

05

Исследование термодинамического излучателя со сверхвысокочастотным разогревом для калибровки RFTES-детектора

© Т.М. Ким,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 16 мая 2024 г.

В окончательной редакции 16 мая 2024 г.

Принято к публикации 16 мая 2024 г.

Представлены концептуальный подход и экспериментальные данные по тестированию миниатюрного термодинамического излучателя терагерцового диапазона частот на основе разогрева пленочного мостика на основе ниобия в сверхпроводящем резонаторе на частоте около 1.4 GHz. Шумовой термодинамический сигнал излучен двухщелевой сверхпроводящей интегральной линзовой антенной диапазона 550–750 GHz в виде коллимированного пучка протяженностью около 15 mm на апертуру терагерцового RFTES-детектора; оба прибора установлены на одной ступени криостата растворения при физической температуре излучающего чипа и детектора около 60 mK. Впервые зарегистрировано оптическое воздействие микроминиатюрного термодинамического излучателя терагерцового диапазона на сверхнизкотемпературный болометр. Проведен анализ тепловой нагрузки экспериментального излучателя на криостат растворения.

Ключевые слова: RFTES-детектор, микроминиатюрный термодинамический излучатель, болометрический детектор.

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58340.167-24

Введение

Недавно испытанный RFTES-детектор показал свою эффективность в области терагерцовых частот, продемонстрировав Noise Equivalent Power (NEP) $\approx 10^{-17}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ при температуре около 400 mK [1]. Тестирование детектора проводилось с термодинамическим излучателем в виде нагреваемой резистивной пленки, перекрывающей апертуру детектора [2], что является разновидностью традиционного метода черного (серого) тела, применяемого для измерения чувствительности широкополосных охлаждаемых сенсоров самых разных типов [3–4]. Сильной стороной метода черного тела (ЧТ) является простота калибровки спектральной плотности посредством определения физической температуры и коэффициента поглощения используемой среды. Аттестация сенсоров, работающих при сверхнизких температурах около 100 mK, как правило, производится с использованием чернотельных излучателей, расположенных внутри криорефрижераторов, что позволяет исключить влияние теплового фона, поступающего в криостат из лабораторного помещения через оптические вводы. Это делается еще и потому, что запас тепловой мощности таких криостатов невелик (около 100 μ W). В добавок к этой проблеме излучатель на основе ЧТ, построенный по классической схеме в виде полости с управляемой температурой, не позволяет проводить

быстрые измерения из-за значительной теплоемкости такого устройства. В современной научной литературе трудно найти информацию по использованию классического ЧТ в виде сферической полости с малым отверстием, обеспечивающим множественное внутреннее переотражение, которое приводит к полной термализации излучения с температурой стенок такой полости. Это связано с необходимостью использования значительной (около 1 cm) апертуры такого излучателя. В подавляющем числе практических случаев форма полости претерпевает геометрическую трансформацию, удовлетворяющую условию достаточно большого числа переотражений падающего излучения, например, в виде к крупнопористой губки или внутренней поверхности металлического конуса, покрытого слоем поглотителя. Излучатель со значительной массой проявляет, как правило, тепловую инерцию на временах около 1 s и плохо подходит для измерения времени отклика детектора, что напрямую связано с ограничением скорости отвода тепла рефрижератором. Это заставляет искать пути создания источников калиброванного шума микроминиатюрных размеров с малой мощностью нагрева и малой тепловой инерцией. Анализ миниатюрного пленочного поглотителя [2] показал, что резистивная пленка всегда является серым телом, а значит в отличие от ЧТ, точность калибровки ограничена точностью определения коэффициента поглощения (серости). Из литературы

известны, по крайней мере, два подхода к созданию миниатюрных источников, близких по своим свойствам к ЧТ: на основе обратного инжиниринга площадного микроболометра [5] и с использованием резистивной излучающей антенны [6]. Такие излучатели могут прийти на смену ставшим уже традиционными чернотельным поглотителям на основе пористых материалов и/или конусообразных полостей [3,7,8], уменьшив тепловыделение и улучшив быстродействие. Однако тепловыделение таких калибраторов в режиме непрерывной модуляции не принципиально отличается от пленочного поглотителя [2], так как включает разогрев подложки. Иное решение с использованием микропоглотителя было предложено в наших работах [9–11]. Настоящая работа развивает эти новые подходы в направлении использования локального сверхвысокочастотного (СВЧ) разогрева микропоглотителя, предназначенного для аттестации экспериментальных RFTES-детекторов, а также других сенсоров с квазиоптическим входом в диапазоне физических температур от 30 мК до 5–6 К. Температурные ограничения на использование микропоглотителей могут варьироваться в зависимости от материала поглотителя, так как они определяются критической температурой T_c пленочного микрорезистора, являющегося источником широкополосного термодинамического шума, а также рабочим диапазоном температур других сверхпроводящих элементов схемы.

1. Концепция черного тела с антенной

В основу функционирования устройства положено хорошо известное следствие теоремы взаимности Лоренца о том, что принимающую антенну можно обратить в излучающую в том же диапазоне частот, с той же эффективностью и с тем же распределением электромагнитного поля с точностью до коэффициента потерь на диссипацию и отражение в волноведущих цепях и оптических элементах. Это означает, что хорошо согласованный с антенной болометрический микромостик, можно обратить в чернотельный излучатель, если нагреть такой мостик постоянным или быстропеременным током. С точки зрения электродинамики СВЧ, такое решение на терагерцовых частотах является аналогом классического метода нагреваемой согласованной нагрузки, помещенной на конце коаксиального кабеля или волновода, который широко используется до частот сигнала f_s около 100 GHz. В нашем случае каналом передачи мощности является квазиоптический пучок в свободном пространстве, формируемый интегральной линзой антенной. Иными словами, термодинамические флуктуации в резистивном микромостике, разогревом локально до температуры T , передаются в планарную антенну в виде тока диапазона частот согласования мостика и антенны, которая совместно с коллимирующей линзой излучает шумовой сигнал в виде квазиоптического пучка в заданном направлении, и если детектор согласован с

таким пучком, то принятый сигнал в первом приближении совпадает с сигналом от ЧТ, имеющего ту же температуру T , что и локально разогретый резистивный мостик. Интуитивно понятно, что локальный разогрев микромостика и его термоизоляция от подложки играют принципиальную роль в снижении тепловыделения и повышении быстродействия такого калибратора.

С практической точки зрения желательно, чтобы температуру локально разогретого микрорезистора можно было определить без встроенного в поглотитель термометра. Это позволило бы сделать структуру максимально компактной. Отметим, что в случае инвертированного болометра с электронным газом традиционная термометрия в принципе невозможна, так как температуры электронной подсистемы и решетки принципиально не совпадают. Очевидной реперной точкой является критическая температура пленки T_c : в узком интервале температур вблизи T_c у сверхпроводника резко меняется сопротивление, что легко зарегистрировать. Следует отметить, что планковский спектр излучения ЧТ в области терагерцовых частот в отличие от диапазона гигагерцовых частот при температурах ниже 1 К имеет пренебрежимо малую плотность, поэтому тестовый сигнал разумной мощности, например около 10^{-16} W, можно получить лишь при разогреве ЧТ выше 2 К. Это означает, что тепловой сток от излучателя с температурой T_c должен быть либо изолирован от рабочей ступени рефрижератора $T_r \approx 100$ мК, либо тепловая мощность такого стока должна быть пренебрежимо малой. В первом случае использование стока на более мощную ступень рефрижератора может создать проблему увеличения радиационной нагрузки на ступень растворения, так как в этом качестве выступает, как правило, ступень охлаждения криостата 3 – 4 К. Второй подход можно реализовать с использованием микромостиков с электронным газом. Резюмируя, перспективный калибратор со сверхмалым тепловыделением может быть создан на основе микромостика с электронным газом, интегрированным в планарную антенну и имеющим критическую температуру $T_c > 2$ К.

Рассмотрим вопрос поддержания произвольной температуры излучающего мостика. В нашей работе [9] было показано, что для определения температуры сверхпроводящего мостика при его разогреве током выше T_c можно использовать тепловой гистерезис его вольт-амперной характеристики (ВАХ) $I(V)$. Этот метод позволяет определить теплопроводность поглотителя вблизи T_c и на этой основе экстраполировать зависимость $T(I)$ для $T > T_c$. Однако для точного измерения петли гистерезиса ВАХ требуется источник постоянного тока с достаточно малыми шумами, что является отдельной экспериментальной задачей, требующей применения специальных методик, включая многокаскадные фильтры подавления помех.

Сравнивая несколько методов определения и поддержания температуры микрорезистора, можно прийти к

выводу, что метод измерения добротности СВЧ резонатора, как это делается в RF TES-детекторе, может быть использован аналогично методу теплового гистерезиса, так как позволяет вычислить теплопроводность поглотителя. Проведем мысленный эксперимент. Возьмем RF TES-детектор [1] и будем измерять добротность его резонатора, контролируя нормированное пропускание чипа S_{21} . Известно, что, увеличивая мощность несущей, можно разогреть поглотитель до температуры T_c мостика, он перейдет из сверхпроводящего в нормальное состояние, и добротность резонатора уменьшится резким скачком. Таким образом, разогрев микромостиком резонатора до скачка добротности, мы генерируем ЧТ излучение с температурой T_c и пучком излучения, геометрия которого определяется сочетанием интегрированной на чип антенны и коллимирующей иммерсионной линзы. Быстродействие такого гипотетического излучателя определяется скоростью разогрева пленки микропоглотителя, а не всего чипа.

Резюмируя, практический микроминиатюрный излучатель может представлять собой модифицированную версию RF TES-детектора, включающую такую же линзовую антенну и отличающуюся лишь более высокой T_c мостика. Тестируемый RF TES-детектор при температурах 200–400 mK и RF TES-излучатель, показанный на рис. 1, *a*, разогреваемый до температуры 5–6 K (зависит от материала пленки излучателя), могут быть установлены друг напротив друга, как представлено на рис. 1, *b*, что позволяет получить эффективность передачи термодинамического излучения, близкую к 100%. К недостаткам данного метода можно отнести погрешности определения температуры микромостика, отличной от заранее известного значения T_c . В принципе, может быть применен метод экстраполяции: возрастание температуры поглотителя относительно температуры подложки будет происходить пропорционально рассеиваемой на мостике СВЧ мощности. Однако такая экстраполяция предполагает неизменное значение теплопроводности и отсутствие влияния такого разогрева на электроды резонатора в области контакта с мостиком. При этом теплопроводность, определяющая скорость релаксации электронной температуры, быстро растет как с ростом электронной температуры для модели электронного газа, так и с ростом физической температуры. Для большинства сверхпроводников теплопроводность имеет широкий максимум в диапазоне температур 1–10 K [12].

Обсудим обстоятельства, влияющие на черноту микромостика-поглотителя. Вблизи T_c энергия спаривания в мостике становится очень мала, и даже для токов с частотой f_s около 10 GHz в отличие от постоянного тока импеданс пленки становится практически не зависимым от температуры и близким к нормальному сопротивлению, R_n . Иными словами, если выполняется условие $2\Delta(T) \ll hf_s$, то пленка сверхпроводника становится поглотителем. Как следует из флуктуационно-диссипативной теоремы, такая пленка должна стать

излучающим ЧТ в диапазоне согласования с антенной независимо от ее проводимости на постоянном токе. В связи с этим регистрация сверхпроводящего перехода в резонаторе с применением сравнительно низкой частоты смещения $hf_b < 2\Delta(T)$ является лишь индикацией температуры электронной подсистемы T_c , но не условием превращения пленки из идеального (нешумящего) проводника в чернотельный излучатель терагерцовых фотонов. Иными словами, если для температур эксперимента и для частот сигнала всегда выполняется условие $2\Delta(T) \ll hf_s$, то плавное изменение интенсивности ЧТ излучения может быть получено в пределах от температуры криостатирования чипа излучателя до T_c микромостика. Таким образом, температура чипа (температура криостатирования) также адекватно отражает термодинамическую температуру излучения. Это означает, что имеющийся RF TES-болومتر с мостиком из гафния (частота распаривания около 30 GHz) также может быть использован в качестве практического излучателя, если известна температура его чипа. При этом диапазон задаваемых температур чипа будет ограничен не критической температурой резонатора (при внешнем нагреве он не нужен, не используется), а добротностью антенны, что определено будет работать до температуры $T_{cNb}/2 = 4 - 4.5$ K для пленок ниобия. Для более высоких температур и/или частот такая система будет вести себя аналогично [6], а скорость модуляции излучения будет ограничена временем разогрева, определяемым тепловой массой чипа и интегрированной с ним коллимирующей линзы.

2. Тепловая и электрическая модели экспериментального излучателя

Для реализации концепции инвертированного RF TES-болметра был проведен детальный анализ конструкции такого излучателя, ориентированный на параметры известных материалов и электромагнитную модель RF TES-детектора. Исходя из вышесказанного, материал мостика должен иметь $T_c > 2$ K. Ориентируясь на данные из работ [12,13], были выбраны пленки Nb толщиной ~ 10 nm, имеющие $T_{cNb1} \approx 6$ K, что ниже критической температуры резонатора, изготовленного из массивной пленки ниобия толщиной около 200 nm ($T_{cNb2} \approx 9$ K). Используя литературные данные [11], теплопроводность мостика размером $2 \times 2 \mu\text{m}$ из ниобия при температуре около 5 K можно оценить как $G \approx 10^{-7}$ W/K, а необходимую для нагрева мощность СВЧ несущей как 200 nW, что много меньше номинальной тепловой мощности типового рефрижератора растворения при 100 mK (около 100 μ W).

Известно, что для электродинамического анализа работы RF TES можно применять модель сосредоточенной цепи. Это объясняется тем, что вариацией импеданса любого распределенного элемента можно пренебречь, если частота меняется мало, а это и есть случай

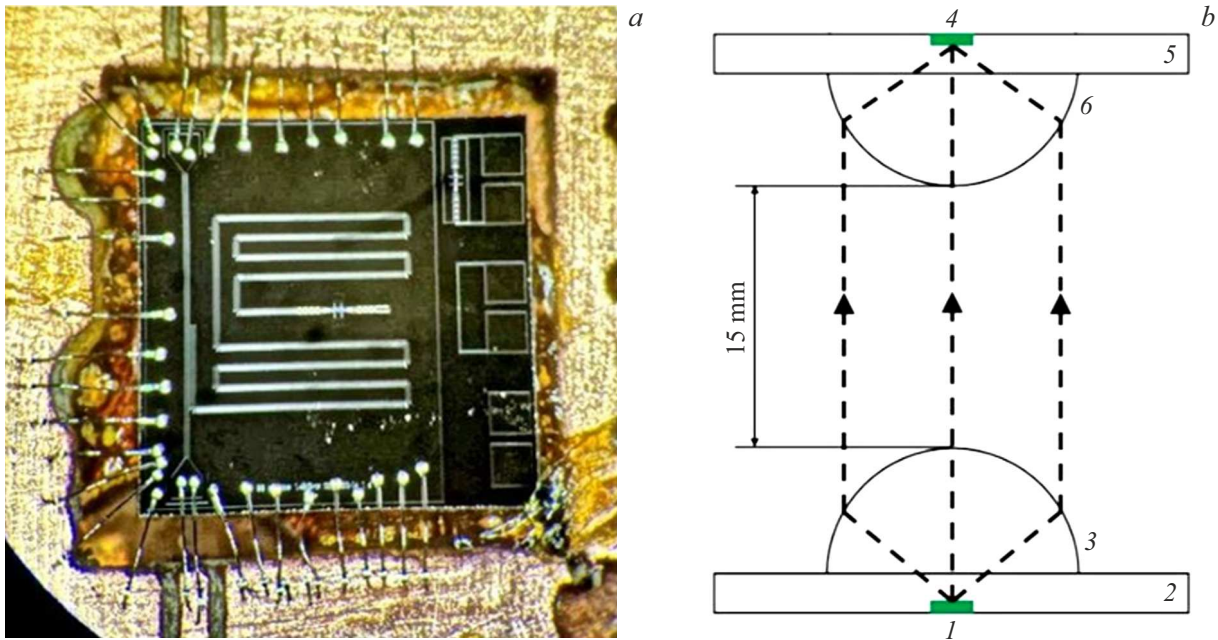


Рис. 1. *a* — фотография чипа микроизлучателя, смонтированного в блок излучателя на плоской поверхности иммерсионной сапфировой линзы. *b* — схема передачи сигнала от микромостика излучателя (1) сквозь подложку чипа (2) и иммерсионную линзу (3) к поглотителю детектора (4) через такую же иммерсионную линзу (6) и подложку чипа детектора (5). Детектор и излучатель имеют независимые цепи смещения СВЧ током и независимый теплоотвод на общую ступень криостата растворения.

высокодобротного (узкополосного) резонатора. В эквивалентной схеме из сосредоточенных элементов мостик-поглотитель подключается параллельно конденсатору резонансного контура через небольшой конденсатор связи, который ограничивает СВЧ ток через мостик и таким образом поддерживает малый уровень диссипаций в резонаторе. Такая конфигурация характерна для включения мостика вблизи открытого конца копланарного резонатора, где токи вдоль центрального проводника малы и обращаются в нуль на открытом конце резонатора, что представлено в работе [1]. При сдвиге точки включения мостика ближе к закороченному концу копланарного резонатора токи через мостик увеличиваются и для заданного сопротивления мостика добротность системы падает. Если мостик находится заведомо в сверхпроводящем состоянии, то он не влияет на добротность резонатора при любом включении. Однако в зависимости от точки включения, ближе или дальше от закороченного конца резонатора, понадобится соответственно меньше или больше мощности несущей, чтобы достигнуть критического тока (или СВЧ разогрева электронной подсистемы) и перевести мостик в резистивное состояние. Заметим, что сдвиг в сторону закороченного конца резонатора эквивалентен снижению импеданса источника тока на подводящих электродах мостика, т. е. мы получаем условие, аналогичное условию стабильной работы классического TES (Transition Edge Sensor) [14]. Это значит, что нам становится легче добиться плавности перехода мостика из сверхпроводящего в нормальное состояние,

настраивая импеданс мостика от пренебрежимо малого импеданса до сопротивления в нормальном состоянии.

3. Детали эксперимента

Экспериментальный излучатель конструктивно и топологически аналогичен RFTES-детектору, за исключением того, что микромостик изготовлен из материала с критической температурой около 6 К (пленка ниобия толщиной около 20 нм), а также смещен ближе к закороченному концу резонатора. Частота резонатора в излучателе намеренно смещена относительно частоты RFTES-детектора для предотвращения паразитного взаимодействия высокодобротных резонаторов через свободное пространство протяженностью около 15 мм. Согласно соотношениям волновой оптики, дифракционное расплывание коллимированного пучка диаметром 6 мм при длине волны 475 мкм на удалении 15 мм составит 6%, т. е. волновой фронт излучателя практически совпадает с волновым фронтом приемной линзы, и ожидаемый коэффициент передачи сигнала составляет 0.94. Этот коэффициент может деградировать из-за неточности установки чипа, излучающей и/или приемной антенн на оптическую ось иммерсионной линзы, что приводит к отклонению оптической оси приема/передачи сигнала и, как следствие, к неполному наложению таких пучков. Расчет показывает, что при ошибке установки антенны на оптическую ось линзы в 10 мкм эффективность перекрытия приемной апертуры и пучка излучения составит 0.96, но если ошибка установки чипа достигнет 100 мкм,

то эффективность снижается до 0.39. Такие геометрические отклонения и соответствующие им коэффициенты следует учитывать для каждой из сторон пучка.

Как показано теоретически в работе [9], концепция микроминиатюрного излучателя позволяет локализовать тепловыделение и минимизировать разогрев чипа. В эксперименте микроустройство из ниобия разогревался СВЧ током резонатора, который возбуждался векторным анализатором цепей (VNA), которым регистрировалась АЧХ (амплитудно-частотная характеристика) пропускания чипа с резонатором (параметр S_{21}). Выходная мощность VNA увеличивалась небольшими шагами до момента регистрации резкого уменьшения добротности измеряемого резонанса вблизи его резонансной частоты (скачок S_{21}). Такое изменение добротности соответствует переходу через критическую температуру мостика 6.2 К и является реперной точкой. Для расчета излученной мощности учитывалось планковское распределение спектральной плотности ЧТ излучения и частотные диапазоны излучающей/принимающей антенн, которые в нашем случае совпадают (550–750 GHz). Таким образом, температура источника может модулироваться путем изменения мощности, несущей на частоте резонатора с центральной частотой около 1.4 GHz, используя, например, балансный смеситель, как описано в работе [2] (в данном эксперименте не применялось). Электронная теплопроводность ниобиевого мостика значительно выше, чем у мостика из гафния в RF TES-детекторе, что означает потенциально более высокое быстродействие источника шума, который может быть использован не только для определения оптической чувствительности детектора, но и для определения его быстродействия.

4. Обсуждение результатов эксперимента

Чипы излучателя и детектора монтировались в одинаковые блоки, изготовленные из бескислородной меди, как описано в работе [1], и устанавливались друг над другом, как показано схематически на рис. 1, на одну ступень в криостат растворения при температуре 60 мК. Блок детектора имел хороший тепловой контакт с криостатом и был одновременно теплоизолирован от излучателя, который имел отдельный сток тепла, выполненный в виде жгута из бескислородной меди, на ту же ступень криостата. Излучатель разогревался СВЧ мощностью в диапазоне от 20 до +9 dBm на выходе векторного анализатора цепей при центральной частоте резонанса около 1.39 GHz. Переход из сверхпроводящего состояния в нормальное для микроизлучателя регистрировался по исчезновению резонансной кривой, что соответствовало мощности несущей, равной +9 dBm, как показано на рис. 2, что с учетом ослабления холодного аттенюатора 20 dB и подводимого кабеля длиной 2 м составляет от 13 до 14 dBm, или 40–50 μ W на входе чипа излучателя.

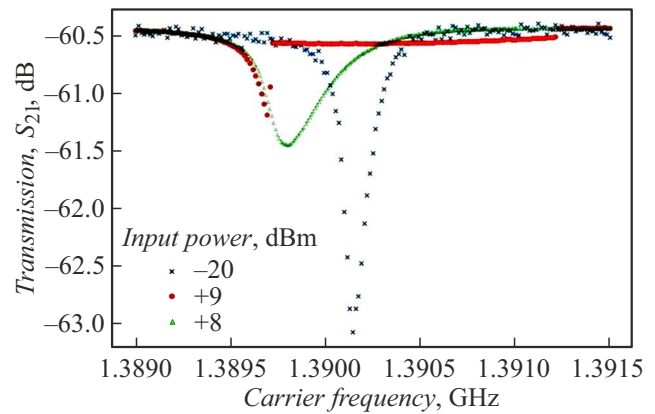


Рис. 2. Резонансные кривые пропускания чипа микроизлучателя при фиксированной температуре 60 мК для трех разных мощностей СВЧ воздействия. Переход резонатора из ниобия в состояние с низкой добротностью наблюдается при изменении мощности, несущей в диапазоне от +8 до +9 dBm (на входе коаксиального кабеля в криостат растворения). Видно, что резонатор проявляет сильный кинетический эффект, что связано с плавным СВЧ разогревом электронной подсистемы и обеднением концентрации сверхпроводящих носителей вблизи критической температуры пленки (около 6.2 К).

Это почти на два порядка меньше, чем для пленочного излучателя из работы [2].

Отклик RF TES-детектора с мостиком на основе гафния измерялся при мощности несущей 46 dBm, которая с учетом кабеля и холодного аттенюатора соответствовала мощности на чипе от 77 до 78 dBm, или 16–20 μ W. Температура 60 мК не является оптимальной для RF TES-детектора; при таких температурах возникает нелинейный эффект, вызванный кинетической индуктивностью и проявляющийся в асимметрии резонансного провала $S_{21}(f)$. При этом отклик детектора имеет не амплитудный, а, главным образом, частотный характер (смещение резонансной частоты). Такой режим был выбран с целью демонстрации совместимости ЧТ излучателя и RF TES-детектора при сверхнизкой температуре. Как упоминалось выше, частота резонатора детектора и частота резонатора излучателя намеренно сделаны разными, 1.455 и 1.39 GHz соответственно, чтобы полностью исключить возможность дистанционного взаимодействия резонаторов за счет связи с излучающими антеннами. Разогрев микроизлучателя до нормального состояния потребовал мощность несущей +9 dBm, и был получен четкий отклик резонатора RF TES-детектора, как показано на рис. 3.

Следует отметить, что длительный разогрев микроустройства выше 6 К на ступени растворения при температуре медного блока излучателя 60 мК мощностью 40–50 μ W (+9 dBm на входе криостата) приводил к постепенному перегреву системы криостатирования, что можно объяснить недостаточной холодильной мощностью нашего криостата (номинально $\sim 100 \mu$ W). Это свидетельствует

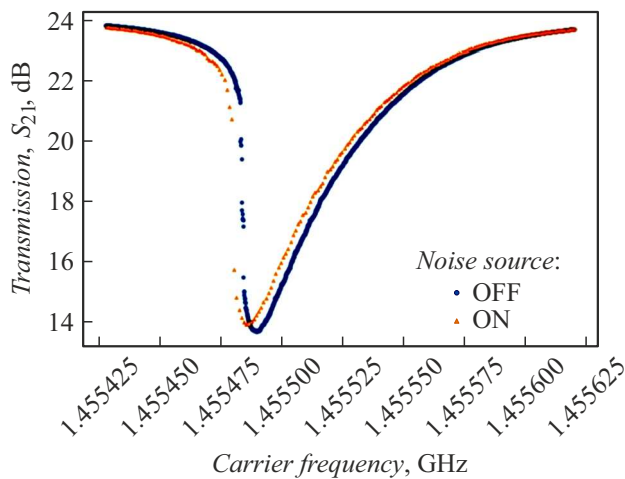


Рис. 3. Отклик RFTES-детектора с мостиком из гафния на разогрев микроизлучателя из ниобия СВЧ мощностью $40\text{--}50\ \mu\text{W}$ на частоте $1.39\ \text{GHz}$ проявляется как сдвиг резонансной частоты за счет увеличения кинетической индуктивности микромостика из гафния под действием терагерцовых фотонов, приходящих от излучателя. Микроизлучатель и детектор установлены на одной ступени криостата растворения при $60\ \text{mK}$, но теплоизолированы друг от друга.

о том, что имеющийся вариант чипа излучателя еще не отвечает оптимальным параметрам, и для использования длительной (не импульсной) модуляции требуется либо несколько большая холодильная мощность, либо оптимизация чипа в плане уменьшения тока разогрева микромостика.

Наблюдаемую перегрузку ступени растворения можно объяснить тем, что теплопроводность мостика из ниобия вблизи T_c на два порядка выше, чем у гафния, и смещение места включения поглотителя на $200\ \mu\text{m}$ к закороченному концу резонатора оказалось недостаточным, чтобы удержать резонатор в сверхпроводящем состоянии при токе разрушения сверхпроводимости в излучающем мостике. Отношение критических температур пленки экспериментального резонатора и поглотителя составляло $T_{c\text{Nb}2}/T_{c\text{Nb}1} \approx 1.5$, что не слишком велико и могло привести к конкуренции критического тока четвертьволнового резонатора в области его закороченного конца с током, необходимым для разогрева мостика. Численные оценки показывают, что в экспериментальной конфигурации чипа разогрев мостика на основе ниобия до температуры $6\ \text{K}$ (без эффекта электронного газа с теплопроводностью $G \approx 10^{-7}\ \text{W/K}$) требует ток около $250\ \mu\text{A}$, т.е. потребленная сила тока имеет тот же порядок, что и критический ток пленки резонатора. Решение этой проблемы может быть найдено на пути уменьшения ширины мостика, а также путем изменения места включения мостика в резонатор, переместив мостик вдоль длины резонатора в сторону закороченного конца.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование воздействия на болометрический RFTES-детектор термодинамическим излучением, передаваемым оптическим путем от пленочного микромостика на основе ниобия, показало, что концепция такого излучателя, в целом, работоспособна. Тепловая мощность излучающего мостика на основе ниобия, разогреваемого током СВЧ резонатора, отводилась на ту же ступень криостата растворения, на которой находился детектор (около $60\ \text{mK}$), и эта мощность оказалась сравнимой с холодильной мощностью криостата. Тем не менее анализ хода температуры показал, что полученный отклик, с высокой вероятностью, не связан с разогревом чипа детектора, т.е. отклик может быть ассоциирован с чернотельным излучением микромостика или всего чипа излучателя. Для дальнейшей оптимизации излучателя следует доработать резонатор, чтобы он сохранял высокую добротность, в том числе при температуре перехода мостика в нормальное состояние. В соответствии с полученными данными можно сделать вывод о необходимости снижения мощности СВЧ, разогревающей излучатель, что возможно за счет коррекции схемы включения микромостика в резонатор, а также за счет уменьшения размеров мостика, применяя, например, субмикронную электронную литографию.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20298, <https://rscf.ru/project/24-29-20298/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

- [1] А.В. Меренков, Т.М. Ким, В.И. Чичков, С.В. Калинин, С.В. Шитов. ФТТ, **64** (10), 1404 (2022). <https://doi.org/10.21883/PSS.2022.10.54223.50HH>
- [2] Т.М. Ким, А.В. Меренков, А.Б. Ермаков, Л.С. Соломатов, В.И. Чичков, С.В. Шитов. ЖТФ, **93** (7), 995 (2023). <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.07.55759.117-23>
- [3] A.V. Uvarov, S.V. Shitov, A.N. Vystavkin. Measur. Techniq., **53** (9), 1047 (2010). DOI:10.1007/s11018-010-9617-4
- [4] 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. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **575** (3), 412 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.02.094>
- [5] 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, F. Columbro, G. D'Alessandro, M. De Petris, S. Gordon, C. Magneville, P. Mauskopf, G. Pettinari, G. Pisano, G. Polenta, G. Presta, E. Tommasi, C. Tucker,

- V. Vdovin, A. Volpe, D. Yvon. *J. Cosmology and Astroparticle Phys.*, 2019 (003), (2019). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/07/003>
- [6] M. Tarasov, A. Gunbina, A. Chekushkin, M. Strelkov, V. Edelman. *Appl. Sci.*, **12** (14), 7349 (2022). <https://doi.org/10.3390/app12147349>
- [7] A.V. Gordeeva, V.O. Zbrozhek, A.L. Pankratov, L.S. Revin, V.A. Shamporov, A.A. Gunbina, L.S. Kuzmin. *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 162603 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4982031>
- [8] L.S. Kuzmin, A.L. Pankratov, A.V. Gordeeva, V.O. Zbrozhek, V.A. Shamporov, L.S. Revin, A.V. Blagodatkin, S. Masi, P. de Bernardis. *Commun. Phys.*, **2**, 104 (2019). <https://doi.org/10.1038/s42005-019-0206-9>
- [9] Т.М. Ким, С.В. Шитов. *Письма в ЖТФ*, **24**, 13 (2021). <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.24.51791.18897>
- [10] С.В. Шитов, Т.М. Ким. *Сверхпроводящий источник термодинамического шума* (Патент РФ на изобретение (RU 2 757 756 C1). Приоритет от 20.04.2021)
- [11] С.В. Шитов, Т.М. Ким. *Сверхпроводящий источник высокочастотного шума* (Патент РФ на изобретение (RU 2 757 858 C1). Приоритет от 21.04.2021)
- [12] E.M. Gershenson, M.E. Gershenson, G.N. Gol'tsman, A.M. Lyul'kin, A.D. Semenov, A.V. Sergeev. *Sov. Phys. JETP*, **70** (3), 505 (1990).
- [13] A.A. Kuzmin, M. Merker, S.H. Wuensch, M. Siegel, A.D. Semenov, S.V. Shitov, A.V. Ustinov. *Appl. Phys. Lett.*, **111** (4), 042601 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4995981>
- [14] J. Clarke, P.L. Richards, N.H. Yeh. *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 6 664 (1977). <https://doi.org/10.1063/1.89278>