

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) $\approx 10^{-17} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 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 $100 \mu\text{W}$). 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 микромостиков ток 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 мК и RF TES-излучатель, показанный на рис. 1, а, разогреваемый до температуры 5–6 К (зависит от материала пленки излучателя), могут быть установлены друг напротив друга, как представлено на рис. 1, б, 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 К [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 $T_{cNb}/2 = 4 - 4.5$ К 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-болометра 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 $T_c > 2$ К. Ориентируясь на данные из работ [12,13], были выбраны пленки Nb толщиной ~ 10 nm, имеющие $T_{cNb1} \approx 6$ К, что ниже критической температуры резонатора, изготовленного из массивной пленки ниобия толщиной около 200 nm ($T_{cNb2} \approx 9$ К). Используя литературные данные [11], теплопроводность мостика размером $2 \times 2 \mu\text{m}$ из ниобия при температуре около 5 К 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 мК (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

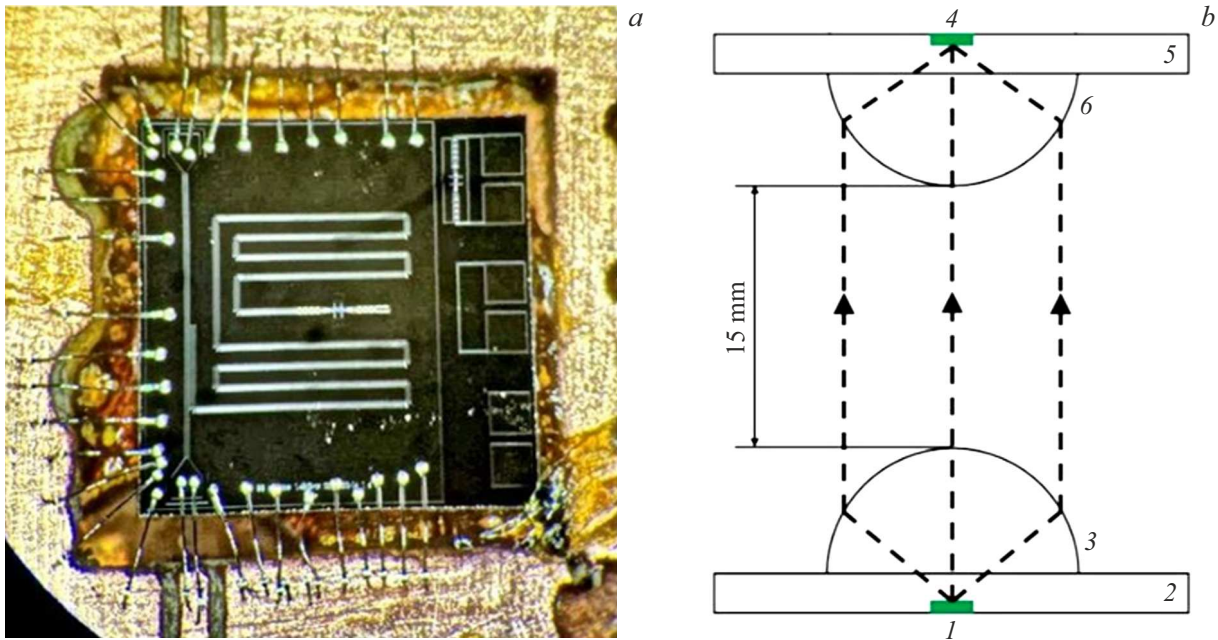


Рис. 1. *a* — фотография чипа микроизлучателя, смонтированного в блок излучателя на плоской поверхности иммерсионной сапфировой линзы. *b* — схема передачи сигнала от микромостика излучателя (1) сквозь подложку чипа (2) и иммерсионную линзу (3) к поглотителю детектора (4) через такую же иммерсионную 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 RF TES-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 RF TES-детектора для предотвращения паразитного взаимодействия высокодобротных резонаторов через свободное пространство протяженностью около 15 мм. Согласно соотношениям волновой оптики, дифракционное распывание 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.

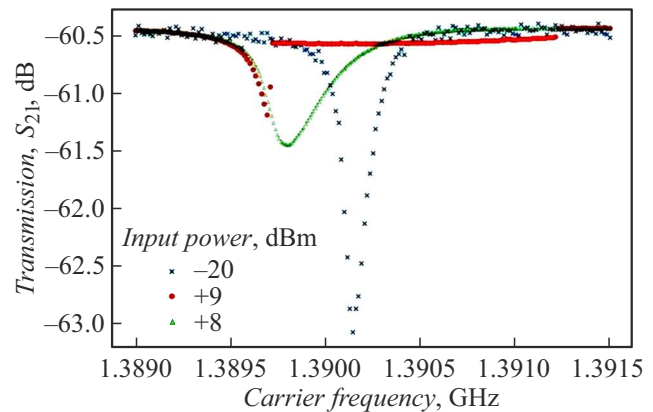


Рис. 2. Резонансные кривые пропускания чипа микроизлучателя при фиксированной температуре 60 мК для трех разных мощностей СВЧ воздействия. Переход резонатора из ниобия в состояние с низкой добротностью наблюдается при изменении мощности, несущей в диапазоне от +8 до +9 dBm (на входе коаксиального кабеля 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

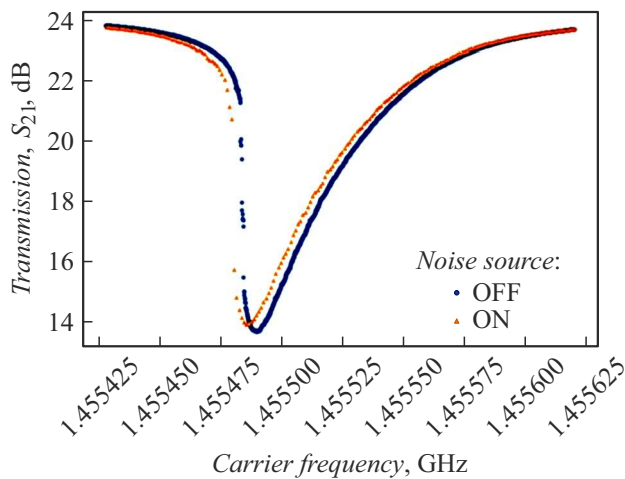


Рис. 3. Отклик RFTES-детектора с мостиком из гафния на разогрев микроизлучателя из ниобия СВЧ мощностью 40–50 μW на частоте 1.39 GHz проявляется как сдвиг резонансной частоты за счет увеличения кинетической индуктивности микромостика из гафния под действием терагерцевых фотонов, приходящих от излучателя. Микроизлучатель и детектор установлены на одной ступени криостата растворения при 60 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 μm 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 K (без эффекта электронного газа с теплопроводностью $G \approx 10^{-7} \text{ W/K}$) требует ток около 250 μA , 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 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.2022.10.54223.50НН>
- [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. Gershenzon, M.E. Gershenzon, 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>