

05.4;09;12

©1994

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ АНТЕННОГО ВТСП МИКРОБОЛОМЕТРА

В.В.Богачев, В.Н.Леонов, И.А.Хребтов

Анализ, проведенный в работах [1,2], показал перспективность использования антенных микроболометров для регистрации излучения субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов спектра. Первые антенные микроболометры на основе пленок Bi работали при комнатной температуре [3]. В последнее время при использовании высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) параметры таких детекторов существенно улучшены и достигнута эквивалентная мощность шума $NEP = 1.6 \cdot 10^{-11} - 4.5 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} при постоянной времени $\tau = 0.3 - 30$ мкс соответственно [4-6].

Характеристики неохлаждаемых микроболометров хорошо описываются моделью радиального теплоотвода в подложку [3]. При глубоком охлаждении наблюдаются некоторые особенности теплопередачи в твердых телах. В частности, теплопроводность материалов сложным образом зависит от температуры. Кроме того, между пленочным болометром и подложкой возникает тепловое граничное сопротивление, учет влияния которого на характеристики детектора необходим [7]. При азотных температурах тепловое граничное сопротивление для ВТСП пленок имеет неожиданно большую величину [8]. В связи с этим для более точного расчета параметров криогенных антенных микроболометров необходимо провести некоторую корректировку расчетной модели, что и является целью данной работы.

Рассматривая тепловую модель ВТСП микроболометра (рис. 1), в первую очередь следует отметить возможные механизмы отвода тепла: радиальный теплоотвод в подложку [9], теплоотвод по ВТСП пленке в "холодную" антенну и, наконец, теплоотвод по подложке в антенну. Будем характеризовать эти каналы отвода тепла расчетными коэффициентами тепловых потерь G_r , G_{ba} и G_{sa} соответственно. Каналы, описываемые при помощи G_r и G_{ba} , рассмотрены в работе [3]. Необходимость учета коэффициента G_{sa} возникла в процессе экспериментов по определению коэффициента тепловых потерь YBaCuO микроболометров, изготовленных на подложках $\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ [10], когда оказалось, что измеренный коэффициент G_{exp} более чем в 2 раза превыша-

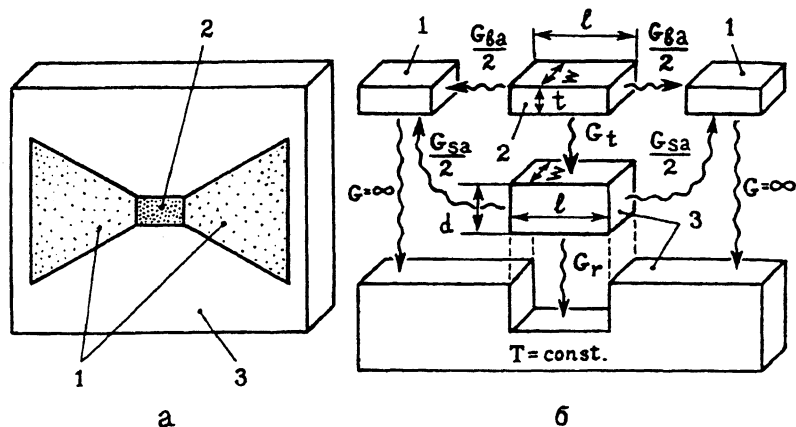


Рис. 1. Схема микроболметра с бантовой антенной (а) и схема тепловых связей в нем (б).

1 — антенна, 2 — микроболметр, 3 — подложка. При расчете G_{ba} и G_{sa} полагали, что тепловая связь между антенной и подложкой идеальна ($G = \infty$).

ет G_r . Методики и измерения G_{exp} , использованные нами, рассмотрены, к примеру, в работах [4,11].

В таблице приведены расчетные и экспериментальные коэффициенты тепловых потерь шести микроболметров длиной l и шириной w , изготовленных посредством фотолитографии и лазерного скрайбирования из YBaCuO пленки толщиной $t = 150$ нм. Расчет коэффициентов G_r и G_{ba} проводили, исходя из выражений [3]

$$G_r = (2\pi l w k_s)^{1/2}, \quad (1)$$

$$G_{ba} = 12k_b t w / l, \quad (2)$$

где k_b и k_s — теплопроводность материалов макроболметра и подложки соответственно (в расчетах полагали $k_s = 0.015$ Вт/см·К, $k_b = 0.05$ Вт/см·К).

Для учета теплового граничного сопротивления R_t использовали коэффициент $G_t = lw/R_t$, полагая $R_t = 10^{-3}$ см²·К/Вт с учетом данных, приведенных в работе [8], и собственных измерений R_t . Коэффициент G_1 (см. таблицу) учитывает G_r , G_{ba} и G_t следующим образом:

$$G_1 = (G_r^{-1} + G_t^{-1})^{-1} + G_{ba}. \quad (3)$$

№ образца	$l \times w$, мм ²	G_r , мкВт/К	G_{ba} , мкВт/К	G_t , мкВт/К	G_1 , мкВт/К	G_{exp} , мкВт/К	G_{sa} , мкВт/К	G_2 , мкВт/К
1	22 × 3	30.6	1.2	660	30.4	50	8.0	37.4
2	15 × 3	25.2	1.8	450	25.7	60	9.6	33.8
3	10 × 10	37.6	9.0	1000	45.2	120	71.8	105.8
4	10 × 3	20.6	2.7	300	22.0	60	11.8	31.4
5	10 × 7	31.5	6.3	700	30.1	86	42.1	71.6
6	10 × 7	31.5	6.3	700	30.1	75	42.1	71.6

Следует отметить, что G_r и G_1 при конкретных размерах микроболометров (см. таблицу) и указанной выше величине R_t достаточно близки между собой и в то же время существенно отличаются от G_{exp} .

Для определения G_{sa} сделаем некоторые допущения. Во-первых предположим, что тепло распространяется по подложке в антенну, имеющую неизменную температуру, в некоторой "тепловой трубе" длиной l , шириной w и глубиной $d(\omega)$, где ω — угловая частота (рис. 1). Кроме того, будем считать, что $d(\omega)$ равна длине тепловой диффузии $L(\omega)$ в подложке на достаточно высоких частотах теплового сигнала, когда $L(\omega) \ll (lw)^{1/2}$. На низких же частотах будем следовать модели радиального теплоотвода, в которой $G_r(0)$ соответствует тепловой проводимости вдоль параллелепипеда с площадью wl и длиной $d(0) = (wl/2\pi)^{1/2}$. Поскольку коэффициент G_{sa} связан с теплоотводом не в подложку, а в антенну, направление распространения тепла по этому параллелепипеду отличается от радиальной модели: теперь длина параллелепипеда становится равной l , а его площадь — $wd(0) = (w^3l/2\pi)^{1/2}$ (рис. 1). Исходя из этих допущений,

$$G_{sa} = 12k_s(w^3/2\pi l)^{1/2}. \quad (4)$$

Наконец, с учетом G_{sa} можно рассчитать коэффициент G_2 :

$$G_2 = \left[(G_r + G_{sa})^{-1} + G_t^{-1} \right]^{-1} + G_{ba}. \quad (5)$$

Результаты расчетов по формулам (4) и (5) также приведены в таблице. Интересно отметить, что G_{sa} (в зависимости от конкретной конфигурации микроболометра) может даже превышать G_r . Сравнивая G_r , G_1 и G_2 с G_{exp} , можно отметить, что наименьшее расхождение расчета с экспериментом наблюдается при использовании предлагаемой модели, в которой учитывается G_{sa} .

Второй аспект рассматриваемой проблемы связан с частотной зависимостью вольт-ваттной чувствительности ВТСП микроболометра. На высоких частотах модуляции ω эта зависимость, как было показано ранее в [10], приобретает вид ω^{-1} (такая же тенденция прослеживается и в частотной зависимости, приведенной в работе [4]). Влияние теплоемкости микроболометра, которое приводит к аналогичной зависимости, должно проявляться на гораздо более высоких частотах. Радиальная же модель дает зависимость $\omega^{-1/2}$, противоречащую эксперименту.

В модели теплоотвода по подложке в антенну будем полагать, что температурный профиль по длине микроболоме-

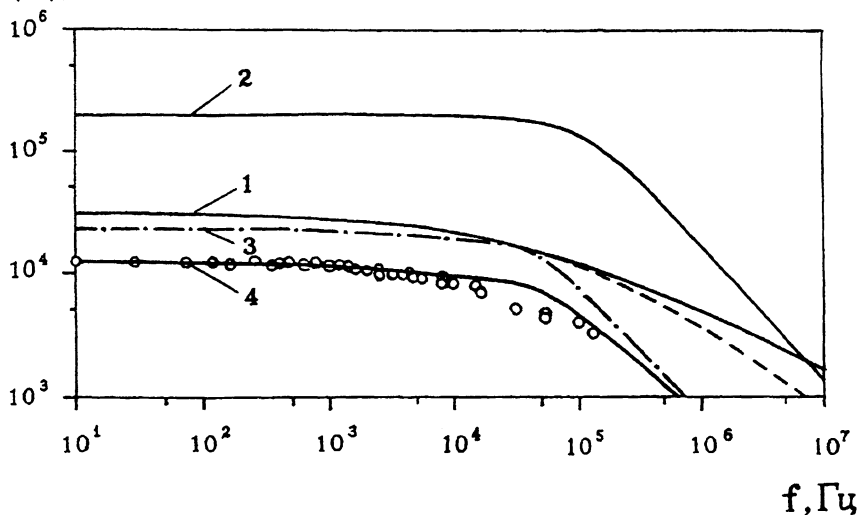
$|Z|, \text{К/Вт}$ 

Рис. 2. Частотная зависимость модуля теплового импеданса, рассчитанная и измеренная (линии и точки соответственно) для YBaCuO микроболометра размером $10 \times 7 \text{ мкм}$ на подложке $\text{ZrO}_2\text{:Y}_2\text{O}_3$.

Каналы теплоотвода: 1 — радиальный теплоотвод в подложку (пунктиром отмечено влияние теплоемкости микроболометра), 2 — теплоотвод по ВТСП пленке в антенну, 3 — теплоотвод по подложке в антенну, 4 — тепловой импеданс с учетом всех каналов теплоотвода, полагая $R_t = 10^{-3} \text{ см}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

тра аналогичен профилю, полученному при решении уравнения тепловой диффузии применительно к микроболометру в виде свободного мостика [3]. Тогда с учетом полученного выше выражения для G_r (и сделанных выше допущений) тепловой импеданс $Z_{sa}(\omega)$ в модели канала теплоотвода по подложке в антенну можно представить в виде

$$Z_{sa}(\omega) = \left\{ 12k_s(\omega^3/2\pi l)^{1/2} - k_s \omega l^2 L^{-2}(\omega) \text{th}^{-1}[l/2L(\omega)]/2 \right\}^{-1}, \quad (6)$$

где ω — угловая частота, $L(\omega) = (k_s/i\omega c_s)^{1/2}$, c_s — удельная объемная теплоемкость материала подложки. Очень важно, что на высоких частотах появляется зависимость ω^{-1} , позволяющая объяснить экспериментальную частотную зависимость чувствительности микроболометра.

На рис. 2 приведены расчетные частотные зависимости $|Z(\omega)|$, полученные по различным моделям, а также зависимость, рассчитанная с учетом всех каналов теплоотвода. Там же нанесены экспериментальные точки, полученные из измеренной частотной зависимости вольт-ваттной чувствительности $S(\omega)$, ход которой повторяет ход $|Z(\omega)|$. Измере-

ние $S(\omega)$ проводили с использованием амплитудной модуляции излучения с длиной волны 4 мм. Затем, измерив ток I и производную сопротивления по температуре dR/dT , рассчитывали $|Z(\omega)|$ по формуле $|Z(\omega)| = S(\omega)/(IdR/dT)$. Можно отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений $Z(\omega \rightarrow 0) = G_{\text{exp}}^{-1}$ и близкую к расчетной частотную зависимость $|Z(\omega)|$.

Проведенные исследования показали, что рассмотренная модель теплоотвода работает в подложках с низкой теплопроводностью — таких, как $ZrO_2:Y_2O_3$. В подложках с высокой теплопроводностью (сапфир, MgO и т.п.), приближающейся по величине к теплопроводности антенны (Ag, Au), не выполняется принятое нами приближение идеальной в тепловом отношении антенны, т.е. ее температуру уже нельзя считать постоянной и необходимо скорректировать модель с учетом распространения тепловой волны в антенне.

Список литературы

- [1] Schwarz S.E., Ulrich B.T. // J. Appl. Phys. 1977. V. 48. N 5. P. 1870–1873.
- [2] Schwarz S.E. // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1984. V. 5. N 12. P. 1517–1525.
- [3] Neikirk D.P., Lam W.W., Rutledge D.B. // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1984. V. 5. N 3. P. 245–278.
- [4] Nahum M. et al. // IEEE Trans. on Mag. 1991. V. 27. N 2. P. 3081–3084.
- [5] Леонов В.Н., Хребтов И.А. // ПТЭ. 1993. В. 4. С. 11–38.
- [6] Khrebtov I.A., Leonov V.N., Klimov A.Yu. // VI trilateral German-Russian-Ukrainian Seminar on HTS, Dubna, Sept. 14–18, 1993. Dig.: Dubna, JINR. P.112.
- [7] Хребтов И.А. // ОМП. 1982. В. 8. С. 1–4.
- [8] Marshall C.D. et al. // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 2. P.850–857.
- [9] Hu Q., Richards P.L. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 55. N 23. P. 2444–2446.
- [10] Климов А.Ю., Леонов В.Н., Павельев Д.Г., Хребтов И.А. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 5. С. 38–41.
- [11] Климов А.Ю., Леонов В.Н., Хребтов И.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 2. С. 69–74.

Государственный оптический
институт им. С.И.Вавилова
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
16 января 1994 г.