразмерного поглотителя и может быть интегрирован с таким поглотителем в составе единой планарной микросхемы.

4. RFTES болометр может быть использован в качестве термодинамического излучателя с внутренней калибровкой.

Личный вклад

Автором были 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 600–700 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 освоены методы напыления и обработки тонких пленок металлов и диэлектриков, отработаны технологические этапы изготовления элементов структур, включая туннельные структуры Al/AlO_x/Al (туннельные СИС переходы); освоены методы измерения вольтамперных характеристик СИС переходов с применением среды IRTECON, 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 усилителя с использованием источника дробового шума на основе изготовленных СИС переходов, а также эксперименты по исследованию источников термодинамического шума на основе тонкопленочного резистивного поглотителя и сверхпроводящего микромостика, в том числе с использованием сверхпроводящего RFTES детектора.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 статьях: 1 из которых опубликована в журнале, индексируемом в базе данных Scopus и Web of Science, 2 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. По предложенным моделям источников шума были получены 2 патента.

Апробация результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается докладами на международных конференциях:

1. Ким Т. М. Сверхпроводящие источники широкополосного шума для сверхнизких температур // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов–2021». https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/section_34_22390.htm

2. Меренков А. В., Шитов С. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Устинов А. В. Исследование MEGA болометра диапазона 600–700 ГГц с чернотельным излучателем // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2022. – 1. – с. 102–103.

3. Шитов С. В., Меренков А. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Калинин С. В., Устинов А. В. Оптические измерения MEGA болометра диапазона 600–700 ГГц при температуре 400mK // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2022. – 1. – с. 166–167.

4. Меренков А. В., Ким Т. М., Ермаков А. Б., Соломатов Л. С., Чичков В. И., Шитов С. В. Измерение параметров сверхпроводящего болометра с СВЧ-считыванием // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2023. – 1. – с. 130–131.

5. Ким Т. М., Шитов С. В. Новые методы калибровки шума на сверхнизких температурах. Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, [2023]. <https://kmu.itmo.ru/digests/article/11382>.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 116 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 65 наименования. Работа проиллюстрирована 84 рисунками и 4 таблицами.

Содержание работы

Во **введении** приведен обзор актуальных исследований в области измерения шумов и обоснование актуальности проведения исследований. Определены цели диссертационной работы и задачи, решаемые в ходе ее выполнения. Представлена научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

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. **Раздел 2.1** содержит описание термодинамического излучателя на основе резистивной пленки поглотителя на диэлектрической подложке и результаты электродинамического моделирования поглощающих свойств экспериментального излучателя в среде Cadence AWR Design Environment [19]. Определена конфигурация термодинамического излучателя, включающая в себя двухстороннее покрытие резистивной пленкой с поверхностным сопротивлением $200 \text{ Ом}/\square$ диэлектрической подложки из сапфира толщиной 500 мкм , позволяющая добиться коэффициента поглощения $\sim 40\%$ в диапазоне частот $550\text{--}750 \text{ ГГц}$.

В **разделе 2.2** описана модель источника термодинамического шума в виде чернотельного источника – согласованной СВЧ нагрузки в интегральном исполнении на основе резистивного микроизлучателя, а также приведена разработанная практическая топология источника термодинамического шума. Спектр чернотельного излучения (шума) резистора эффективно ограничен частотами, для которых $hf \leq k_B T$, то есть его спектральная плотность P_f ограничена в соответствии с формулой Планка [20]:

$$P_f = \int_{f_1}^{f_2} \frac{hf}{\exp[hf/k_B T] - 1} df. \quad (1)$$

где h – постоянная Планка; k_B – постоянная Больцмана.

В пределах низких частот или больших температур $hf \ll k_B T$ мощность термодинамического шума резистора P_n , переданная в нагрузку, при температуре T в диапазоне принимаемых детектором частот Δf можно вычислить по приближенной формуле:

$$P_n = k_B T \Delta f. \quad (2)$$

Было предложено использовать в качестве источника чернотельного излучения высокочастотную согласованную нагрузку в интегральном исполнении (рисунок 1), включающую резистивный микроизлучатель (ЧТ), представляющий собой пленку сверхпроводящего материал микронного размера на диэлектрической подложке, включенного в копланарный волновод для подачи постоянного тока. Шумовой сигнал источника термодинамического шума передается на вход исследуемого сенсора, например, гигагерцового усилителя, по копланарному волноводу, согласованному с коаксиальным кабелем или в терагерцовом диапазоне частот посредством излучающей и принимающей антенн. Предложенный источник термодинамического шума позволяет управлять температурой микроизлучателя высокочастотной согласованной нагрузки, подавая на пленку постоянный ток, уменьшает разогрев подложки и всего устройства за счет уменьшения размеров микроизлучателя, а также позволяет значительно уменьшить тепловую мощность, прилагаемую на источник при измерениях.

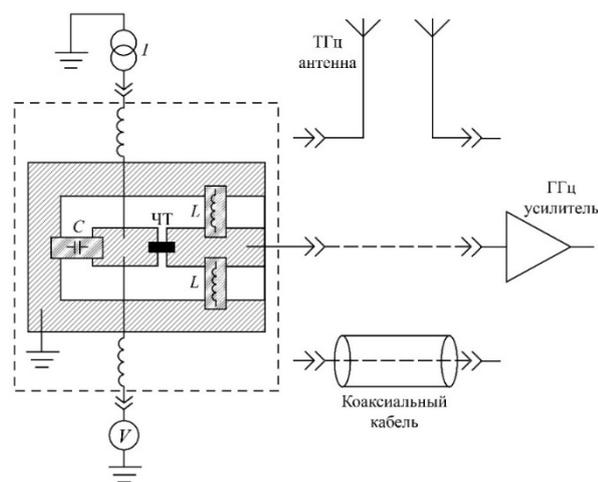


Рисунок 1 – Упрощенная топология микросхемы источника чернотельного излучения высокочастотной согласованной нагрузки

Использование пленки сверхпроводящего материала в качестве микроизлучателя позволяет воспользоваться свойством сверхпроводников в нормальном состоянии выше критической температуры, а именно слабую зависимость сопротивления от температуры. Подав на микроизлучатель постоянный ток I , по значению превышающий критический ток сверхпроводника I_c , можно достичь нормального (резистивного) состояния излучателя с нормальным сопротивлением R_n . Микроизлучатель в резистивном состоянии аналогичен резистору и позволяет определить электрическую мощность, выделяемую им в согласованной нагрузке, в соответствии со следующим выражением:

$$P = I^2 R_n. \quad (3)$$

Разогрев пленки микроизлучателя в согласованной нагрузке с учетом локальной температуры T резистивной пленки, температуры подложки T_0 и теплопроводности между пленкой микроизлучателя и подложкой G должно удовлетворять уравнению теплового баланса:

$$P(T) = G(T - T_0). \quad (4)$$

Таким образом, измеряя ток и напряжение на данном источнике термодинамического шума можно определить значение $P(T)$ из (3). Уменьшение размера микроизлучателя позволяет увеличить полное тепловое сопротивление между подложкой и пленкой. В большинстве практических случаев температуру подложки можно считать постоянной и равной температуре рефрижератора. Теоретические расчеты показывают, что при типовой мощности охлаждения криогенного рефрижератора 100 мкВт при температуре 50 мК для сапфировой подложки толщиной 500 мкм не превышает 10^{-3} К при температурах менее 1 К и электрической мощности 1 мкВт.

В разделе 2.3 описана разработанная модель источника дробового шума на основе сверхпроводящего туннельного перехода, приведены основные соотношения дробового шума СИС переходов и данные электродинамического моделирования согласованности элементов микросхемы.

В переделе низких температур ($eV \gg k_B T \gg hf$) источники дробового шума на основе сверхпроводящих переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник – джозефсоновские туннельные переходы типа СИС [15, 16] – обладают хорошим потенциалом. Дробовой шум слабо зависит от температуры и на нормальном участке ВАХ и регулируется пропускаемым через туннельный переход током.

Квадрат напряжения дробового шума СИС перехода:

$$\langle V_{shot}^2 \rangle = 2eIR_n^2\Delta f. \quad (5)$$

Согласованная мощность дробового шума с учетом (3):

$$P_{shot} = eIR_n\Delta f/2. \quad (6)$$

Эквивалентная температура дробового шума, пропорциональна току на линейном участке вольтамперной характеристики:

$$T_{shot} = P_{shot}/2k_B\Delta f. \quad (7)$$

Щелевое напряжение СИС перехода определяет нижнюю границу мощности шума (эквивалентной температуры дробового шума):

$$T_{shot\ min} = eV_g/2k_B. \quad (8)$$

Использование в качестве источников дробового шума СИС переходов из алюминия (Al/AlO_x/Al) позволяет существенно снизить выделяемую тепловую мощность калибратора при заданных условия согласования ($R_n = 50$ Ом), что позволяет использовать данный вид СИС переходов для калибровки сверхчувствительных микроволновых сенсоров. Значение щелевого напряжения алюминиевых СИС переходов составляет около 300–400 мкВ, критическая температура алюминия около 1,2 К, что позволяет установить минимальную эквивалентную температуру дробового шума 2 К при тепловыделении 2 нВт. Собственная емкость $C_{СИС}$ туннельного перехода ограничивает ширину спектра белого шума и максимальную частоту модуляции уровня шума $\Delta f_{СИС}$, что описывается условием:

$$2\pi R_n\Delta f_{СИС}C_{СИС} < 1. \quad (9)$$

Полоса шума СИС перехода составляет нескольких ГГц, делая его пригодным для исследования маломощных усилителей, но не позволяет использовать дробовый шум в терагерцовом диапазоне. Так, например, для перехода площадью 10 мкм² частотный диапазон Δf_{SIS} не превышает 50 ГГц при сопротивлении ~50 Ом.

Для тестирования сверхпроводящих туннельных переходов на основе алюминия в качестве источников дробового шума было разработано две гибридные микросхемы: одна включает в себя цепь смещения с СВЧ фильтром, а вторая – с использованием стандартного инжектора постоянного тока (Bias Tee). На рисунке 2 представлены их упрощенные эквивалентные схемы.

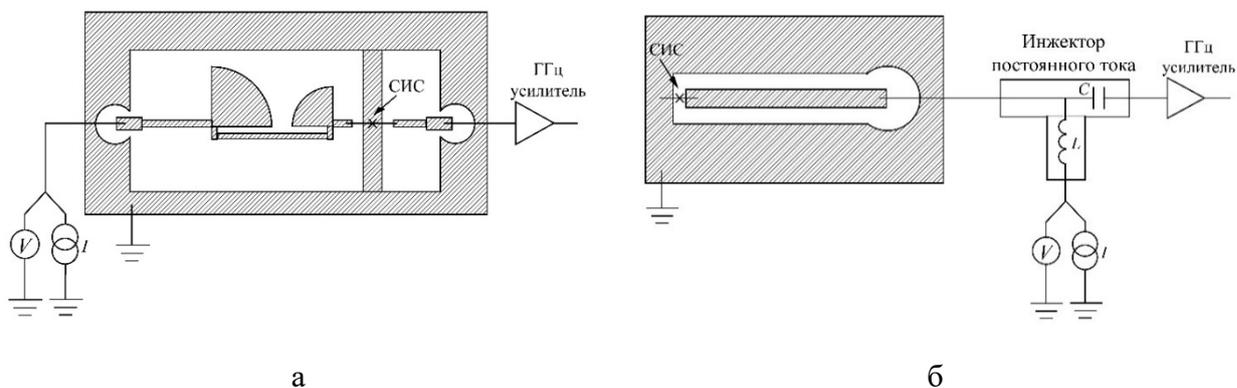


Рисунок 2 – Схемы подключения гибридных микросхем источника дробового шума на основе чипа туннельного СИС перехода, установленного на печатную плату СВЧ, к входу исследуемого усилителя: а) микросхема, включающая цепи для фильтрации постоянного тока; б) микросхема с подачей тока смещения через инжектор постоянного тока

В разделе 2.4 описана микросхема интегрального устройства для калибровки шумовой температуры охлаждаемого усилителя, представляющего собой последовательно соединенные на вход общего усилителя сверхпроводящий термодинамический источник и источник дробового шума на основе туннельного перехода, приведены данные электродинамического моделирования полученной объединенной микросхемы и теоретический расчет мощностей источников.

В разделе 2.4.1 описана модель устройства калибратора шумовой температуры, приведена практическая топология микросхемы, и приведены данные электродинамического моделирования устройства.

Калибровка шумов сверхмалого уровня в непосредственной близости от исследуемого сенсора может быть осуществлена при сочетании фундаментальных свойств термодинамического шума резистивного микроизлучателя и дробового шума сверхпроводящего туннельного перехода. Использование сочетания подобных источников позволит передавать шумовой сигнал с малыми потерями и не влиять на тепловой режим исследуемого сенсора и на режим всей установки.

Было предложено реализовать подобный калибратор в рамках единой интегральной микросхемы, позволяющей осуществлять взаимную калибровку эффективной шумовой температуры чернотельного микроизлучателя и источника дробового шума. Оба источника шума согласованы в гигагерцовом (ГГц) диапазоне с общей линией передачи СВЧ, последовательно и независимо нагружены на вход общего исследуемого сенсора и позволяют обеспечить калиброванный шумовой сигнал малого уровня на вход общего сенсора. Таким образом, можно провести сравнение параметров обоих источников шума и использовать их в разных частотных диапазонах, а именно определять температуру микрорезистора–микроизлучателя, сравнив его шум на ГГц частотах с дробовым шумом туннельного перехода типа СИС [15, 17], и использовать ее для вычисления термодинамического шума на терагерцовых (ТГц) частотах, что является развитием методов шумовой термометрии [21, 22]. Упрощенная топология обобщенной микросхемы представлена на рисунке 3.

Наличие сверхпроводящего состояния у обоих источников шума позволяет независимо друг от друга отключать источник из цепи, подавая на него постоянный ток выше критического, тем самым переводя его резистивное (нормальное) состояние, которое и является рабочим состоянием для каждого источника и исключить его вклад; уменьшить потери сигнала от работающего источника; управлять независимо уровнем шума током смещения в широком диапазоне частот (до ~ 100 кГц); использовать критические температуры материалов как референсные точки. Рабочая температура всего устройства, в том числе диэлектрической подложки, на которой размещены оба источника лежит ниже критических температур материалов туннельного СИС перехода, СВЧ нагрузки и других элементов структуры.

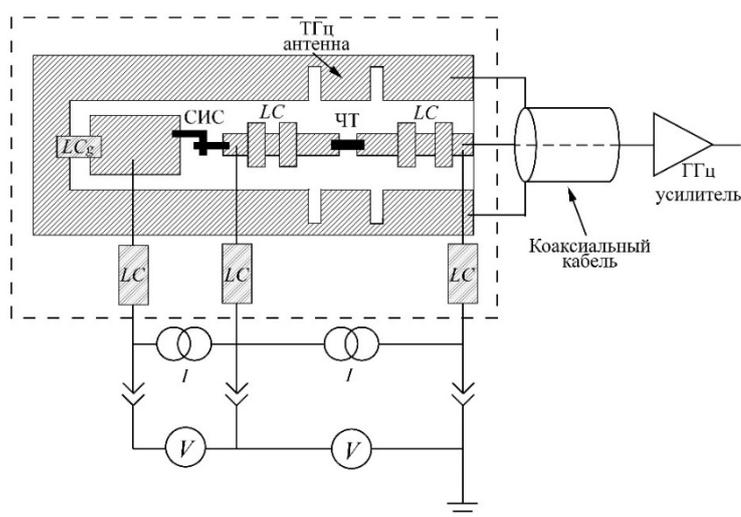
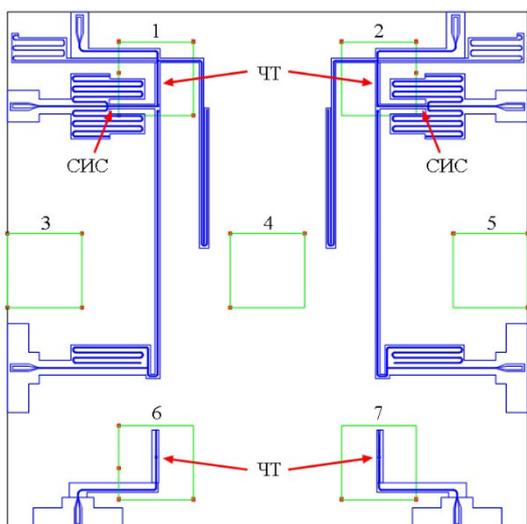
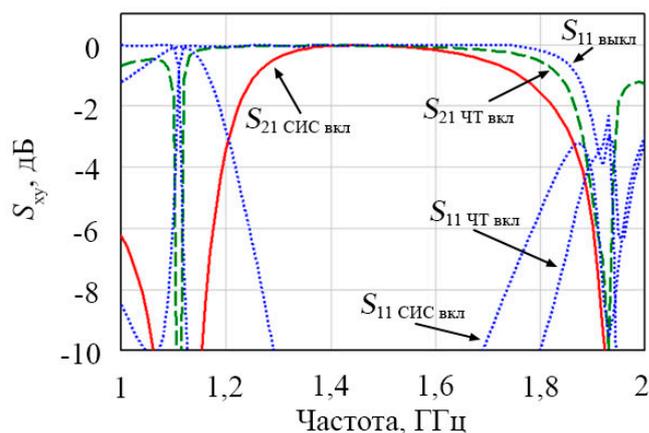


Рисунок 3 – Упрощенный эскиз устройства-калибратора на основе микросхемы, включающей в себя чернотельный сверхпроводящий микроизлучатель и источника дробового шума на СИС перехода

Был разработан дизайн структуры (рисунок 4а) и проведен электродинамический расчет (рисунок 4б) микросхемы, объединяющей термодинамический микроизлучатель и источник дробового шума на основе сверхпроводящего туннельного перехода в среде Cadence AWR Design Environment для применения в матричном блоке из 7 линз.



а



б

Рисунок 4 – а) Калибратор, объединяющего сверхпроводящий СИС переход и сверхпроводящий микромостик, нагруженные на вход общего сенсора, для применения в матрице из 7 пикселей с гексагональным расположением; задействованы пиксели № 1, 2, 6 и 7; б) Коэффициенты прохождения и отражения сигнала на общий детектор с каждого источника

Данное устройство позволяет генерировать термодинамический шум сверхмалого уровня в широком диапазоне частот, при этом независимое согласование с планарной антенной в области ТГц частот позволяет излучать такой шумовой сигнал в полосе антенны. При этом физическая температура такого ТГц излучателя определяется в области ГГц частот путем сравнения интегральной мощности (или спектральной плотности) с мощностью источника дробового шума в области частот, где оба источника согласованы одинаково, используя малошумящий усилитель ГГц диапазона.

В разделе 2.4.2 приводится теоретическое сравнение мощностей шума термодинамического микроизлучателя и источника дробового шума на основе туннельного перехода.

Минимальная шумовая температура гафниевого микроизлучателя определяется его критической температурой для случая с гафниевым микромостиком $T_{c\text{Hf}} = 0,4\text{ К}$, что соответствует мощности шума 200 нВт и току смещения 60 мкА. Минимальная эквивалентная

шумовая температура источника дробового шума на основе алюминиевого СИС перехода определяется его напряжением щели по формуле (8) и при напряжении щели $\sim 0,35$ мВ составит 2 К, мощность шума при данной шумовой температуре составит 2 нВт. Максимальное значение шумовой температуры определяется критической температурой электродов, передающих линий и других элементов структуры. В предлагаемой микросхеме данные элементы изготавливаются из ниобия $T_{c Nb} \sim 9$ К, что соответствует максимальной мощности шума микроизлучателя 3 мкВт, для СИС перехода – 40 нВт.

В разделе 2.4.3 оценивается влияние локального разогрева термодинамического устройства и его влияние на температурный режим диэлектрической подложки и СИС.

Разогрев области СИС перехода относительно сапфировой подложки на расстоянии $R = 2$ мм при разогреве микроизлучателя мощностью 1 мкВт не превысит 10 мК, что позволяет пренебречь нагревом СИС перехода. Проведенные оценки показывают, что предлагаемый источник шума не перегрузит криостат растворения и, в принципе, может быть интегрирован в составе микросхемы с практическим болометром и/или усилителем.

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. Осаждение тонких пленок на подложки осуществляется на установке электронно-лучевого осаждения Plassys MEB™ 550S и на установке магнетронного распыления. На полученных пленках методами литографии проводится формирование полимерных масок, по которым с помощью реактивного ионного травления или процессов обратной «взрывной» (lift-off) литографии выполняется формирование структуры в материале пленки. В зависимости от задачи и осаждаемых материалов используется тот или иной способ литографии.

В разделе 3.1 описан этап подготовки поверхности диэлектрических подложек перед дальнейшим изготовлением структур, а именно устранение загрязнений любого размера и органических веществ с поверхности посредством химической очистки.

В разделе 3.2 описан процесс изготовления термодинамического источника на основе резистивной пленки поглотителя на диэлектрической подложке, а именно осаждение пленки стали 12X18Н10Т толщиной ~ 5 нм и поверхностным сопротивлением $1000 \text{ Ом}/\square$, на сапфировую подложку толщиной 500 мкм методом магнетронного распыления.

В разделе 3.3 описан процесс изготовления образцов сверхпроводящих туннельных переходов на основе трехслойной структуры $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ методом оптической литографии с

разрывом вакуумного цикла осаждения (рисунок 5) [23]. Приведены параметры пленок алюминия: температура сверхпроводящего перехода, шероховатость, равномерность толщины; выбран метод обратной «взрывной» литографии с использованием реверсивного фоторезиста AZ 5214E в негативной моде для исключения межэлектродных закороток.

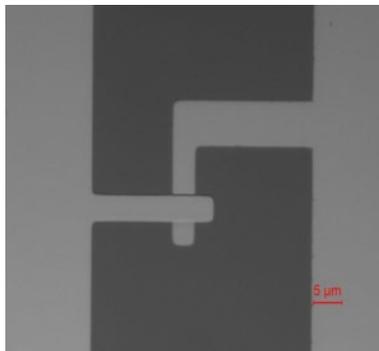


Рисунок 5 – Микрофотография туннельного СИС перехода из алюминия

Приведены результат измерения вольтамперных характеристик СИС переходов $Al/AlO_x/Al$, позволяющие оценить качество переходов и оптимизировать технологические этапы. Типичные значения нормального сопротивления переходов 25–40 Ом и критический ток – 8–24 мкА при давлении оксидирования алюминия 0,2–0,3 мбар.

В разделе 3.4 описан процесс изготовления сверхпроводящего источника термодинамического излучения на основе пленки ниобия сочетанием методов прямой литографии, сопровождающейся реактивным ионным травлением ниобия, и обратной lift-off литографии. Приведены результаты исследования шероховатости и равномерности пленки по толщине на диэлектрической подложке. Описаны процессы изготовления структур для определения температур сверхпроводящего перехода пленок различной толщины.

Микрофотография готовой структуры источника термодинамического шума на основе микромостика из ниобия представлена на рисунке 6.

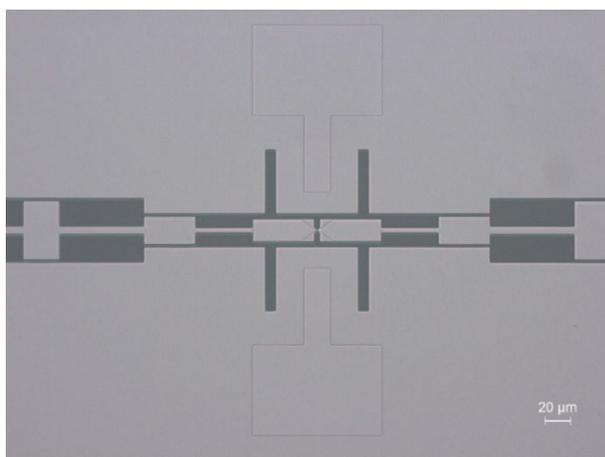


Рисунок 6 – Фотография микромостика из ниобия, включенного одновременно в терагерцовую планарную антенну и резонаторе из ниобия, используемого в качестве прототипа RFTES болометра при температурах ~ 4 К, а также в качестве термодинамического источника с СВЧ нагревом

В разделе 3.5 описан процесс изготовления болометрического детектора со сверхпроводящим микромостиком из пленки гафния в двущелевой антенне и резонаторе из ниобия сочетанием методов прямой и обратной литографии.

Микрофотография готовой структуры микромостика из гафния в двущелевой антенне и резонаторе из ниобия представлена на рисунке 7.

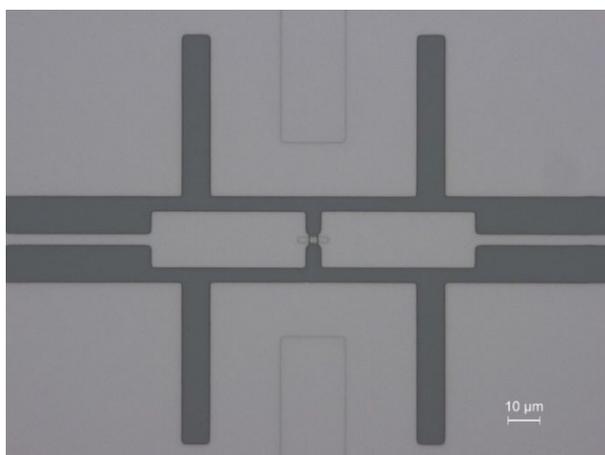


Рисунок 7 – Фотография микромостика из гафния в составе терагерцовой планарной антенны

В разделе 3.6 описана методика изготовления структуры шумового калибратора на основе сверхпроводящего микромостика и туннельного СИС перехода, включающая в себя этапы изготовления, описанные для микромостиков из ниобия или гафния и передающих линий из ниобия.

В разделе 3.7 описана методика изготовления печатных плат из материала для СВЧ Rogers ТММ 10 с диэлектрической постоянной $\varepsilon = 9,8$ – трехслойный материал два слоя меди толщиной около 17 мкм и разделяющий их слой диэлектрика ~500 мкм с использованием безмаскового лазерного литографа, позволяющего обеспечить точность зазоров ± 3 мкм.

Третья глава посвящена описанию экспериментальных систем для измерения изготовленных экспериментальных образцов сверхпроводящих источников шума.

В разделе 4.1 приведено описание систем для измерения электрофизических параметров туннельных СИС переходов, в том числе с использованием пакета IRTECON. 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/AlO_x/Al и криогенных малошумящих усилителей. Калибровочная мощность дробового шума подавалась во входной цепи охлаждаемого усилителя, включая кабели и коаксиальный переключатель, при двух или нескольких напряжениях на СИС переходе, смещенного на резистивный участок ВАХ (0,4–5 мВ), с использованием анализатора сигналов KEYSIGHT EXA Signal Analyzer N9010B. Напряжения смещения на СИС переход Al/AlO_x/Al подаются через блок SIS Bias Supply. Высокочастотный сигнал с СИС перехода поступает на тестируемый криогенный усилитель Low Noise Factory LNC0.3_14A (усиление 37 дБ) через аттенуатор с ослаблением 3 дБ, чтобы обеспечить устойчивость усилителя без применения СВЧ-вентиля. Усилитель фирмы Mini Circuits модель ZHL-1217MLN (усиление 30 дБ) используется при комнатной температуре; сигнал с его выхода фиксируется анализатором сигналов.

Для определения шумовой температуры криогенного усилителя часто пользуются методом Y-фактора, который характеризует изменение выходного сигнала такого усилителя при изменении уровня шума на входе, что традиционно производится попеременной заменой на входе усилителя согласованных нагрузок, имеющих разную физическую температуру. Обычно их называют холодной и горячей нагрузками [17]. Следует также учитывать шум аттенуаторов, если они есть на входе усилителя: аттенуаторы являются серым телом при физической температуре T_{att} и добавляют шум с температурой $(1 - Att)T_{att}$, одновременно ослабляя шум генератора до значения $T_{hot}Att$:

$$T_N = \frac{(T_{hot}Att + (1 - Att)T_{att}) - Y(T_{cold}Att + (1 - Att)T_{att})}{Y - 1}, \quad (10)$$

$$Y = \frac{P_{hot}}{P_{cold}}, \quad (11)$$

где Att – ослабление аттенюатора;

P_{hot} – шумовая мощность горячей нагрузки при температуре T_{hot} на выходе усилителя;

P_{cold} – шумовая мощность холодной нагрузки при температуре T_{cold} на выходе усилителя.

Y -фактор в формулах (10)–(11) выражается в относительных (линейных) единицах, но в экспериментальных измерениях, как правило, считывается в децибелах:

$$Y_{dB} = 10 \lg Y_{lin}. \quad (12)$$

В разделе 4.2 приведено описание экспериментальной установки для исследования образца источника термодинамического излучения на основе микромостика из ниобия в копланарном резонаторе с терагерцовой двушелевой антенной из ниобия при температуре 1,3–6,5 К. на базе сухого криостата Oxford Instruments Triton 1,5 К. Для предотвращения теплового шума 300 К на вход устройства подсоединен аттенюатор 20 дБ на ступени 4 К, на выходе из криостата подключается усилитель Mini Circuits Wideband Amplifier ZVA-183-S+ с усилением 36 дБ с полосой частот 0,7–18 ГГц. Регистрация коэффициента пропускания от источника термодинамического излучения проводится с помощью векторного анализатора цепей Agilent Technologies PNA-X N5242A.

В разделе 4.2 приведено описание экспериментальной установки для регистрации отклика детектора с микромостиком из гафния на излучение термодинамического источника в виде резистивной пленки поглотителя с поверхностным сопротивлением 1000 Ом/□ на сапфировой подложке. Термодинамический источник располагался на расстоянии около 10 мм от линзы на ее оптической оси и фиксировался на ступени с температурой 1 К с помощью медной штанги, которая обеспечивала отвода тепла. Характерное тепловыделение источника шума составляло 6,3 мВт и отводилось на ступень 1 К, которая обладает теплоотводом 2–4 мВт. Температура излучающей поверхности (резистивной пленки) принималась равной температуре сапфировой подложки и измерялась полупроводниковым термометром, прикрепленным с обратной стороны подложки. Измерения проведены на базе схемы установки в рефрижераторе растворения Oxford Instruments Triton DR200 в диапазоне температур 50–200 мК. Чип размером 4×4×0,5 мм³ с детектором монтировался на плоскую поверхность полусферической линзы из сапфира диаметра 10 мм так, что антенна располагалась в оптическом центре линзы. Регистрация коэффициента пропускания от источника термодинамического излучения проводится с помощью векторного анализатора цепей Keysight PNA-X N5242B. Разогревающий ток на пленочный поглотитель подается от источника тока фирмы Keithley модель 6221.

Пятая глава посвящена описанию деталей экспериментов, обработки и анализа полученных результатов.

В **разделе 5.1** описаны результаты эксперимента по исследованию источника дробового шума на основе туннельного СИС перехода $Al/AlO_x/Al$ на входе усилительной системы. Нормальное сопротивление СИС перехода 22 Ом, критический ток 17 мкА. Было получено семейство частотных зависимостей уровня мощности шумового сигнала на выходе усилительной системы в диапазоне частот 1,2–1,7 ГГц, которые представлены на рисунке 8. Усилительная система в криостате растворения состоит из источника дробового шума на основе трехслойной структуры $Al/AlO_x/Al$, криогенного малошумящего усилителя Low Noise Factory LNC0.3_14A, усилителя Mini Circuits Low Noise Amplifier ZHL-1217MLN.

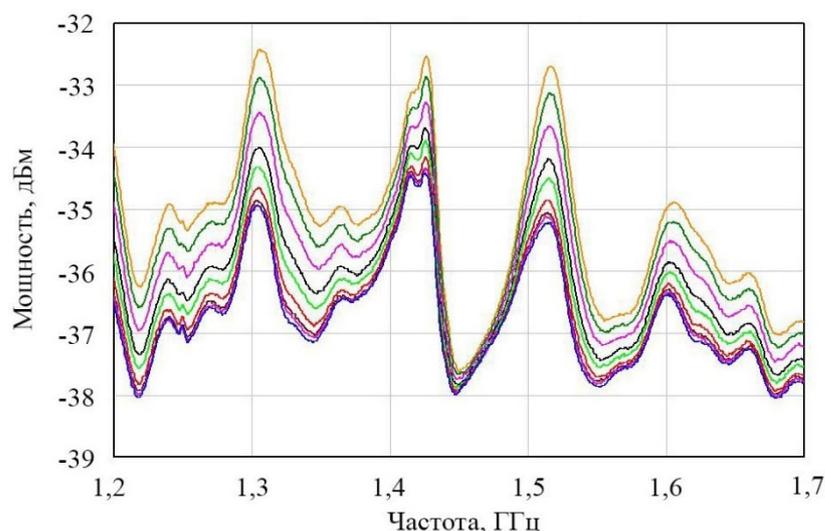


Рисунок 8 – Частотные зависимости уровня шумового сигнала дробового шума СИС перехода при различных напряжениях

В результате эксперимента было определено, что шумовая температура тестируемого криогенного усилителя составит в среднем около 15 К. Теоретическое значение шумовой температуры криогенного усилителя, заявленное производителем 3,6 К, что говорит о наличии в системе неучтенных потерь. Значительная (более 3 дБ) изрезанность шума на выходе усилителя при выключенном источнике также говорит о неидеальности тракта усилителя. Была вычислена шумовая температура тестируемого криогенного усилителя по формуле (8), частотная зависимость которой представлена на рисунке 9.

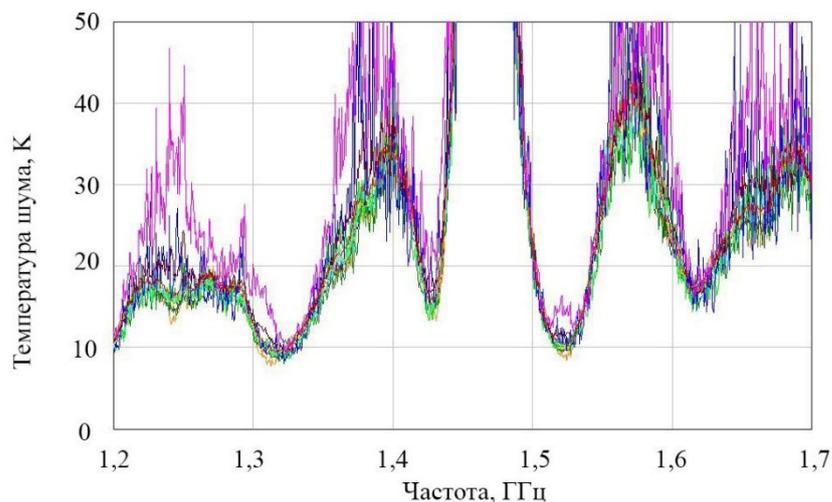


Рисунок 9 – Частотная зависимость шумовой температуры усилителя

Данный эксперимент позволил выявить влияние правильного СВЧ-заземления печатных плат на пропускание широкополосного шумового сигнала, что было подтверждено дополнительным электродинамическим моделированием структуры в соответствии с полученными экспериментальными данными. Шумовая температура тестируемой усилительной системы оценена как 15 К при номинальном значении 3,6 К, что может быть объяснено как влияние терморазвязывающих кабелей длиной более 50 см, необходимых для правильного функционирования криостата растворения. Таким образом продемонстрировано, что шумовая термометрия с помощью специально подготовленного источника дробового шума на СИС переходе Al/AlO_x/Al является удобным и эффективным инструментом для анализа цепей СВЧ при низких и сверхнизких температурах.

В рамках следующих экспериментов было устранено влияние дефекта СВЧ заземления источника дробового шума. Конфигурация системы была оставлена без изменений, включая терморазвязывающие кабели, дающие серьезный вклад в шумовую температуру системы. Усилительная система включала в себя источник дробового шума СИС перехода Al/AlO_x/Al и криогенный усилитель с коэффициентом усиления 26 дБ, а также усилители, работающие при комнатной температуре Mini Circuits Low Noise Amplifier ZHL-1217MLN и усилитель Mini Circuits Wideband Amplifier ZVA-183-S+. Рассчитанная шумовая температура усилительной системы с комнатным усилителем ZHL-1217MLN при температуре 29 мК может быть оценена как 8–20 К. Шумовая температура усилительной системы – криогенный усилитель, аттенюатор, усилитель ZVA-183-S+ – при температуре 29 мК (рисунок 10) может быть оценена как 13–25 К (рисунок 11).

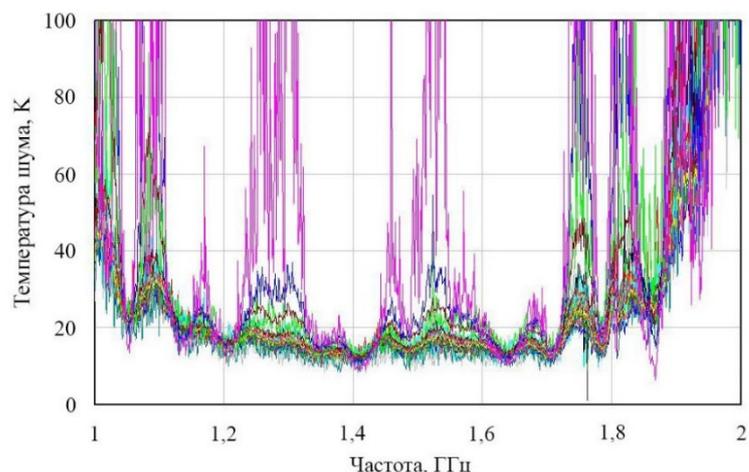


Рисунок 10 – Частотная зависимость шумовой температуры исследуемой усилительной системы с использованием комнатного усилителя ZHL-1217MLN с учетом коэффициента прохождения и холодного аттенюатора

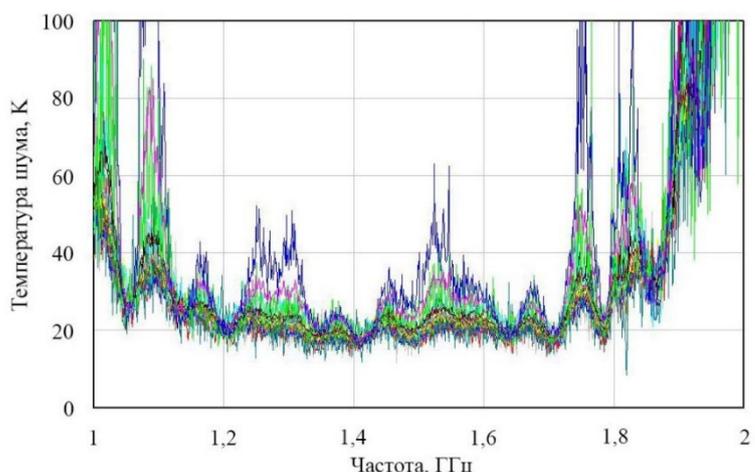


Рисунок 5.1 – Частотная зависимость шумовой температуры исследуемой усилительной системы с использованием комнатного усилителя ZVA-183-S+ с учетом коэффициента прохождения и холодного аттенюатора

Проведённое сравнение отклика на одинаковый шумовой сигнал, подаваемый на вход малошумящего криогенного усилителя, с использованием разных буферных усилителей при комнатной температуре позволил определить истинную шумовую температуру криогенного усилителя. Значение шумовой температуры криогенного усилителя с усилением 26 дБ с учетом все параметров узлов усилительной системы было определено как 4,45 К. В результате обработки полученных экспериментальных данных был сделан один из важных выводов: установлено, что при использовании регистраторов сигнала с уровнем шума около -140 дБ необходимо использовать усилительную систему с коэффициентом усиления не менее 73 дБ, что позволит устранить вклад шумов регистратора сигнала не влиять на температурный режим криостат.

В разделе 5.2 приведены результаты эксперимента по исследованию термодинамического 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 составила 1,3692 ГГц (рисунок 11). Ширина резонанса в середине глубины составила 0,43 МГц.

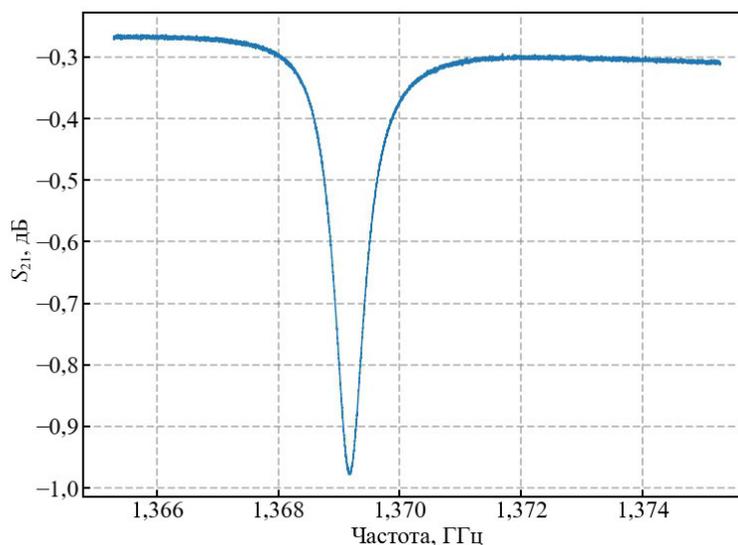


Рисунок 11– Коэффициент пропускания сигнала термодинамического источника на основе микромостика из ниобия при температуре 6,5 К и подаваемой мощности –30 дБм

При постепенном увеличении мощности, подаваемой на чип, уменьшается добротность резонатора, регистрируемая посредством S_{21} . Это означает увеличение потерь в резонаторе, что ассоциируется с ростом сопротивления микромостика вследствие его разогрева. В области малых мощностей (–50... –45 дБм), не наблюдается изменения значения S_{21} при всех температурах чипа в диапазоне 1,3–6,5 К (рисунок 12), что означает отсутствие разогрева мостика и электронная подсистема микромостика тоже не меняется и имеет температуру чипа. Однако при изменении температуры чипа значение S_{21} возрастает из-за изменения концентрации квазичастиц в ниобиевом резонаторе.

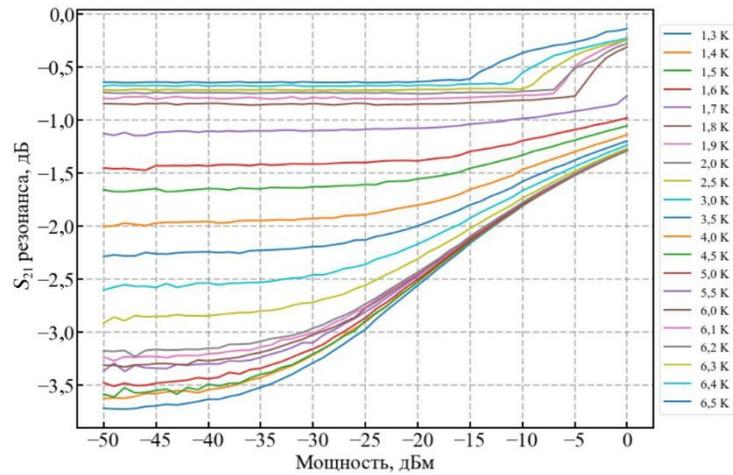


Рисунок 12 – Зависимость глубины резонанса от подаваемой на источник термодинамического излучения на основе мостика из ниобия мощности при разных температурах

Мощность, излучаемая микроизлучателем с электронной температурой T_e , определяется мощностью, подаваемой на источник P_{vna} с векторного анализатора цепей и поступившей на источник S_{31} , с учетом потерь кабелей и ослабления аттенюатора A_1 :

$$P(T) = G(T_e - T_0) = P_{vna} S_{31} A_1, \quad (13)$$

где $T_0 = T_{cr}$ – температура подложки равна температуре криостата;

G – коэффициент теплопроводности между пленкой микроизлучателя и подложкой;

A_1 – потери кабеля и аттенюаторов.

Если применять метод постоянной добротности, то электронную температуру микроизлучателя следует считать фиксированной, $T_e = const$:

$$T_e = T_{cr} + \frac{P_{vna} S_{31} A_1}{G}. \quad (14)$$

и определение теплопроводности между пленкой микроизлучателя и подложкой G становится возможным, если при температурах криостата T_{cr1} и T_{cr2} удастся подобрать мощность воздействия, дающую одинаковые потери (ту же добротность):

$$G = \frac{P_{vna2} S_{312} A_1 - P_{vna1} S_{311} A_1}{T_{cr2} - T_{cr1}}. \quad (15)$$

Значение мощности, поступившей на микроизлучатель S_{31} , определена из электродинамической модели микросхемы сверхпроводящего термодинамического источника в соответствии с экспериментальными данными.

Поскольку микромостик является согласованным с терагерцовой двушелевой планарной антенной, он может выступать как излучателем, так и приемником излучения. Теплопроводность микростика из ниобия при температурах 1,3 и 2 К была измерена методом (15) и составила $7,38 \times 10^{-10}$ Вт/К. Мощность, эквивалентная шуму, NEP микроизлучателя из ниобия в режиме детектирования при полосе 1 Гц может быть оценена, используя значение G как $4,04 \times 10^{-16}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

В разделе 5.3 приведено описание результатов эксперимента по исследованию отклика болометрического детектора из гафния на излучение термодинамического источника в виде пленки поглотителя на диэлектрической подложке. Резонансная частота чипа с микромостиком из гафния в резонаторе из ниобия при температуре 50 мК составила 1,4555 ГГц. Коэффициент пропускания сигнала с болометрического детектора измеряется в диапазоне температур подложки 50–200 мК вблизи резонансной частоты с подаваемой мощностью –70 дБм (рисунок 13).

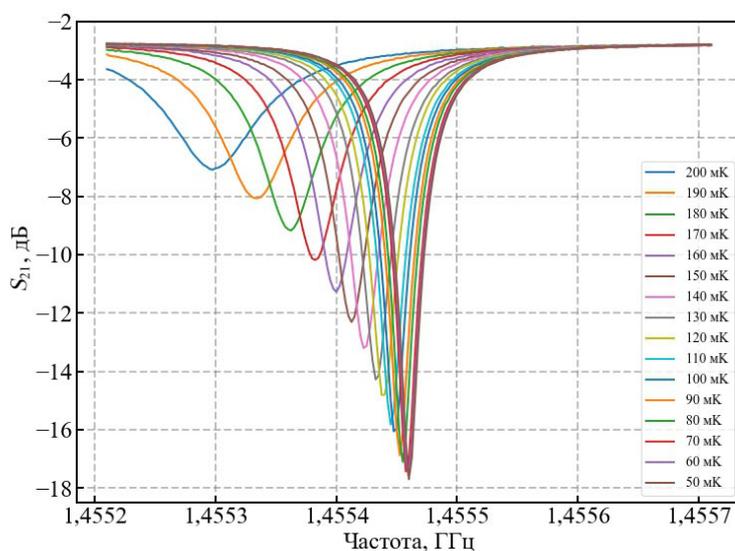


Рисунок 13 – Частотная зависимость коэффициента пропускания сигнала болометрического детектора с микромостиком из гафния от температуры подложки

Коэффициент пропускания детектора как отклик на термодинамическое излучение тестового источника резистивной пленки на сапфировой подложке регистрировался при температуре 70 мК при подаваемой мощности –55 дБм, при разогреве тестового термодинамического источника постоянным током в диапазоне 1–2,5 мА (физическая

температура термодинамического излучателя 6,2–17,3 К) (рисунок 14). Частотная зависимость коэффициента пропускания сигнала болометрического детектора с микромостиком из гафния при температуре подложки 70 мК в отсутствие излучения тестового термодинамического мостика от подаваемой мощности –55...–40 дБм представлена на

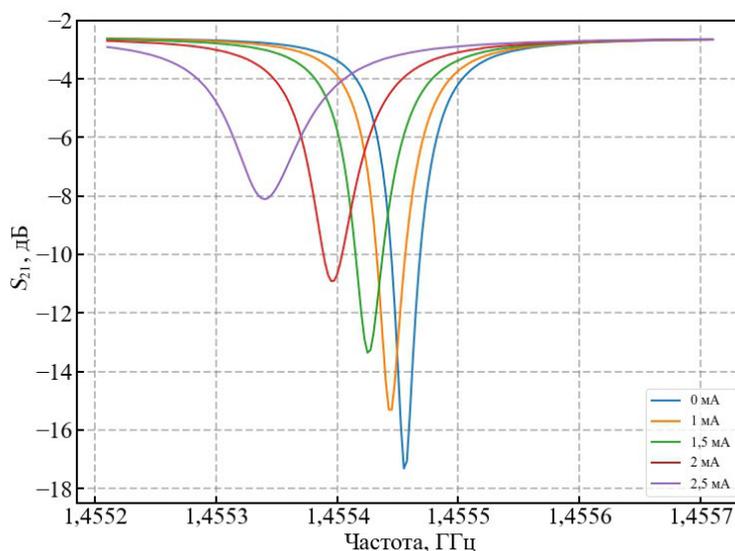


Рисунок 14 – Частотная зависимость коэффициента пропускания сигнала болометрического детектора с микромостиком из гафния при температуре подложки 70 мК и подаваемой мощности –55 дБм при разогреве тестового термодинамического источника постоянным током в диапазоне 1–2,5 мА

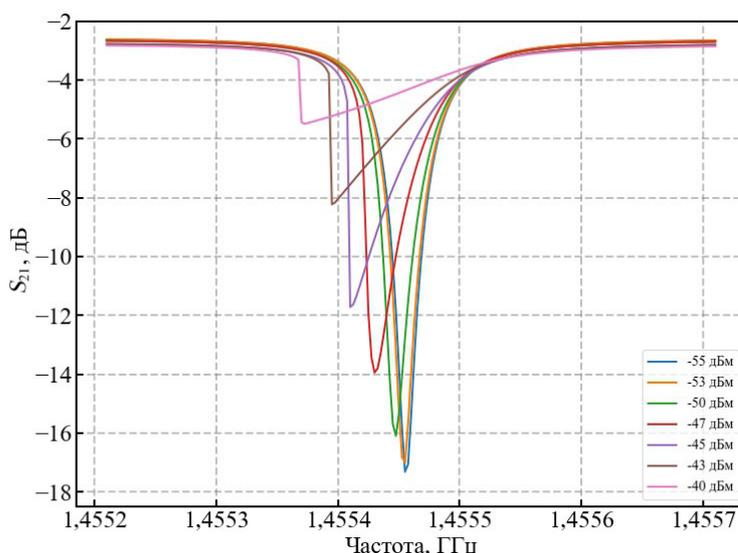


Рисунок 15 – Частотная зависимость коэффициента пропускания сигнала болометрического детектора с микромостиком из гафния при температуре подложки 70 мК в зависимости от подаваемой мощности –55...–40 дБм

Из графика видно, что при подаваемой мощности выше -47 дБм происходит изменение формы резонанса, что можно объяснить очень сильным эффектом кинетической индуктивности (мягкая нелинейность), источник которой на сегодня еще не понят.

Мощность термодинамического излучения пленки поглотителя на диэлектрической подложке $P_{\text{чТ}}$ при разогреве током 2 мА рассчитана как 5,7 пВт в более широком диапазоне частот планарной терагерцовой антенны болометрического детектора 550–750 ГГц. При разогреве тонкопленочного поглотителя до 2 мА коэффициент преобразования входной мощности, которая включает отношение приращения выходной мощности детектора ΔP_{out} на несущей частоте 1,5 ГГц к мощности чернотельного источника $\Delta P_{\text{чТ}}$, составил несколько порядков ($\sim 10^3$), что является уникальным результатом, требующим дальнейшего изучения.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы:

1. В области шумовой термометрии использование микроабсорбера кардинально снижает уровень тепловыделения и повышает скорость изменения температуры такого термодинамического источника; температура может быть определена по измеренной теплопроводности и току разогрева, используя метод токового гистерезиса сверхпроводящего пленочного микромостика. На основании предложенной концепции был получен патент 2757756 «Сверхпроводящий источник термодинамического шума».

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 целевого 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. Предложенная модель и практическая топология устройства калибратора была запатентована – патент 2757858 «Сверхпроводящий источник высокочастотного шума».

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. По разработанной модели изготовлен источник дробового шума на основе туннельного СИС перехода из алюминия.

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. В результате обработки полученных экспериментальных данных был также установлен критерий для необходимого коэффициента усиления системы – не менее 73 дБ, что позволит устранить вклад шумов регистраторов сигнала с уровнем шума около –140 дБ.

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. Подобный термодинамический излучатель также может быть использован в качестве RF TES детектора. Мощность эквивалентная шуму NEP микроизлучателя из ниобия в режиме детектирования при полосе 1 Гц составит $4,04 \times 10^{-16}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

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/кв. Продемонстрировано детектирование оптического сигнала с помощью болометрического детектора с планарным резонатором из ниобия, нагруженного микромостиком из гафния на частоте 1,5 ГГц, одновременно согласованного с планарной двущелевой антенной диапазона частот 550–750 ГГц, при температуре детектора 200 мК, что доказывает, как эффективность термодинамического излучателя, так и высокую чувствительность детектора.

8. Проведенная апробация разработанных сверхпроводящих источников шума микроизлучателя и туннельного СИС перехода, позволяет применить их в дальнейшем как компоненты разработанной схемы устройства внутренней калибровки. Подобное устройство калибровки может быть интегрировано как функциональный блок в составе более сложной микросхемы, например, для калибровки матричного излучающего детектора.

Список публикаций по теме диссертации

1. Ким Т. М., Шитов С. В. Сверхпроводящий источник шума для сверхнизких температур. // Письма в Журнал Технической Физики. – 2021. – 24. – с. 13–16. DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51791.18897. (Т. М. Kim, S. V. Shitov. Superconducting noise-source for ultra-low temperatures. Technical Physics Letters, 2022. Vol. 48, No. 15, pp. 54–57. DOI: 10.21883/TPL.2022.15.55282.18897)

2. Меренков А. В., Шитов С. В., Чичков В. И., Ермаков А. Б., Ким Т. М., Устинов А. В. Сверхпроводящий резонатор с микромостиком из гафния при температурах 50-350 мК // Письма в журнал технической физики – 2018. – 44. – 13. – с. 59–67. DOI: 10.21883/PJTF.2018.13.46328.17149. (Merenkov A. V., Shitov S. V., Chichkov V. I., Ermakov A. B., Kim T. M., Ustinov A. V. A Superconducting Resonator with a Hafnium Microbridge at Temperatures of 50–350 mK. Technical Physics Letters, 2018 Vol. 44, No. 7, pp. 581–584. DOI: 10.1134/S106378501807012X)

3. Меренков А. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Калинин С. В., Шитов С. В. Сверхпроводящий болометрический детектор с высокочастотным считыванием при температуре 400мК // Физика твердого тела. – 2022. – 64. – 10. – с. 1404–1411. DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53081.50НН. (Merenkov A. V., Kim T. M., Chichkov V. I., Kalinkin S. V., Shitov S. V., Superconducting bolometer with high-frequency readout circuit at 400 mK // Physics of the Solid State, 2022. Vol. 64. No. 10. – pp. 1387–1393. DOI: 10.21883/PSS.2022.10.54223.50НН)

4. Патент 2757756 Российская Федерация, МПК H01L 39/16 (2006.01) СПК H01L 39/16 (2021.05). Сверхпроводящий источник термодинамического шума/ Шитов С. В., Ким Т. М. Патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» - № 2021111147, заяв. 20.04.2021, опубл. 21.10.2021, Бюл. № 30

5. Патент 2757858 Российская Федерация, МПК H01L 39/16 (2006.01) СПК H01L 39/16 (2021.08). Сверхпроводящий источник высокочастотного шума/ Шитов С. В., Ким Т. М. Патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» - № 2021111276, заяв. 21.04.2021, опубл. 21.10.2021, Бюл. № 30

6. Ким Т. М. Сверхпроводящие источники широкополосного шума для сверхнизких температур // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов–2021». https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/section_34_22390.htm

7. Меренков А. В., Шитов С. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Устинов А. В. Исследование МЕГА болометра диапазона 600–700 ГГц с чернотельным излучателем // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2022. – 1. – с. 102–103

8. Шитов С. В., Меренков А. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Калинин С. В., Устинов А. В. Оптические измерения МЕГА болометра диапазона 600–700 ГГц при температуре 400мК // Материалы XXVI Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». – 2022. – 1. – с. 166–167

9. Меренков А. В., Ким Т. М., Ермаков А. Б., Соломатов Л. С., Чичков В. И., Шитов С. В. Измерение параметров сверхпроводящего болометра с СВЧ-считыванием // Материалы XXVII Международного симпозиума «Нанопластика и наноплектроника». – 2023. – 1. – с. 130–131

10 Ким Т. М., Шитов С. В. Новые методы калибровки шума на сверхнизких температурах. XII Конгресс молодых ученых ИТМО. Секция: Фотонные устройства перспективных систем передачи данных. Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО, [2023]. <https://kmu.itmo.ru/digests/article/11382>

Список использованных источников

1. A. V. Merenkov, V. I. Chichkov, A. B. Ermakov, A. V. Ustinov, S. V. Shitov. Superconducting RFTES Detector at Milli-Kelvine Temperatures // IEEE Trans. Appl. Supercond., 28 (7), 1 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2827981

2. B. Ho Eom, P. Day, H. G. LeDuc, J. Zmuidzinas. A wideband, low-noise superconducting amplifier with dynamic range. Nature Physics, 8, 623–627 (2012). <https://doi.org/10.1038/nphys2356>

3. Michael D. Audley, Gert de Lange, Jian-Rong Gao, Pourya Khosropanah, Richard Hijmering, Marcel Ridder, Philip D. Mauskopf, Dmitry Morozov, Neil A. Trappe, Stephen Doherty. Optical performance of an ultra-sensitive horn-coupled transition-edge-sensor bolometer with hemispherical backshort in the far infrared // Review of Scientific Instruments. – 2016 – V. 87(4), 043103. – P. 1–22. <https://doi.org/10.1063/1.4945302>

4. Niklas Wadefalk, Anders Mellberg, Iltcho Angelov, Michael E. Barsky, Stacey Bui, Emmanuil Choumas, Ronald W. Grundbacher, Erik Ludvig Kollberg, Richard Lai, Niklas Rorsman, Piotr Starski, Jörgen Stenarson, Dwight C. Streit, Herbert Zirath. Cryogenic Wide-Band Ultra-Low-Noise IF Amplifiers Operating at Ultra-Low DC Power // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2003. – V. 51. – No. 6. – P. 1705–1711. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812570

5. <https://www.keysight.com/ru/pc-1000002268%3Aeapsg%3Aapgr/sns-series-noise-sources?nid=-536902748.0&cc=RU&lc=rus>

6. <https://www.noisecom.com/products/calibrated-sources>

7. <https://www.fairviewmicrowave.com/rf-products/calibrated-noise-sources.html>

8. Eric W. Bryerton. A Cryogenic Integrated Noise Calibration and Coupler Module Using a MMIC LNA // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011 – V.59 – P. 2117–2122. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2155668>

9. Pozar David M. Microwave Engineering 2nd ed. – John Wiley & Sons. Inc. 1998. 720 p.

10. Tae-Weon Kang, Jeong-Hwan Kim, Joo-Gwang Lee, Jeong-Il, Dae-Chan Kim. Determining Noise Temperature of a Noise Source Using Calibrated Noise Sources and an RF Attenuator // IEEE

Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2011 – V. 60 – N. 07 – P. 2558-2563. DOI: 10.1109/CPEM.2010.5544775

11. A.V. Uvarov, S.V. Shitov, A.N. Vystavkin. A cryogenic quasioptical millimeter and submillimeter wavelength bands blackbody calibrator – Measurement Techniques – 2010. –V. 53, No. 9. –P. 1047–1054. <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9617-4>

12. Solomon I. Woods, Stephen M. Carr, Adrian C. Carter, Timothy M. Jung, Raju U. Datla. Calibration of Ultra-Low Infrared Power at NIST // Proceedings of SPIE. – 2010 – V. 7742. – P. 77421P-1– 77421P-8. DOI: 10.1117/12.857911

13. Ph. Abbon, A. Delbart, M. Fesquet, C. Magneville, B. Mazeau, J.-P. Pansart, D. Yvon, L. Dumoulin, S. Marnieros, Ph. Camus, T. Durand, Ch. Hoffmann. A millisecond-risetime sub-millimeter light source for lab and in flight bolometer calibration. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 575 (3), 412–420 (2007). DOI: 10.1016/j.nima.2007.02.094

14. S. Masi, P. de Bernardis, A. Paiella, F. Piacentini, L. Lamagna, A. Coppolecchia, P.A.R. Ade, E.S. Battistelli, M.G. Castellano, I. Colantoni. Kinetic Inductance Detectors for the OLIMPO experiment: in-flight operation and performance. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2019 (003), (2019). DOI: 10.1088/1475-7516/2019/07/003

15. Hirofumi Inoue, Takashi Noguchi and Korato Kohno. SIS junction as a microwave noise source // Journal of Physics: Conference Series – 2010 – V. 234, 042014 – P. 1-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/234/4/042014>

16. Su-Wei Chang, Jose Aumentado, Wei-Ting Wong, Joseph C. Bardin. Noise measurement of cryogenic low noise amplifiers using a tunnel-junction shot-noise source // IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2016. DOI: 10.1109/MWSYM.2016.7538226

17. V. Yu. Belitsky, V. P. Koshelets, I. L. Serpuchenko, M. A. Tarasov, L. V. Filippenko, S. V. Shitov, Superconducting Tunnel Junction Noise Generator and SIS Mixers Noise Measurements. Proc. 20th European Microwave Conference, 1990, 1, 816–820. DOI: 10.1109/EUMA.1990.336144

18. A. Casey, F. Arnold, L.V. Levitin, C.P. Lusher, J. Saunders, A. Shibahara, H. van der Vliet, D. Drung, Th. Schurig, G. Batey, M. N. Cuthbert, A. J. Matthews. Current Sensing Noise Thermometry: A fast practical solution to low temperature measurement // Journal of Low Temperature Physics – 2014 – V. 175 – P. 764–775. DOI:10.1007/s10909-014-1147-z

19. Cadence AWR Design Environment <https://www.awr.com/awr-software/products/awr-design-environment>

20. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел – М.: Наука, 1964. –225 с., ил.

21. L. Spietz, R.J. Schoelkopf, P.Pari. Shot noise thermometry down to 10 mK // Appl. Phys. Lett. – 2006. – V. 89. – P.183123-1-183123-3. <https://doi.org/10.1063/1.2382736>

22. L. Spietz, K. W. Lehnert, I Siddiqi, R. J. Schoelkopf. Primary Electronic Thermometry Using the Shot Noise of a Tunnel Junction // *Science*. – 2003. – V. 300. – No. 5627. – P. 1929-1932. DOI: 10.1126/science.1084647

23. Lucas Grünhfüpt, Uwe von Lüpke, Daria Gusenkove, Sebastian T. Skacel, Natalia Maleeva, Steffen Schlör, Alexander Bilmes, Hannes Rotzinger, Alexey V. Ustinov, Martin Weides, Ioan M. Pop. An argon ion beam milling process for native AlO_x layers enabling coherent superconducting contacts // *Applied Physics Letters*, 111, 072601, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4990491>