

Устройства и методы измерения параметров RFES-болметра

© Т.М. Ким,¹ А.В. Меренков,¹ Ан.Б. Ермаков,² Л.С. Соломатов,¹ В.И. Чичков,¹ С.В. Шитов^{1,2}

¹Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
119049 Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
e-mail: sergey3e@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 12 мая 2023 г.

Принято к публикации 12 мая 2023 г.

Продemonстрирован ряд новых подходов к измерению собственного шума и динамических характеристик сверхпроводящих болометров, построенных по технологии Radio Frequency Transition Edge Sensor (RFES). Разработанные методы были апробированы с экспериментальным образцом диапазона 550–750 GHz и частотой считывания ~ 1.5 GHz при температуре 400 mK. Исследовано поглощение тонкопленочных резистивных покрытий на подложках из сапфира, кварца и определена излучательная способность экспериментального теплового источника, которая составила $\sim 14\%$. Разработан источник дробового шума на туннельном контакте $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$, и с его помощью определена шумовая температура буферного усилителя диапазона 1.35–1.6 GHz, приведенная к выходу детектора, которая составила ~ 20 K. Быстродействие RFES с пленкой гафния размером $6 \times 2 \times 0.08 \mu\text{m}$ составило $\sim 3 \mu\text{s}$ и было измерено методом модуляции СВЧ подогрева на втором резонансе ~ 4.2 GHz; динамический диапазон при частоте модуляции 10 kHz составил более 23 dB. Полученные данные позволили определить чувствительность RFES как $1 \cdot 10^{17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}} \pm 30\%$, что с точностью до ошибки измерений совпало с теоретическим значением.

Ключевые слова: RFES, эквивалентная мощность шума, время отклика, динамический диапазон, черное тело, излучательная способность, закон Планка, модуляция тепла, дробовой шум, электронный газ, высокочастотный резонатор, электромагнитное моделирование.

Введение

Определение чувствительности, быстродействия и динамического диапазона сверхпроводящих терагерцовых детекторов при сверхнизких температурах порядка 100 mK является задачей, для решения которой плохо подходят некоторые традиционные, проверенные временем методы и устройства. Такие детекторы предназначены, как правило, для работы с низкими значениями фонового излучения на борту космических обсерваторий или стратосферных аэростатов. Чувствительность детекторов принято характеризовать параметром Noise Equivalent Power (NEP), который определяется путем сравнения собственных шумов с шумами известного (калиброванного) источника шума. Классическим источником калиброванного шума является нагреваемое черное тело (ЧТ) — идеальный поглотитель с известной физической температурой. Благодаря принципу обратимости поля поглощательная и излучательная способности тел совпадают при условии $hf < k_B T$, что связано с планковским распределением спектра термодинамического шума [1]. На практике поглотители электромагнитного излучения являются „серыми“, т.е. не обладают идеальным поглощением, а в ряде случаев их поглощающая способность заведомо мала и неравномерна по частоте. В этом случае принимаемая детектором мощность зависит не только от температуры ЧТ и полосы приема, но и от спектральной плотности излучения. Таким об-

разом, без учета корректировки на частотно-зависимый коэффициент поглощения ЧТ ошибка измерения может оказаться неприемлемо высокой.

Традиционный метод ввода сигнала в криостат в виде квазиоптического пучка плохо подходит для лабораторных исследований сверхнизкотемпературных детекторов, так как абсорбция широкополосного фонового ЧТ излучения ~ 300 K может перегреть рефрижератор растворения, холодильная мощность которого составляет $\sim 100 \mu\text{W}$ при 100 mK. В связи с этим при сверхнизких температурах используют ЧТ излучатели малой интенсивности, помещенные внутрь криостата вблизи входной апертуры детектора. Такие ЧТ поглотители могут выглядеть в виде пористой губки или представлять собой конусообразную полость с поглощающими стенками [2]. Для достижения мощности тестового сигнала $\sim 10^{-14}$ W в полосе детектора 550–750 GHz тепловой источник необходимо нагревать до ~ 10 K, чтобы рабочий диапазон частот сенсора лежал вблизи или ниже частоты среза планковского спектра, что соответствует условию $hf \leq k_B T$. Такой нагрев требует довольно большой электрической мощности ~ 10 mW, и излучатель не может быть установлен на одну ступень охлаждения с детектором. Отводить тепло целесообразно на более мощную ступень криостата ~ 1 K, но и в этом случае импульсный прилив тепла к ступени ~ 1 K может вызвать заметные температурные дрейфы криостата, которые длятся минуты, и их можно спутать с откликом

детектора. Обычно для подавления эффектов, вызванных тепловыми дрейфами, применяют модуляцию сигнала, период которой заведомо меньше характерного времени дрейфа, и которую реализуют с помощью механических или электронных обтюраторов на входе детектора. Альтернативным методом является модуляция температуры самого ЧТ. Однако при частотах выше ~ 1 Hz такая модуляция может быть затруднена по причине низкой теплопроводности пористого поглотителя, а также из-за теплоемкости, которая существенна даже для ЧТ массой ~ 1 г, так как быстрый сброс тепла за период модуляции с неизбежностью приводит к повышению средней электрической мощности, передаваемой в систему криостатирования. Решение может быть найдено на пути повышения КПД теплового источника, который тем ниже, чем массивнее само ЧТ (чем больше его теплоемкость), так как переданная на детектор мощность зависит только от температуры и коэффициента черноты. Прогресс в шумовых измерениях на THz-частотах виден на пути создания малоразмерных ЧТ излучателей в сочетании с широкополосными излучающими антеннами [3].

Скорость отклика детектора обычно измеряют, используя модулированный сигнал. Максимальную скорость обычно определяют по критерию уменьшения амплитуды демодулированного сигнала вдвое. Для быстродействующих детекторов время отклика детектора может составлять $\sim 10 \mu\text{s}$ и меньше, что затрудняет применение даже относительно малоинерционных термодинамических источников. При измерениях коротких времен отклика ~ 1 ns применяют электронно-модулированные монохроматические сигналы. Например, известен метод биений двух монохроматических терагерцовых генераторов, излучение которых подается из комнаты [4]. Для применения данной методики следует оснастить криостат растворения оптической или волноводной системой, препятствующей проникновению инфракрасного излучения ~ 300 K, и приобрести дорогостоящие генераторы терагерцового диапазона.

Прогресс в измерении быстродействия болометрических детекторов можно реализовать на пути внутренней генерации тепла, как обсуждается в настоящей работе применительно к болометрическому детектору, построенному с применением технологии Radio Frequency Transition Edge Sensor (RF TES) [5–7]. Чувствительным элементом RF TES-болометра является пленочный микромостик из гафния с электронным газом, включенный одновременно в цепь планарной антенны диапазона 550–750 GHz и в цепь сверхпроводящего копланарного резонатора с частотой (считывания) ~ 1.5 GHz, что позволяет использовать такой детектор в матрицах с частотной селекцией пикселей по технологии FDM (Frequency Division Multiplexing) [8]. Настоящая работа посвящена демонстрации новых устройств и методов измерения шумовых и динамических параметров детектора, построенного согласно технологии RF TES [9], которая имеет, по мнению авторов, определенные преимущества перед уже зрелыми технологиями TES и MKID [10,11].

1. Термодинамический излучатель

Для измерения оптического отклика RF TES-детектора, было разработано „серое тело“, которое представляет собой резистивную пленку, осажденную на сапфировую пластину диаметром 15 mm, толщиной 0.5 mm и массой менее 0.5 g. Постоянная времени нагрева и охлаждения излучателя оказались близки и составили ~ 1 s (рис. 1, *a*); в эксперименте время установления температуры составляло 15–20 s. На рис. 1, *b* представлены рассчитанные зависимости оптической мощности от температуры черного тела, которые могут быть абсорбированы болометром: для каждой температуры T_{ph} спектр проинтегрирован в полосе частот 550–750 GHz с учетом планковского среза. В расчетах использованы два значения коэффициента черноты A : для абсолютно черного тела использовано $A = 1$ (на всех частотах), а для экспериментального поглотителя спектр скорректирован с учетом обнаруженной частотной неравномерности $A(f)$.

В работе [9] было использовано оценочное значение коэффициента черноты ~ 0.42 ; частотной неравномерностью и прозрачностью пленки мы пренебрегли. Сравнение вычисленной мощности на входе RF TES-болометра и измеренного приращения на выходе позволило получить коэффициент передачи и определить $NEP \approx 3 \cdot 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$, что оказалось всего в 3 раза выше теоретического предсказания. Это послужило мотивацией для отдельного исследования, призванного уточнить характеристики излучателя.

Определение черноты пленочного поглотителя на терагерцовых частотах выглядит весьма непростой экспериментальной задачей, и было решено ограничиться расчетом коэффициента поглощения с применением современных методов электромагнитного моделирования. Для этого в среде AWRDE Microwave Office [12] была создана электромагнитная модель, позволяющая сформировать плоскую падающую волну. За основу были взяты свойства волны в прямоугольном одномодовом волноводе с металлическими стенками. Известно, что плоская волна, распространяющаяся в ограниченном сечении такого волновода, совпадает с результатом интерференции двух плоских волн, падающих под небольшим углом к оси волновода, т.е. к нормали пленки, установленной поперек оси волновода. Разумно предположить, что отражение от пленки, установленной в прямоугольном волноводе, не должно отличаться от отражения линейной суперпозиции двух плоских волн в свободном пространстве. Виртуальная измерительная система устроена следующим образом. На двух противоположных концах заглушенного прямоугольного волновода сечения $400 \times 240 \mu\text{m}$ с идеально проводящими стенками были сформированы идентичные излучатель и приемник в виде двух пар полуволновых вибраторов из идеального проводника, как показано на рис. 2, *a*. Плоскости установки вибраторов, показанные на рис. 2, *a*, располагаются на расстоянии около $80 \mu\text{m}$ от заглушенных концов волновода (сверху

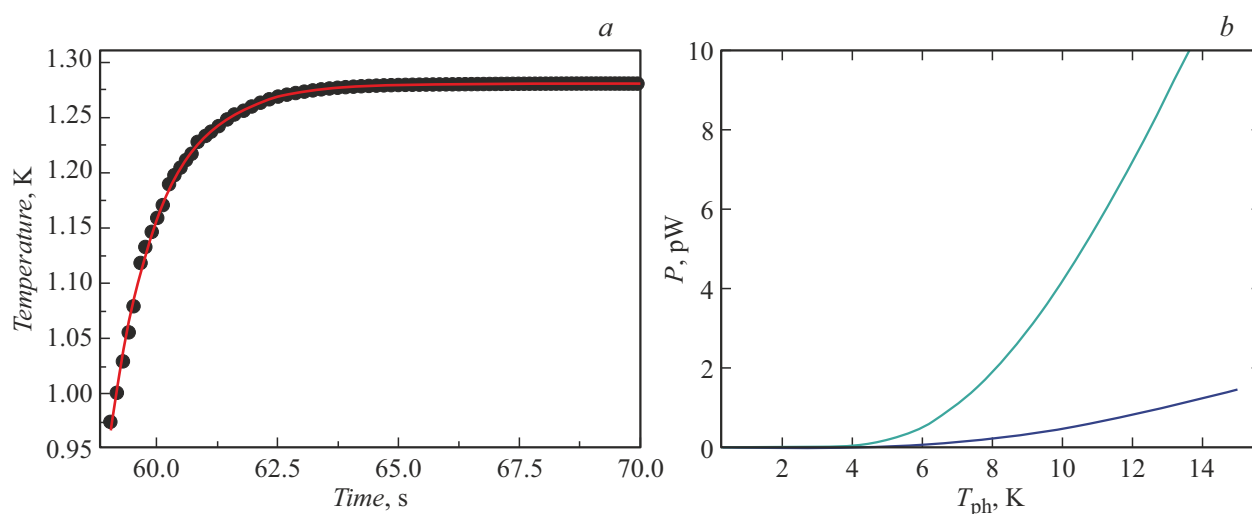


Рис. 1. Нагрев пленочного излучателя постоянным током. *a* — экспериментальная динамика нагрева сапфировой пластины постоянным током 0.2 мА (точки). Расчетная динамика нагрева с постоянной времени 0.8 с (сплошная кривая); *b* — зависимость максимально возможного значения мощности, принятое детектором в диапазоне 550–750 GHz, от температуры поглотителя, рассчитанное для двух значений коэффициента черноты: $A = 1$ (верхняя кривая) и $A \approx 0.14$ (нижняя кривая).

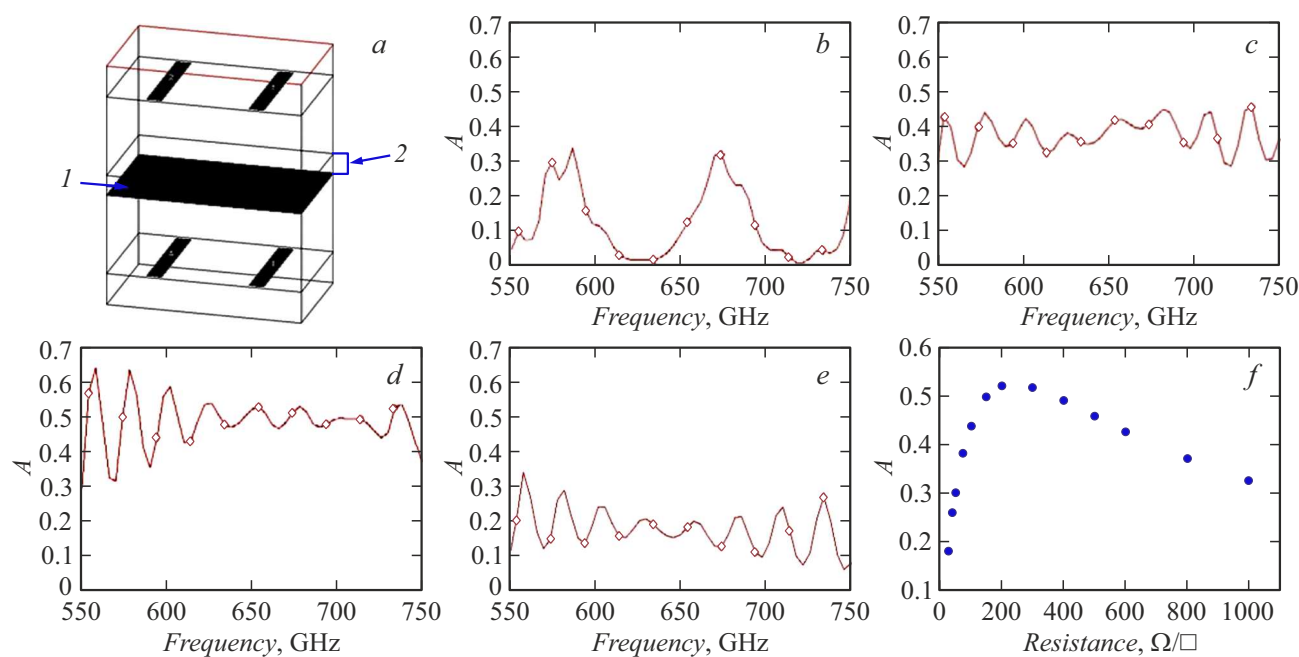


Рис. 2. Результаты электромагнитного анализа коэффициента поглощения A тонкой резистивной пленки на диэлектрической подложке от частоты. *a* — электромагнитная модель заглушенного отрезка прямоугольного волновода с приемо-передающими парами диполей. Все внешние грани параллелепипеда — это тонкие идеально проводящие стенки; ось распространения волны направлена вертикально: 1 — пленка поглотителя, 2 — диэлектрическая подложка; *b* — коэффициент поглощения пленки 1000 Ω/\square на сапфировой подложке толщиной 500 μm (экспериментальный случай); *c* — пленка 200 Ω/\square , нанесенная на обе стороны сапфировой подложки 500 μm ; *d* — „подвешенная“ пленка 200 Ω/\square ; *e* — пленка 200 Ω/\square на кварцевой подложке толщиной 50 μm ; *f* — сводные данные поглощения для „подвешенной“ пленки с разным значением поверхностного сопротивления Ω/\square (значения средние по диапазону 550–750 GHz).

и снизу), которые выполняют роль контр-рефлектора. Система настроена на передачу мощности в полосе частот 550–750 GHz с потерями не более 1 dB на краях диапазона.

Такая модель позволила определить коэффициент отражения и прохождения волны для тонкой резистивной пленки с разным сопротивлением на подложках из сапфира ($\epsilon \approx 10$) и кварца ($\epsilon \approx 4$), имея при этом

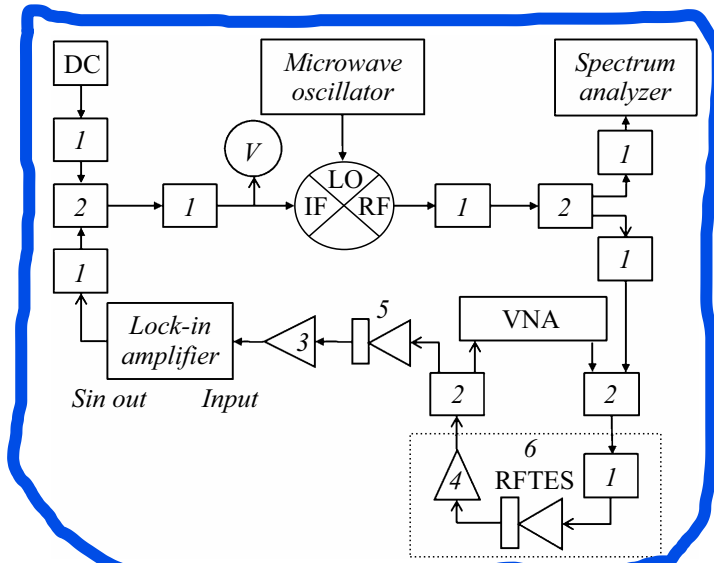


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерений динамических характеристик RFTES-болометра: 1 — развязывающие аттенуаторы 3 или 6 dB, 2 — сумматоры и делители мощности, 3 — малошумящий усилитель низкой частоты, 4 — охлаждаемый малошумящий усилитель СВЧ, 5 — демодулятор, 6 — криостат растворения DR200 „Triton“ фирмы „Oxford Instruments“.

целью уточнение параметров экспериментального излучателя. Сопротивление пленки на квадрат варьировалось в интервале $\rho = 25\text{--}1000\ \Omega/\square$, а толщина подложки в диапазоне $50\text{--}500\ \mu\text{m}$, что позволило определить оптимальное значение поверхностного сопротивления, которое составило $\rho = 200\ \Omega/\square$. На рис. 2, *b–e* рассмотрен случай экспериментальной пленки $\rho = 1000\ \Omega/\square$, случай двухстороннего покрытия подложки резистивной пленкой $\rho = 200\ \Omega/\square$, идеальный случай подвешенной пленки (без подложки), а также вариант тонкой подложки из кварца. На рис. 2, *f* приведены сводные данные поглощения подвешенной пленки разного сопротивления.

Электродинамическое моделирование показало, что коэффициент черноты поглотителя может достигать наибольшего значения 50% при $\rho \approx 200\ \Omega/\square$ только для подвешенной пленки. Полное поглощение оказывается невозможно в силу того, что ультратонкая пленка излучает в оба полупространства, т.е. она полупрозрачна. Для экспериментального сопротивления $\sim 1000\ \Omega/\square$ на сапфировой подложке толщиной $0.5\ \text{mm}$ коэффициент черноты снижается до нескольких процентов, демонстрируя серьезную частотную неравномерность, вызванную интерференцией прямой и отраженной волн внутри сапфировой подложки. Интегральный коэффициент черноты такого излучателя в диапазоне частот $550\text{--}750\ \text{GHz}$ составляет лишь 14% от идеального черного тела с той же температурой, как показано на рис. 1, *b* (нижняя кривая). Двухстороннее покрытие такой же подложки (рис. 2, *c*) позволяет улучшить коэффициент черноты до $A \approx 0.4$ и избежать частотной изрезанности, что можно считать неплохим вариантом

излучателя для будущих экспериментов. Использование относительно тонкой подложки $\epsilon \approx 4$ (кварц $50\ \mu\text{m}$) оказывается менее эффективным.

Важным результатом исследования пленочного ЧТ является то, что термодинамическая мощность, использованная в расчете чувствительности детектора в работе [9] была переоценена в 3 раза, и значение NEP оказалась завышенным. Это является веским основанием для коррекции данных отклика экспериментального болометра. На данном этапе исследования можно заключить, что, исходя из физических параметров использованной пленки гафния и рабочей температуры, с точностью до ошибки измерения ($\sim 1\ \text{dB}$ или $\sim 30\%$), полученная экспериментально для RFTES $\text{NEP} \approx 1 \cdot 10^{-17}\ \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ совпадает с NEP, рассчитанной по методике HEDD (Hot Electron Direct Detector) [13].

2. Шумы буферного усилителя

Все известные на сегодня сенсоры терагерцовых сигналов являются преобразователями сигнала на более низкую частоту, на которой возможна дальнейшая обработка сигнала с помощью традиционных электронных устройств, усилителей, оцифровщиков и т.д. Коэффициент преобразования мощности таких сенсоров, как правило, не превышает единицы. Это означает, что шумы усилительного тракта, пересчитанные на вход сенсора, могут существенно снижать чувствительность всего устройства. Если используют полупроводниковый усилитель, выделяющий сравнительно много тепла ($\sim 10\ \text{mW}$), его, как правило, не устанавливают вблизи сенсора, а соединяют с сенсором достаточно длинным теплоизолирующим коаксиальным кабелем, что увеличивает шумовую температуру на входе такой цепи.

В эксперименте использовался СИС переход со структурой $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ при температуре $30\text{--}50\ \text{mK}$, как это было предложено ранее в работе [3]. Известно, что шумовая мощность, генерируемая СИС переходом, слабо зависит от физической температуры, а рассеиваемая мощность составляет всего $\sim 0.1\ \mu\text{W}$. Было обнаружено, что шумовая температура, измеренная на входном разьеме кабеля, который ведет к усилителю, установленному на ступени криостата $3\ \text{K}$, составляет $\sim 20\ \text{K}$, а не $5\text{--}10\ \text{K}$, как оценивалось ранее, исходя из спецификации используемого усилителя.

Подобные расхождения серьезно влияют на оценку соответствия экспериментальных образцов физическим и математическим моделям, заложенным при их создании. При этом вклад шумов усилителя в измеряемый шум болометрического приемника как целого может быть недооценен, что приводит к неверным оценкам шума самого болометра. Поскольку чувствительность детектора [9] является в значительной степени расчетным параметром, опирающимся на калибровку шума черного тела, обнаруженный избыточный шум усилителя

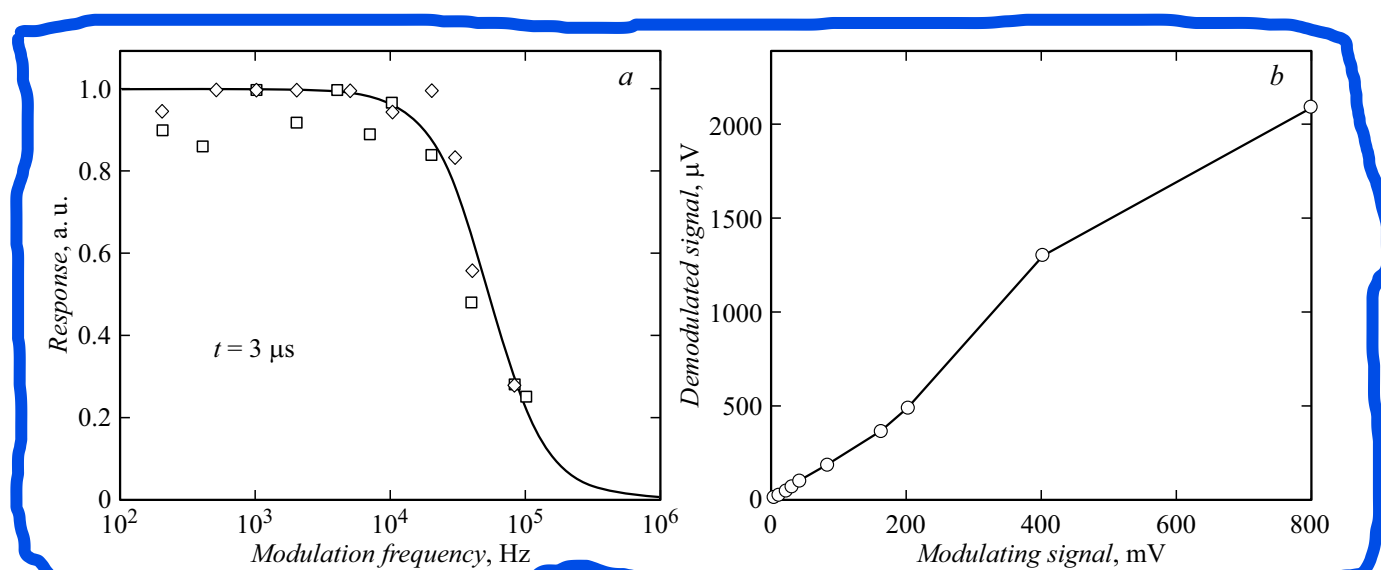


Рис. 4. Динамические характеристики RFTES-болометра. *a* — экспериментальные данные зависимости нормированной амплитуды отклика от частоты модуляции (точки) и теоретическая зависимость для $\tau = 3 \mu\text{s}$; *b* — зависимость амплитуды демодуляции на входе фазового детектора от напряжения модулятора (точки). Сплошная линия — линейная интерполяция между экспериментальными значениями.

смещает доверительный интервал значений NEP самого сенсора в сторону меньших значений.

3. Быстродействие и динамический диапазон

Недавно были предложены и детально проработаны новые решения для быстрой модуляции источника термодинамического сигнала, пригодные для использования внутри криостата при температурах $\sim 100 \text{ mK}$, включая генератор терагерцового шума на основе планарных линзовых антенн с внутренней калибровкой температуры по дробовому шуму сверхпроводящего туннельного перехода [3]. Скорость модуляции такого терагерцового излучателя с термодинамической температурой порядка $\sim 10 \text{ K}$ определяется временем тепловой релаксации микромостика и может составлять $< 10 \mu\text{s}$ для пленки ниобия на сапфире. На сегодня эксперимент по непосредственной модуляции терагерцового шума находится в стадии подготовки, поэтому мы использовали новый метод измерения быстродействия, основанный на модуляции внутреннего разогрева детектора с помощью амплитудно-модулированного сигнала на частоте, не совпадающей с частотой резонанса (частотой резонатора). Отметим, что на частоте резонатора $\sim 1.5 \text{ GHz}$ и, следовательно, на более высоких частотах имеет место плавный разогрев болометрического мостика, что позволяет установить в нем рабочую температуру, соответствующую оптимальному значению dR/dT . Разумно полагать, что при нагреве током на частоте второй моды резонатора, которую можно назвать второй полосой прозрачности резонатора, скорость тепловой релаксации электронной подсистемы мостика не изменится. Если

частоты второй моды резонатора находятся вне полосы рабочих частот буферного усилителя, $1.35\text{--}1.6 \text{ GHz}$, то модуляция несущей частоты $\sim 4.2 \text{ GHz}$ может быть зарегистрирована только вследствие разогрева электронной подсистемы.

Схема экспериментальной установки для измерения быстродействия и динамического диапазона болометра представлена на рис. 3. Амплитудно-модулированный сигнал формируется с помощью балансного смесителя ZX06-U432H-S+ фирмы „Mini Circuit“. Несущая частота $\sim 4.2 \text{ GHz}$ (+17 dBm) подается в качестве гетеродина на разъем LO (Local Oscillator) смесителя от генератора E8257D фирмы „Agilent“. Модуляция несущей задается через разъем IF (Intermediate Frequency) смесителя от опорного генератора фазового детектора (далее — ФД) SR830 фирмы „Stanford Research“. Модулированный сигнал снимается с выхода RF (Radio Frequency) смесителя и делится пополам для анализатора сигналов N9030A (Agilent Technologies), который визуализирует спектр и мощность, поступающие на детектор. Вторая половина модулированного сигнала суммируется с мощностью смещения на частоте $\sim 1.5 \text{ GHz}$, поступающей от векторного анализатора цепей N5242B фирмы „Keysight“. Полученный композитный сигнал подается внутрь криостата на исследуемый RFTES-детектор по общему коаксиальному кабелю.

С выхода RFTES-детектора сигнал попадает на охлаждаемый усилитель и затем делится поровну между анализатором цепей и демодулятором (квадратичным детектором); амплитуда демодулированного сигнала регистрируется ФД. В эксперименте частота модуляции варьировалась в диапазоне от 100 Hz до 100 kHz . Полученная зависимость амплитуды демодулированного сигнала от частоты модуляции сигнала на второй гармонике

резонатора представлена на рис. 4, а. Согласно этим данным на частотах модуляции ниже 16 kHz отклик можно считать не зависящим от частоты модуляции. Вблизи частоты 20 kHz отклик уменьшается вдвое, что позволяет оценить время реакции устройства $\sim 3 \mu\text{s}$. Скорость электрон-электронного взаимодействия в пленке гафния при температуре $\sim 400 \text{ mK}$, рассчитанная по методике [14], составляет $\sim 15 \text{ ns}$, а скорость остывания определяется временем электрон-фононной релаксации $\sim 10 \mu\text{s}$, что по порядку величины близко к времени реакции самого резонатора с полосой $\sim 50 \text{ kHz}$. Таким образом, можно заключить, что характерные времена мостика и резонатора согласуются между собой, и система близка к оптимальной.

Оценка линейности отклика RFETES-болметра проводилась на фиксированной частоте модуляции $\sim 10 \text{ kHz}$. Была получена почти линейная зависимость амплитуды демодулированного отклика от напряжения модуляции в диапазоне 4–800 mV (более 23 dB). Экспериментальные данные зависимости амплитуды отклика от напряжения/глубины модуляции представлены на рис. 4, б. Мощность подогрева мостика на частоте $\sim 1.5 \text{ GHz}$ составила $\sim 0.3 \text{ pW}$, что с учетом отрицательной тепловой обратной связи определяет абсолютный максимум входного сигнала [8,10]. Как показал спектральный анализ, небольшой „горб“ на зависимости с рис. 4, б является „подставкой“ и связан с просачиванием паразитных гармоник, возникающих при значительных амплитудах воздействия на балансный смеситель.

Заключение

Разработанные приборы и методы измерения были успешно использованы для определения ключевых параметров сверхнизкотемпературного RFETES-болметра на основе пленки гафния: NEP, времени отклика и динамического диапазона. Исследование RFETES-детектора потребовало усовершенствования традиционных узлов измерительной системы и методик, связанных с ее калибровками. Выполнено оригинальное исследование излучательной способности теплового источника на основе диэлектрической подложки с резистивным покрытием, что не описано в литературе, но принципиально влияет на калибровку NEP. Измерение шумов, привносимых в систему каналом усиления, было определено не с помощью физического разогрева согласованной нагрузки, а с помощью дробового шума сверхпроводящего туннельного перехода, который может функционировать при сверхнизких температурах. Проведенный поиск альтернативных путей для генерации быстрого теплового сигнала привел к созданию оригинального метода инъекции модулированной мощности на одной из высших мод резонатора. Таким образом, работа обладает методической, научной и практической ценностью, позволяющей расширить ее результаты на более широкий круг детекторов. Полученные результаты

подтверждают перспективность новых детекторов с СВЧ считыванием нелинейного импеданса электронного газа, а также демонстрируют новые подходы к развитию традиционных метрологических методов.

Финансирование работы

Исследование поддерживалось проектом РФФИ № 20-37-90094 „Аспиранты“ и проектом НИТУ МИСИС „Квантовый интернет“ (грант № K2-2022-029) в рамках Программы стратегического академического лидерства „Приоритет-2030“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T.S. Kuhn. *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity*, 1894–1912. — 2nd ed. (Chicago: University of Chicago Press, 1987)
- [2] A.B. Уваров, С.В. Шитов, А.Н. Выставкин. Метрология, **9**, 3 (2010). [A.V. Uvarov, S.V. Shitov, A.N. Vystavkin. Meas. Tech., **53** (9), 1047 (2010). DOI:10.1007/s11018-010-9617-4]
- [3] Т.М. Ким, С.В. Шитов. Письма ЖТФ, **47** (24), 13 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55759.117-23 [Т.М. Kim, S.V. Shitov. Tech. Phys. Lett., **48** (15), 54 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55759.117-23]
- [4] Е.М. Гершензон, М.Е. Гершензон, Г.Н. Гольцман, А.М. Люлькин, А.Д. Семенов, А.В. Сергеев. ЖЭТФ, **97** (3), 901 (1990). [E.M. Gershenzon, M.E. Gershenzon, G.N. Gol'tsman, A.M. Lyul'kin, A.D. Sernenov, A.V. Sergeev. JETP, **97**, 901 (1990).]
- [5] С.В. Шитов. Письма в ЖТФ, **37** (19), 88 (2011). [S.V. Shitov. Tech. Phys. Lett., **37**, 932 (2011). <http://journals.ioffe.ru/pjtf/2011/19/p88-94.pdf>]
- [6] A.V. Merenkov, V.I. Chichkov, A.B. Ermakov, A.V. Ustinov, S.V. Shitov IEEE Trans. Appl. Supercond., **28**, 7 (2018). DOI:10.1109/TASC.2018.2827981
- [7] A.B. Меренков, С.В. Шитов, В.И. Чичков, А.Б. Ермаков, Т.М. Ким, А.В. Устинов. Письма в ЖТФ, **44** (13), 59 (2018). [A.V. Merenkov, S.V. Shitov, V.I. Chichkov, A.B. Ermakov, T.M. Kim, A.V. Ustinov. Tech. Phys. Lett., **44** (7), 581 (2018). DOI:10.1134/S106378501807012X]
- [8] P.A.J. de Korte, J. Beyer, S. Deiker, G.C. Hilton, K.D. Irwin, M. MacIntosh, S.W. Nam, C.D. Reintsema, L.R. Vale. Rev. Sci. Instrum. **74**, 3087 (2003). DOI: 10.1063/1.1593809
- [9] A.B. Меренков, Т.М. Ким, В.И. Чичков, С.В. Калинин, С.В. Шитов. ФТТ, **64** (10), 1404 (2022). DOI:10.21883/FTT.2022.10.53081.50HH
- [10] A.T. Lee, P.L. Richards, S.W. Nam, B. Cabrera, K. D. Irwin. Appl. Phys. Lett., **69** (12), 1801–1803 (1996). DOI: 10.1063/1.117491
- [11] D.K. Day, H.G. LeDuc, B.A. Mazin, A. Vayonakis, J. Zmuidzinas. Nature, **425**, 817 (2003). DOI: 10.1038/nature02037

- [12] Cadence AWR Microwave Office. Электронный ресурс.
Режим доступа: <https://www.flowcad.com>> awr-microwave-office
- [13] B.S. Karasik, R. Cantor. Appl. Phys. Lett., **98**, 193503 (2011).
DOI: 10.1063/1.3589367
- [14] B.L. Altshuler, A.G. Aronov. Modern Problems. Condens. Matter. Sci., **10**, 1 (1985).
DOI: 10.1016/B978-0-444-86916-6.50007-7