

12

Болометр с высокочастотным считыванием для матричных применений

© С.В. Шитов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
E-mail: sergey@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 18 апреля 2011 г.

Предложен новый метод регистрации болометрического отклика: термочувствительный резистивный датчик с миниатюрной антенной терагерцового диапазона интегрирован в планарный резонатор гигагерцового диапазона, слабо связанный с линией накачки, в которой амплитуда гигагерцового сигнала зависит от сопротивления датчика, меняющегося под действием терагерцового излучения, принимаемого антенной. Метод пригоден для создания матриц с числом элементов более 1000 при использовании метода частотного мультиплексирования; при этом необходим всего один физический канал усиления гигагерцовых частот. Численное моделирование предсказывает, что для наноразмерных детекторов на краю сверхпроводящего перехода при температуре 300 мК и с шумами канала усиления 3 К может быть получена рекордная чувствительность приемника $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

Эффективность матричного болометрического приемника зависит не только от собственной чувствительности самих датчиков, но и от параметров системы считывания. Если первым каскадом системы считывания является усилитель низкой частоты, то возникает ряд проблем, таких как ограниченное быстродействие, влияние промышленных шумов, фликкер-шум и др. Часть проблем матричных радиометров с низкотемпературными болометрами связана с самой возможностью расположить в охлаждаемой зоне необходимое число усилителей. Разработано несколько типов усилителей, полоса которых, однако, не превосходит 1 МГц. Перспективными на сегодня считаются сверхпроводниковые усилители на основе сквидов [1], обладающие сверхмалым энерговыделением, а также охлаждаемые слаботочные усилители на полевых транзисторах, JFET [2]. Сквиды применяют для термометров с импедансом 0.1–1 Ω, например для датчиков на краю сверхпроводящего перехода, TES [3], а JFET усилители — для высокоомных туннельных переходов типа SIS [2] и SIN [4] с импедансом

0.1–1 МΩ. На практике системы с такими усилителями для больших матриц (порядка 10^4 элементов) оказались весьма дорогостоящими, так как число мультиплексируемых каналов на один усилитель не превосходит 100. Охлаждаемые полупроводниковые усилители СВЧ, шумовая температура которых составляет 3–4 К в диапазоне частот около 3–10 GHz [5], нашли свое применение в сверхпроводниковых сенсорах на кинетической индуктивности, MKID [6–8]. Такие сенсоры регистрируют распаривание сверхпроводящих носителей под действием фотонов терагерцового излучения, что выражается в появлении сдвига по частоте и фазе тока накачки в сверхпроводниковом резонаторе. Для MKID сенсоров показано, что можно осуществить частотное мультиплексирование с шагом 1 MHz и создать матрицы с числом элементов порядка 10^4 на один усилитель. Заметим, что полное поглощение терагерцового сигнала в кинетическом детекторе затруднено в силу реактивного характера его импеданса [9,10]. Данная работа посвящена обоснованию новой концепции считывания, которая органически синтезирует в себе две перспективные и уже активно конкурирующие технологии: MKID и TES. Приложение полученных в работе результатов к новейшей технологии интегрированных TES [11,12] позволит повысить эффективность мультиплексирования примерно в 100 раз, а также принципиально улучшить помехозащищенность таких наноболометров.

За основу новой концепции принята схема, показанная на рис. 1. Приемная матрица содержит набор высокочастотных резонаторов с терморезисторами, а отклик считывается с помощью усилителя СВЧ в виде вариаций сигнала накачки, как показано на рис. 2. Генератор дискретного спектра, $f_n \approx f_0 + n\Delta f$, $n = 0, 1, 2 \dots N$, накачивает резонаторы и обеспечивает подогрев терморезисторов до рабочего состояния. Добротность каждого из резонаторов зависит от сопротивления интегрированного в него терморезистора. Слабый сигнал терагерцовой частоты (10^2 – 10^4 GHz) от встроенной в резонатор антенны дает дополнительный разогрев и приводит к увеличению сопротивления терморезистора номер n ; информация о таком разогреве появится в измерительном канале на частоте f_n . Система регистрации может быть построена аналогично MKID сенсорам [6–10]. Отличие от MKID состоит в том, что резистивный поглотитель может быть полностью согласован с антенной и сдвига частоты резонатора практически не происходит. В качестве терморезистора может выступать датчик на краю сверхпроводящего перехода, TES. Такой датчик представляет собой пленку сверхпроводника, которая находится при температу-

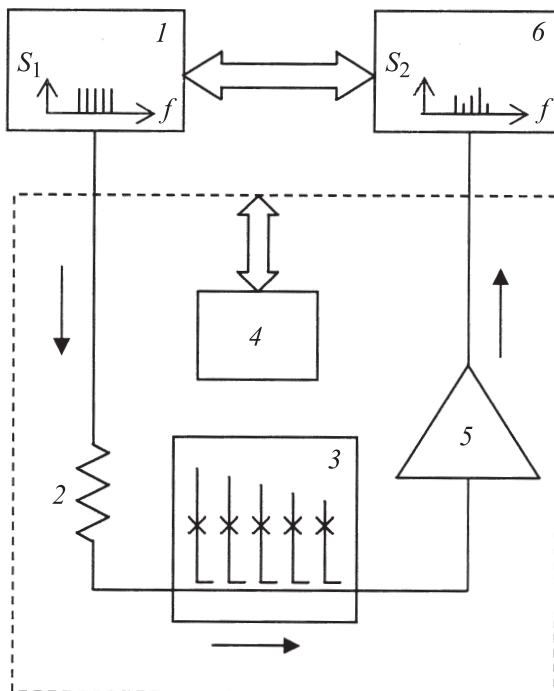


Рис. 1. Концептуальная схема матричного детектора на терморезисторах с высокочастотным считыванием. От опорного генератора гребенчатого спектра $S_1(f)$ 1 через аттенюатор 2 (40–50 dB) подается сигнал на матрицу 3, содержащую, в данном примере, пять резонаторов. Крестиками изображены детекторы-терморезисторы, управляющие добротностью резонаторов. Охлаждаемый объем рефрижератора 4 показан пунктиром. После усилителя 5 регистратор 6 сравнивает амплитуду и фазу прошедшего сигнала $S_2(f)$ на индивидуальных частотах резонаторов с исходным сигналом опорного генератора $S_1(f)$ и по заданному алгоритму вычисляет тепловую мощность сигнала, принятую индивидуальными детекторами. В системе нет проводных соединений кроме двух коаксиальных кабелей.

ре термодинамического перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние: она является чувствительным термометром. Наилучшую чувствительность обеспечивает метод прямого разогрева TES током

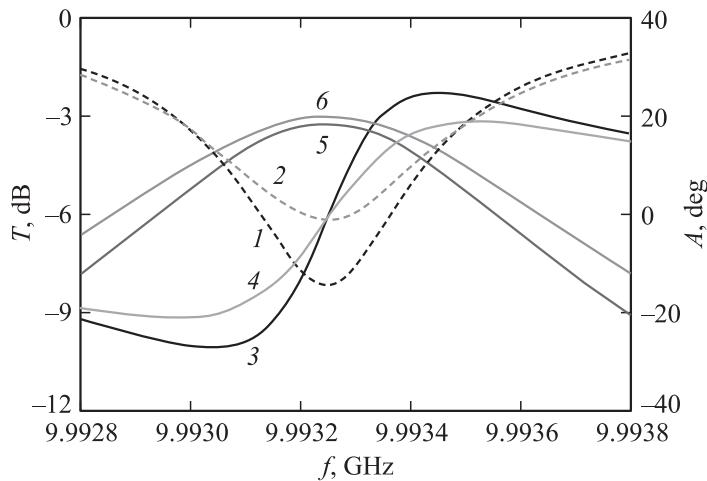


Рис. 2. Пример вариаций амплитуды (вертикальная ось T слева, кривые 1 и 2) и фазы (вертикальная ось A справа, кривые 3 и 4) сигнала на входе усилителя 5 с рис. 1 за счет изменения сопротивления терморезистора в диапазоне 2–3 Ω . Вариации накачки терморезистора представлены кривыми 5 и 6 (вертикальная ось T слева).

антенны без применения апертурного поглотителя [11,12]. Для изготовления наноразмерных TES болометров, интегрированных с антенной, применяют технологию тонких пленок. Копланарные резонаторы из сверхпроводящих пленок Nb, изготовленные на диэлектрической подложке, могут иметь компактные размеры, высокую воспроизводимость и добротность 10^5 (и выше). Известны конструктивные решения антенн с выводом сигнала по планарным линиям передачи; они могут быть применены, как показано на рис. 3. В силу того, что размеры терагерцовой антенны малы по сравнению с размером волны на частоте резонатора (около 10 GHz и ниже), она практически не излучает и не ухудшает добротность резонатора.

Была разработана практическая планарная структура с терагерцовой антенной. Использовалась монокристаллическая подложка из нелегированного кремния ($\epsilon = 11.7$; $\text{tg}(\delta) = 10^{-5}$), на которой помещались копланарный волновод накачки ($Z_0 = 50 \Omega$) и четвертьволновой резонатор ($Z_0 = 71 \Omega$), настроенный на частоту 10 GHz. Геометрия области связи

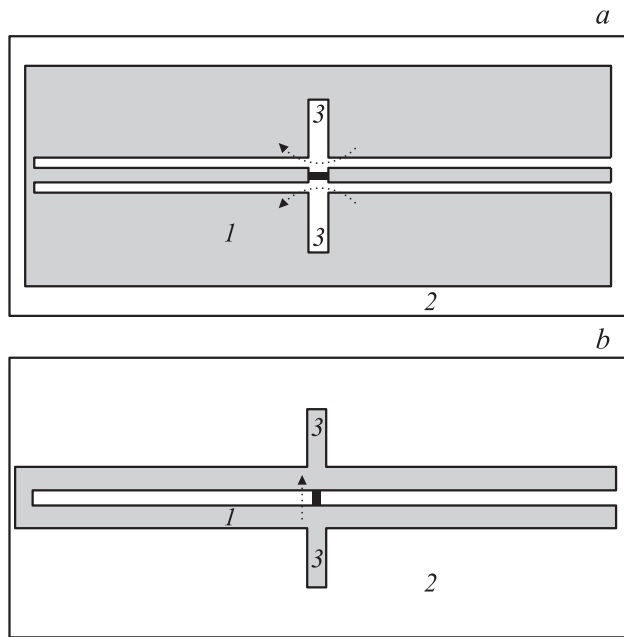


Рис. 3. Варианты связи планарных антенн терагерцового диапазона с терморезистором, встроенным в четвертьволновой резонатор (не в масштабе): *a* — копланарный резонатор со щелевой антенной, *b* — щелевой резонатор с дипольной антенной. Терморезистор показан черным прямоугольником. Стрелками показаны токи в терморезисторе, возбуждаемые антенной и резонатором. Цифрами обозначены: 1 — металлизация, 2 — диэлектрическая подложка, 3 — щелевая антенна (*a*) и дипольная антенна (*b*). Инжекция накачки возможна с любого конца резонатора.

линии накачки и резонатора была подобрана так, чтобы полоса ненагруженного резонатора составила 0.5 МГц. Сопротивление терморезистора и его вариации были заданы как $R = 5 \pm 0.5 \Omega$, и он был установлен в точку с импедансом резонатора $Z_R = 5 \Omega$. В таком согласованном режиме малое приращение сопротивления терморезистора приводит к уменьшению добротности резонатора и к вытеснению мощности на частоте возбуждения резонатора, аналогично представленному на

рис. 2, при этом уровень накачки терморезистора остается неизменным. Заметим, что управление матрицей не предполагает наличия каких-либо дополнительных проводов, а терморезисторы надежно изолированы от влияния низкочастотных помех за счет фильтрующих свойств резонатора и терагерцовой антенны. Другие детали электромагнитной структуры, включая конструкцию терагерцовой антенны, анализ и оптимизацию параметров, планируются к публикации после проведения экспериментального исследования. Чувствительность таких болометров может быть измерена по методике [13].

Задав геометрические параметры поглотителя, $1\mu\text{m} \times 200\text{nm} \times 20\text{nm}$, и предположив наличие андреевских зеркал [14] в области контактов сверхпроводникового резонатора с пленкой поглотителя, используем уравнение теплового баланса для мощности P_J , получаемой от тока накачки [11,15]:

$$P_J = \nu \Sigma (T_e^5 - T_{ph}^5). \quad (1)$$

Здесь ν — объем поглотителя, $\Sigma = 3 \cdot 10^{-9} \text{ W}/(\mu\text{m}^3 \text{K}^5)$ — параметр титана, $T_{ph} = 280 \text{ mK}$ — температура фононов, равная физической температуре нашего рефрижератора, T_e — температура электронного газа, разогретого током. Приращение температуры электронного газа, соответствующее вариации $R = 4.5 - 5.5 \Omega$, можно получить из экспериментальной зависимости $R(T)$ при переходе пленки от ее нормального сопротивления R_N в сверхпроводящее состояние. Аппроксимируем $R(T)$ модельной кривой (2); экспериментальные данные [15] позволяют положить $R_N = 50 \Omega$, $T_C = 300 \text{ mK}$ и ширину перехода $\Delta T_C = 2 \text{ mK}$:

$$R(T) = R_N \left[\exp \left(-\frac{4(T - T_C)}{\Delta T_C} \right) + 1 \right]^{-1}. \quad (2)$$

Решая уравнение (2), получим две температуры $T_{e1} = 298.843 \text{ mK}$ и $T_{e2} = 298.955 \text{ mK}$, а из уравнения теплового баланса (1) — мощность эквивалентного терагерцового сигнала $P_{SIG} = P_J(T_{e2}) - P_J(T_{e1}) = 0.053 \cdot 10^{-15} \text{ W}$ и мощность накачки, необходимую для разогрева электронного газа до рабочей температуры T_{e1} , $P_J = 7.95 \cdot 10^{-15} \text{ W}$. Определим мощность в линии накачки, с учетом P_J и коэффициента передачи к поглотителю, $C_{BIAS} = 11.4 \text{ dB}$: $P_{BIAS} = P_J / C_{BIAS} = 1.09 \cdot 10^{-13} \text{ W}$. Отклик в линии накачки составляет 1.3%, или $\Delta P_{BIAS} = 1.42 \cdot 10^{-15} \text{ W}$. Дифференцируя соотношение напряжения

и мощности в согласованной линии $Z_0 = 50 \Omega$, получим амплитуду модуляции накачки:

$$\Delta U_{BIAS} = \frac{\Delta P_{BIAS} Z_0}{2\sqrt{P_{BIAS} Z_0}}. \quad (3)$$

Используя (3), получим крутизну преобразования $S = \Delta U_{BIAS}/P_{SIG} = 2.85 \cdot 10^8 \text{ V/W}$. Примем для усилителя значение $T_N = 3 \text{ K}$ и, в силу низкой физической температуры TES, будем считать эти шумы доминирующими. Вычислив мощность шума усилителя в полосе 1 Hz, получим $U = 4.6 \cdot 10^{-11} \text{ V/Hz}^{1/2}$ и $NEP = U/S = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$. Данная оценка предсказывает рекордный результат и определенно заслуживает экспериментальной проверки.

Список литературы

- [1] Yoon J., Clarke J., Gildemeister J.M. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 371–373.
- [2] Ariyoshi S., Otani C., Dobroiu A. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2006. V. 45. P. L1004–L1006. DOI: 10.1143/JJAP.45.L1004.
- [3] Yamasaki N.Y., Masui K., Mitsuda K. et al. // Nucl. Instruments and Methods in Physics Research. 2006. V. 559-2. P. 790–792. DOI: 10.1016/j.nima.2005.12.141.
- [4] Agulo I.J., Kuzmin L. // Supercond. Sci. Technol. 2008. V. 21. N 1. P. 015001. DOI: 10.1088/0953-2048/21/01/015001.
- [5] Wade Falk N., Mellberg A., Angelov I. et al. // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 2003. V. 51. N 6. P. 1705–1711. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812570.
- [6] Day P., LeDuc H., Mazin B. et al. // Nature. 2003. V. 425. P. 817–820.
- [7] Baselmans J.J.A., Yates S.J.C., De Korte P. et al. // J. Adv. Space Res. 2007. V. 40. N 5. P. 708–713. DOI: 10.1016/j.asr.2007.06.041.
- [8] Barends R., Baselmans J.J.A., Hovenier J.N. et al. // IEEE Trans. Appl. Sup. 2007. V. 17. N 2. P. 263–266.
- [9] Mazin B., Day P.K., Irwin K.D. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2005. V. A 559-2. P. 799–801.
- [10] Mazin B.A., Bumble B., Day P.K. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. N 89. P. 222 507.
- [11] Karasik B.S., Dalaet B., McGrath W.R. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13. P. 188.
- [12] Shitov S.V., Vystavkin A.N. // Instr. Meth. Phys. Res. 2006. V. A559. P. 503–505.
- [13] Уваров А.В., Шитов С.В., Выставкин А.Н. // Метрология. 2010. № 9. С. 3–14.
- [14] Andreev A.F. // Sov. Phys. ZhETP. 1964. T. 46(5). P. 1823–1828.
- [15] Выставкин А.Н., Коваленко А.Г., Шитов С.В. и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 6. С. 757–763.