

05.4;09;12

©1994

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ШУМ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АНТЕННОГО YBaCuO МИКРОБОЛОМЕТРА НА САПФИРОВОЙ ПОДЛОЖКЕ

*В.Н.Леонов, И.А.Хребтов*

Неохлаждаемые антенные микроболометры, предназначенные для приема излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн, имеют лучшее быстродействие по сравнению с обычными болометрами, обладающими той же эквивалентной мощностью шума (NEP). Это достигается за счет разделения функций приема (антенна) и преобразования (микроболометр) сигнала. Тепловые свойства такого приемника излучения определяются только свойствами подложки, в которой распространяется тепловая волна, генерируемая микроболометром (рис. 1). Поэтому и характеристики приемника зависят целиком от тепловых свойств подложки [1,2].

При охлаждении до температур жидкого гелия тепловые свойства микроболометров существенно меняются [1]. Вследствие резкого возрастания теплового сопротивления  $R_b$  на границе микроболометр-подложка, в тепловых процессах основную роль играет теплоемкость микроболометра  $C$  и его тепловая связь с подложкой, определяемая  $R_b$ . Таким образом, при низких температурах параметры микроболометров почти не зависят от тепловых свойств подложки.

С появлением высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) антенные микроболометры стали разрабатывать и для азотного уровня охлаждения [3-5], где, исходя из теории акустического рассогласования [6],  $R_b$  мало. Действительно, в этой области температур тепловые свойства подложек  $ZrO_2:Y_2O_3$ , на которых изготавливали микроболометры, полностью определяли характеристики приемников.

Тем не менее, тепловое граничное сопротивление, измеренное на некоторых подложках при азотных температурах, оказалось в  $\sim(10-100)$  раз выше ожидаемого [7]. В связи с этим, появилась возможность создания микроболометра, в котором за счет  $R_b$  можно исключить влияние подложки на свойства приемника. Это позволяет резко уменьшить постоянную времени приемника без увели-

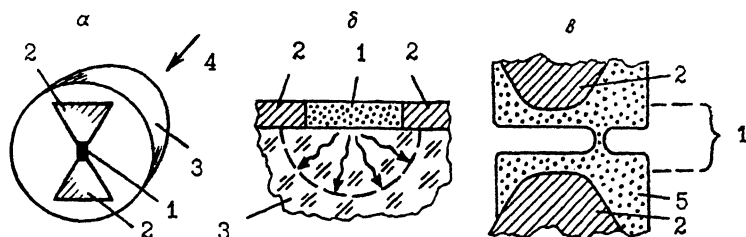


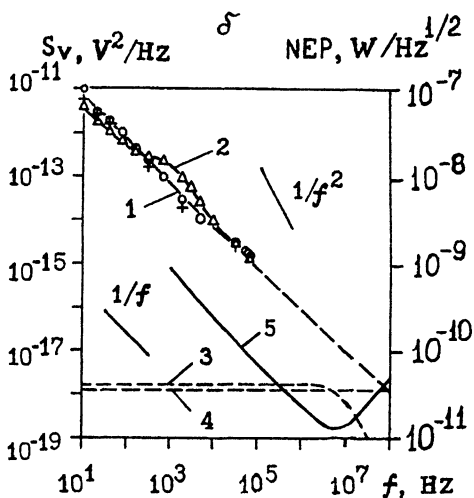
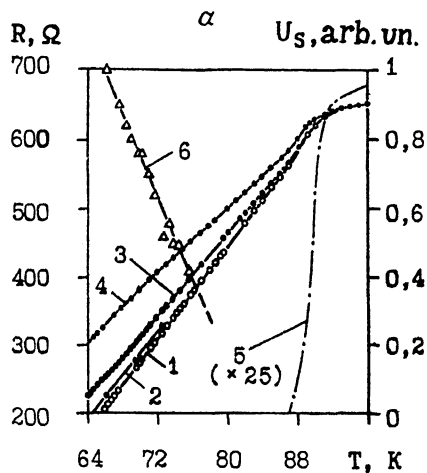
Рис. 1. Схема антенного микроболметра.

*a* — конструкция, *б* — схема радиального теплоотвода в подложку, *в* — геометрия исследованного YBaCuO микроболметра с размерами сужения  $\sim (1.5 \times 5)$  мкм. 1 — микроболметр, 2 — антенна, 3 — гиперполусферическая линза (подложка), 4 — направление подачи излучения, 5 — пленка YBaCuO.

чения его NER. Расчеты показывают, что для эффективного участка  $R_b \approx 10^{-3} \text{ см}^2 \text{ K/Вт}$  в механизме теплообмена YBaCuO пленки площадью  $\sim 10 \text{ мкм}^2$  с подложкой последняя должна иметь очень высокую теплопроводность  $\kappa$ . Этому критерию соответствуют сапфир ( $\kappa = 6.4 \text{ Вт/смК}$ ) и MgO ( $\kappa = 3.4 \text{ Вт/смК}$ ), кристаллографические параметры которых обеспечивают рост высококачественных эпитаксиальных YBaCuO пленок.

Мы использовали подложку из сапфира (1012) толщиной 0.5 мм, на которую была нанесена пленка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  толщиной 0.1 мкм. Поверх YBaCuO пленки формировали пленочную бантовую антенну (рис. 1) из Ag толщиной 0.3 мкм. Зазор между ее плечами составлял 13 мкм. В этом зазоре при помощи лазерного скрайбирования формировали микроболметр, имеющий сужение шириной (в среднем)  $\sim 1.5$  и длиной  $\sim 5$  мкм (рис. 1, в). Переменная ширина микроболметра заранее предполагает его неизотермический режим работы [8], когда при большом измерительном токе происходит неравномерный джоулев нагрев зон разной ширины. Однако указанная неидеальность геометрии не мешает продемонстрировать эффект от использования теплового граничного сопротивления.

YBaCuO пленка имела сопротивление на квадрат  $R_s \sim 130 \text{ Ом}$  при 300 K, однако ее скрайбирование и сужение до 1.5 мкм привело к существенной деградации ее транспортных и сверхпроводящих свойств (рис. 2, а). Процесс деградации активно шел и после изготовления микроболметра около недели.  $R_s$  выросло в  $\sim 5$  раз, однако следует полагать, что в самой узкой части микроболметра оно увеличилось еще больше.



**Рис. 2.** Характеристики  $\text{YBaCuO}$  микроболметра на сапфировой подложке.

*a* — сверхпроводящий переход: 1–4 — микроболметра при токе 0.1 (1), 0.2 (2), 0.4 мА (4) и (5) —  $\text{YBaCuO}$  пленки до изготовления микроболметра ( $\times 25$ ). 6 — температурная зависимость отклика на тепловой сигнал с  $f = 25$  Гц при токе 1 мА. По оси абсцисс отложена температура подложки. *б*: 1, 2 — спектры шума при токе 1 мА и сопротивлении: 1 — 500 (кружки) и 400 Ом (треугольнички), 2 — 318 Ом. Пунктиром фликкер-шум экстраполирован в область высоких частот, а также отмечены фоновый (3) и джонсоновский (4) шумы. 5 — расчетная частотная зависимость  $\text{NEP}_e$ .

На рис. 2, а приведен сверхпроводящий переход микроболометра при четырех измерительных токах  $I$ . При  $I = 0.1$  мА тепловые эффекты еще не проявляются. При увеличении  $I$  микроболометр перегревается током на температуру  $\Delta T$  относительно подложки и переход сдвигается. В нижней части сверхпроводящего перехода, когда широкие зоны микроболометра находятся в сверхпроводящем состоянии, сдвиг перехода связан с самой узкой, наиболее деградировавшей, зоной микроболометра площадью  $\sim 1.5 \times 5$  мкм. Сдвиг температуры равен  $\Delta T = \Delta P/G$ , где  $\Delta P$  — изменение мощности, рассеиваемой в микроболометре при двух различных токах, а  $G$  — коэффициент тепловых потерь. Исходя из измеренных  $\Delta T$  при сопротивлении  $R = 310$  Ом получен  $G = (3.5 \pm 1.4) \cdot 10^{-5}$  Вт/К. Эта величина коррелирует с расчетной величиной  $G = 3.8 \cdot 10^{-5}$  Вт/К, полученной с учетом тепловой диффузии в подложку и в предположении, что  $R_b = 2 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup> К/Вт при  $T = 72$  К [9].

На рис. 2, а приведена также зависимость отклика  $U_s$  микроболометра на переменный тепловой сигнал на частоте  $f = 25$  Гц, получаемый при облучении всей подложки от лазера на длине волны 0.63 мкм. Тепловой сигнал был довольно слабый, поэтому зависимость  $U_s$  от  $T$  измерена только при  $T < 76$  К. Видно, что болометрический отклик резко увеличивается при уменьшении  $R$  при неизменности  $dR/dT$ . Это также подтверждает, что при уменьшении  $R$  работает все более узкая зона микроболометра,  $G$  уменьшается и, соответственно,  $U_s$  растет.

На рис. 2, б приведены спектры шума микроболометра в диапазоне 10 Гц–70 кГц, измеренные в трех точках перехода. При температурах, соответствующих  $R = 400$ –500 Ом (и выше, до  $T = 300$  К), спектры близки к виду  $1/f$ . При  $R = 318$  Ом спектр искажается, в средней своей части приближаясь к Лоренциану. Это можно объяснить, зная, что с уменьшением  $R$  уменьшается зона, находящаяся в нормальном или смешанном состоянии. Наконец, в таком состоянии остается самая узкая зона с малым числом элементарных флуктуаторов. Фликкер-шум нормального состояния формируется большим числом флуктуаторов [10] и при значительном уменьшении их числа должен искажаться, что, по-видимому, и наблюдалось (рис. 2, б). Следует отметить, что ранее из этой же пленки был изготовлен микроболометр площадью  $\sim 140$  мкм<sup>2</sup> и измерены его шумы. Тогда же для этой пленки был получен шумовой коэффициент Хоуге [11]  $\alpha = 0.24$  при  $T = 89$  К в предположении, что концентрация носителей  $n = 2 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, исходя из коэффициента Холла для  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  [12]. Микроболометр, описанный выше, подвергся деградации электрических свойств, но, тем

не менее, его шумовые свойства изменились несущественно, т. к. для него  $\alpha = 0.36$  при  $T = 80$  К даже в предположении, что  $x$  не увеличился и  $n$  осталась неизменной. В связи с этим можно предположить, что источники фликкер-шума YBaCuO пленки слабо связаны с удельным сопротивлением,  $T_c$  и  $\Delta T_c$ . Однако для подтверждения или опровержения этого предположения требуются дополнительные исследования на многих образцах.

Для оценки NEP определим чувствительность и быстродействие образца. Вольт-ваттная чувствительность  $r_0$  определяется по формуле

$$r_0 = G^{-1} IdR/dT. \quad (1)$$

При  $I = 1$  мА и  $dR/dT = 14$  Ом/К в эксперименте получена  $r_0 \approx 400$  В/Вт.

Быстродействие микроболометра описывается постоянной времени  $\tau = C/G$  [1], а его свойства на высоких частотах модуляции — выражением  $r(f) = r_0/(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}$ . Для микроболометра объемом  $1.5 \times 5 \times 0.1$  мкм расчетная постоянная времени  $\tau = 19$  нс, т. е. спад сигнала до уровня  $0.707r_0$  должен происходить на частоте 8.4 МГц.

NEP без учета потерь, связанных с антенной (т. е. электрическую NEP) можно записать в виде

$$NEP_e(f) = \left[ 4k_B T^2 G + 4k_B T R/r^2(f) + S_v(f)/r^2(f) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $S_v(f)$  — спектральная плотность мощности фликкер-шума. Результаты расчетов по формуле (2) приведены на рис. 2, б. Минимальная величина  $NEP_e = 1.4 \cdot 10^{-11}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> получается вблизи  $f = 8-10$  МГц. Эта величина определяется фликкер-шумом, т. е. в данном образце не удалось выйти на уровень фоновго шума, как в работах [4,5,8]. В то же время указанная  $NEP_e$  довольно близка к результату, полученному для микроболометров, в которых  $R_b$  не играет заметной роли в процессе их теплообмена с подложкой [4,5]. Однако для рассматриваемого образца рабочая частота модуляции может быть в  $\sim 10^3$  раз больше. Поэтому по произведению  $NEP_e \cdot \tau^{1/2}$  разработанный микроболометр в  $\sim 10$  раз лучше.

При использовании малошумящих пленок с  $S_v(10 \text{ Гц}) = 10^{-15}$  В<sup>2</sup>/Гц в микроболометре указанных размеров при  $R_b = 2 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>К/Вт и  $T = 90$  К можно будет получать  $NEP_e = 4 \cdot 10^{-12}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> в диапазоне частот модуляции  $10^3-10^7$  Гц.

Таким образом, в работе показано, что наблюдаемое тепловое граничное сопротивление позволяет на подложке из сапфира создавать ВТСП микроболометры, которые по совокупности параметров ( $NEP$  и  $\tau$ ) превосходят микроболометры, в которых роль  $R_b$  незначительна.

Авторы выражают благодарность В.Ф.Врацких за изготовление  $YBaCuO$  пленки и С.Ф.Карманенко за напыление  $Ag$  антенны.

Работа выполнена в рамках российской программы "Высокотемпературная сверхпроводимость", проект 93-217, а также поддержана Международным научным фондом, грант R3J000.

### Список литературы

- [1] *Леонов В.Н., Хребтов И.А.* // ПТЭ. 1993. В. 4. С. 11-38.
- [2] *Neikirk D.P., Lam W.W., Rutledge D.B.* // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 1984. V. 5. N 3. P. 245-278.
- [3] *Климов А.Ю., Леонов В.Н., Хребтов И.А.* // Сб. "Тепловые приемники излучения". Л., 1990. С. 22-23.
- [4] *Nahum M., Hu Q., Richards P.L.* // IEEE trans. 1991. V. Mag. 27. N 2. P. 3081-3084.
- [5] *Климов А.Ю., Леонов В.Н., Павельев Д.Г., Хребтов И.А.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 5. С. 38-41.
- [6] *Little W.A.* // Can. J. Phys. 1959. V. 37. N 3. P. 334-349.
- [7] *Marshall C.D., Tokmakoff A., Fishman I.M. et al.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 73. N 2. P. 850-857.
- [8] *Климов А.Ю., Леонов В.Н., Хребтов И.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 2. С. 69-74.
- [9] *Богачев В.В., Леонов В.Н., Хребтов И.А.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 10. С. 89-94.
- [10] *Коган Ш.М.* // УФН. 1985. Т. 145. В. 2. С. 285-328.
- [11] *Hooge F.N.* // Phys. Lett. A. 1969. V. 29. N 3. P. 139-140.
- [12] *Владимирская Е.В., Гасумянц В.Э.* // ФТТ. 1994. Т. 36. В. 4. С. 1002-1012.

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

Поступило в Редакцию  
21 сентября 1994 г.