

05.4; 12

© 1993

АНТЕННЫЙ $YBaCuO$ МИКРОБОЛОМЕТР
НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ ГАЛЛАТА НЕОДИМА

А.Ю. К л и м о в, В.Н. Л е о н о в, И.А. Х р е б т о в

Недавно сообщалось об антенных $YBaCuO$ микроболометрах на подложках $ZrO_2 : Y_2O_3$, предназначенных для субмиллиметрового диапазона спектра [1, 2]. В таких приемниках излучения пленочная антенна принимает излучение, а чувствительный $YBaCuO$ элемент, подключенный к ней в качестве нагрузки, преобразует мощность высокочастотных токов, генерируемых антенной, в низкочастотный электрический сигнал. Главный лепесток диаграммы направленности антенны направлен в подложку, в связи с чем излучение необходимо подавать на приемник со стороны подложки [3]. Однако использованные в [1, 2] подложки ($ZrO_2 : Y_2O_3$) имели значительный коэффициент поглощения, поэтому для практической реализации достигнутых параметров подложку необходимо выполнять в виде тонкой мембраны, либо изготавливать микроболометр на прозрачных для субмиллиметрового излучения подложках (окись магния, сапфир, кремний, алюминат лантана, галлат неодима и др.).

Мы использовали подложки $NdGaO_3$ [4] толщиной 0.5 мм, на которых импульсным лазерным напылением формировали пленку $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ толщиной ~ 0.1 мкм, а поверх нее — пленку золота толщиной ~ 0.3 мкм магнетронным напылением. Затем при помощи фотолитографии последовательно формировали бантовую антенну и микроболометр.

Бантовая антенна представляет собой два золотых равносторонних треугольника со стороной 0.25 мм, соединенных вершинами. В зазоре между их вершинами расположен $YBaCuO$ микроболометр. Микроболометры имели ширину ~ 3.5 мкм, длину 14 мкм, $T_C \approx 90$ К, сопротивление в нормальном состоянии $R_N \approx 90$ Ом и $dR/dT = 100$ Ом/К в середине сверхпроводящего перехода при токе 0.18 мА (рис. 1, вставка).

В эксперименте измеряли температурные зависимости R , напряжения шума $S_V^{1/2}$ и вольт-ваттной чувствительности r , спектры шума в частотном диапазоне $10-10^6$ Гц, коэффициент тепловых потерь G и постоянную времени τ микроболометра. Измерение чувствительности и постоянной времени проводили в антенном режиме приема излучения с частотой 75.6 ГГц с использованием амплитудной модуляции (меандр) на частоте $f = 1$ кГц.

Из вставки на рис. 1, где приведены экспериментальные температурные зависимости R , r и dR/dT , видно, что максимум

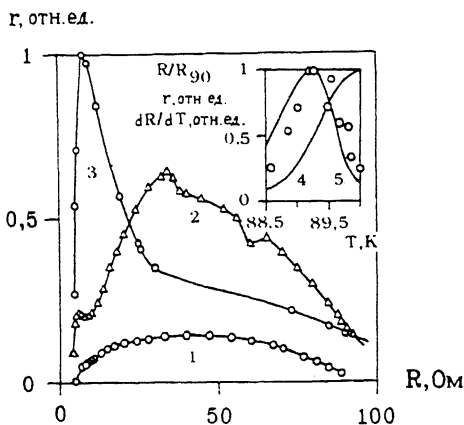


Рис. 1. Зависимость сигнала на частоте 1 кГц от сопротивления микроболометра при разных токах: 1 - 0.18 мА, 2 - 2.1 мА, 3 - 3.4 мА. На вставке приведены температурные зависимости при токе 0.18 мА: 4 - R , 5 - r , точками отмечена величина dR/dT (разброс точек обусловлен погрешностью измерений).

чувствительности совпадает с серединой перехода и максимумом dR/dT . Это доказывает болометрический характер отклика. При увеличении тока максимум r сдвигался в сторону меньших сопротивлений, оставаясь болометрическим. Мы связываем такой сдвиг максимума чувствительности с переходом микроболометра в неизотермический режим работы как и в случае микромостиков [5], когда из-за перегрева током центральный участок $YBaCuO$ пленки находится в нормальном, а края - в сверхпроводящем или промежуточном состоянии. В этом случае чувствительность напрямую не связана с dR/dT , а зависит сложным образом от тока и соотношения размеров нормальной и сверхпроводящей областей.

Оценку коэффициента теплопотерь G проводили по стандартной методике из сдвига кривых перехода вследствие нагрева микроболометра постоянным током, учитывая, что:

$$G = \Delta P / \Delta T, \quad (1)$$

где ΔP - изменение выделяющейся в микроболометре мощности при двух разных токах, ΔT - температурный сдвиг перехода относительно температуры подложки. Из измерений на двух идентичных по размерам микроболометрах $G \approx 6.7 \cdot 10^{-4}$ Вт/К.

В изотермическом режиме, характерном при малых токах, вольт-ваттную чувствительность на низких частотах модуляции определяли с учетом измеренного коэффициента G по формуле:

$$r(\theta) \approx I \cdot G^{-1} \cdot dR/dT, \quad (2)$$

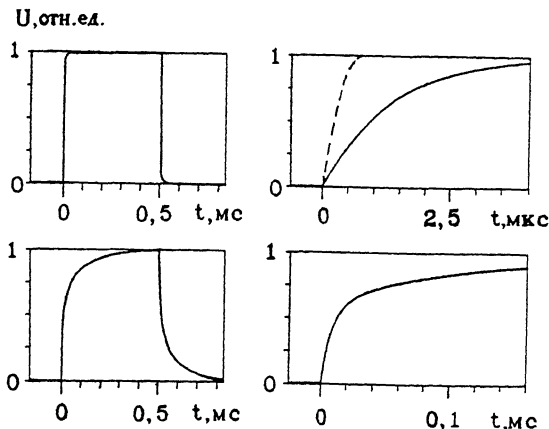


Рис. 2. Осциллограммы реакции микроболметров \mathcal{U} на прямоугольный импульс излучения: слева – полный импульс, справа – развертка фронта. Верхние осциллограммы соответствуют микроболметру на подложке из галлата неодима, нижние – микроболметру на подложке $ZrO_2 : Y_2O_3$, о котором сообщалось в работе [2]. Для сравнения пунктиром отмечена реакция СВЧ-диода Д407.

где I – ток. Для больших токов (неизотермический режим) чувствительность в максимуме определяли с учетом зависимостей r от тока и сопротивления (рис. 1). Так, при $I=3.4$ мА получили $r(0) \approx 170$ В/Вт, что в ~ 3 раза меньше, чем для микроболметров на подложках $ZrO_2 : Y_2O_3$ [1, 2].

Постоянную времени определяли из переходной характеристики, подавая на приемник прямоугольные импульсы излучения мм-диапазона на частоте 1 кГц. Длительность фронтов не превышала 0.2 мкс. Осциллограммы импульсов сигнала микроболметра приведены на рис. 2. Там же показаны аналогичные осциллограммы для микроболметра на подложке $ZrO_2 : Y_2O_3$ [2] и СВЧ-диода Д407. Используемый с микроболметрами широкополосный предусилитель с полосой пропускания (по уровню 0.7) 0.8 МГц не влиял на наблюдаемую длительность фронтов, что было проверено при использовании предусилителя с полосой пропускания 15 МГц.

Из переходной характеристики постоянная времени составляет $\tau = 1.0 \cdot 10^{-6}$ с, что соответствует спаду сигнала до уровня 0.7 на частоте $f = 1.6 \cdot 10^5$ Гц, т. е. постоянная времени меньше в ~ 26 раз, чем у микроболметров на подложке $ZrO_2 : Y_2O_3$.

На рис. 3 приведена частотная зависимость шума микроболметра в рабочей точке (т. е. в максимуме чувствительности). Видно, что на частотах ниже ~ 10 кГц наблюдается фликкер-шум, а на более высоких частотах, примерно до 200 кГц, шум не зависит от частоты, плавно уменьшаясь на более высоких частотах. Температурная зависимость фликкер-шума на частотах менее 10 кГц

$S_V^{1/2}$, отн. ед.
 Γ , отн. ед.

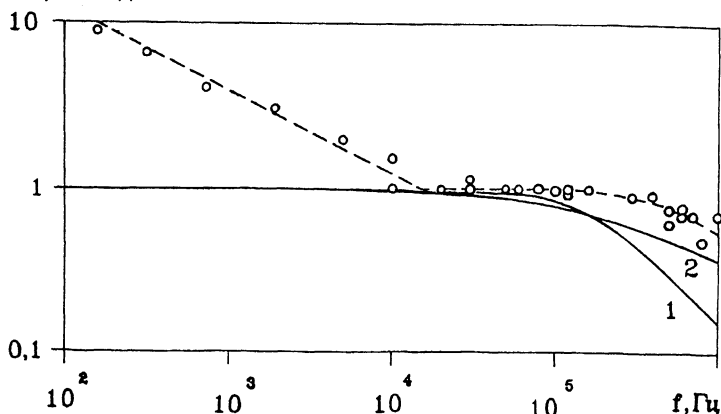


Рис. 3. Спектр шума $S_V^{1/2}$ (пунктир) и расчетные частотные зависимости чувствительности микроболметра: 1 – по тепловой модели с сосредоточенными параметрами, 2 – по модели радиального теплоотвода. Выше 10 кГц экспериментальные точки на каждой частоте получены при токах 2.1 мА, 3.4 мА и 4.3 мА, ниже 10 кГц – при токе 2.1 мА.

в области сверхпроводящего перехода подобна наблюдаемой ранее, т. е. на верхней части перехода шум изменяется пропорционально R , а на „хвосте“ перехода остается избыточный шум, связываемый с движением вихрей по пленке [6, 7]. Пик температурного фликкер-шума, наблюдаемый авторами работ [6, 7] в максимуме dR/dT , в исследованных образцах отсутствовал. В нормальном состоянии фликкер-шум возрастал в несколько раз и простирался до десятков или сотен кГц.

На частотах выше ~ 20 кГц зависимости шума и чувствительности от тока и сопротивления вблизи максимума чувствительности были близкими. Такому поведению шума на высоких частотах отвечает фоновая составляющая мощности шума, обусловленная теплоотводом от микроболметра [8], т. е.

$$\Phi_G^2 = 4kT^2G, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана. Φ_G преобразовывается в напряжение шума пропорционально $r(f)$:

$$S_V^{1/2}(f) = (4kT^2G)^{1/2} \cdot r(f). \quad (4)$$

Бследствие уменьшения чувствительности на частотах выше 100 кГц, этот шум должен падать с частотой пропорционально r .

На рис. 3 приведены частотные зависимости r , построенные на основе измеренной τ и отвечающие двум моделям теплоотвода от микроболометра. Модель, использующая теплоемкость пленки и граничное тепловое сопротивление между чувствительным элементом и подложкой, описываемая частотным членом $(1+4\pi^2 f^2 \tau^2)^{-1/2}$, приводит на высоких частотах к зависимости $r \sim f^{-1}$, тогда как модель радиального теплоотвода дает более слабую зависимость от частоты: $r \sim f^{-1/2}$ [9]. Как видно из рис. 3, экспериментальная зависимость шума от частоты на высоких частотах ближе к частотной зависимости чувствительности, описываемой моделью радиального теплоотвода.

Расчет по формуле (4), с учетом измеренных G и r , дает величину напряжения шума на частоте 200 кГц при токе 3.4 мА, равную $S_V^{1/2} = 2.0$ нВ/Гц^{1/2}, что совпадает с экспериментом. Таким образом, величина и характер частотной зависимости шума указывает на то, что шумовые параметры микроболометра в области высоких частот, на которых и предполагается его использование, определяются фоновым шумом. Величина этого шума превышает шум предусилителя, что позволяет реализовать пороговую чувствительность микроболометра на уровне собственных шумов.

На частотах модуляции 0.02–1 МГц пороговый поток разработанного приемника составляет $\Phi_n \approx 1.7 \cdot 10^{-11}$ Вт/Гц^{1/2} при постоянной времени $\tau = 1.0 \cdot 10^{-6}$ с. УВаСиО микроболометры на подложках $ZrO_2:Y_2O_3$, о которых сообщалось в работах [1, 2], имели $\Phi_n = (4, 5 \dots 6) \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} при $\tau \approx 2.6 \cdot 10^{-5}$ с. Используя для сравнения произведение $\Phi_n \cdot \tau^{1/2}$, получаем, что по этому параметру описываемый микроболометр в ~ 1.4 раза лучше. При уменьшении размеров микроболометра до 2×2 мкм² и соответствующих ему изменении G и τ [9] можно достигнуть $\Phi_n \approx 9 \times 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} при $\tau \approx 10^{-7}$ с.

Работа выполнена в рамках проекта № 90–170 программы „Высокотемпературная сверхпроводимость“.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] N a h u m M., H u Q., R i c h a r d s P.L. et al. // IEEE trans. on Magnetics. 1991. V. 27. N 2. P. 3081–3084.
- [2] К л и м о в А.Ю., Л е о н о в В.Н., П а в е л ь е в Д.Г., Х р е б т о в И.А. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. № 5. С. 38–41.
- [3] N e i k i r k D.P., T o n g P.P., R u t l e d g e D.B. et al. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41. N 4. P. 329–331.

- [4] K o r e n G., G u p t a A., G i e s s E.A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 11. P.1054-1056.
- [5] S c o s r o l W.J., B e a s l e y M.R., T i n k h a m M. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 9. P. 4054-4066.
- [6] Л е о н о в В.Н., Х р е б т о в И.А. // СФХТ. 1991. Т. 4. № 7. С. 1371-1376.
- [7] А к и н ь ш и н Д.В., А с т а п о в А.А., З а й ц е в Л.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. № 2. С. 9-14.
- [8] Т к а ч е н к о А.Д., Х р е б т о в И.А. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 1. С. 182-191.
- [9] Х р е б т о в И.А. // СФХТ. 1992. Т. 5. № 3. С. 555-563.

Поступило в Редакцию
29 декабря 1992 г.