

05.4

Шумовые и структурные свойства высокотемпературных сверхпроводниковых пленок и расчетное моделирование характеристик боллометров на их основе

© Д.А. Хохлов, И.А. Хребтов, С.В. Барышев,
А.В. Бобыль, А.А. Иванов, Д.А. Николаев

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, С.-Петербург
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

E-mail: lolapalooza@mail.ru

Московский инженерно-физический институт

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 8 ноября 2006 г.

Проведены структурные, электрофизические и шумовые исследования эпитаксиальных ВТСП-пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, выращенных с помощью импульсного лазерного и магнетронного напыления на диэлектрических подложках CeO_2/Al_2O_3 , $LaAlO_3$. Используя экспериментально полученные параметры: напряжение шума V_n ; сопротивление R_b и температуру T_b в рабочей точке и др. — рассчитаны основные характеристики боллометров на основе этих пленок для абсолютной радиометрии синхротронного излучения в диапазоне 150–3000 eV. В частности, оценка прогнозируемой величины эквивалентной мощности шума $NEP_{\Sigma} = 8 \cdot 10^{-11} - 1.3 \cdot 10^{-10} \text{ W/Hz}^{0.5}$ демонстрируют возможность использования таких пленок для создания высокоточного абсолютного радиометра, способного регистрировать сигналы мягкого рентгеновского синхротронного излучения в широком диапазоне частот мощностью около $1 \mu\text{W}$ с точностью измерения не хуже 1%.

PACS: 74.72.Bk, 85.25.Am, 85.25.Oj

Разработка эталонного приемника для метрологии синхротронного излучения (СИ) является одной из актуальных современных проблем метрологии [1]. Создание абсолютного СИ-радиометра на основе пленочного высокотемпературного сверхпроводникового (ВТСП) боллометра с электрическим замещением, работающего при температуре

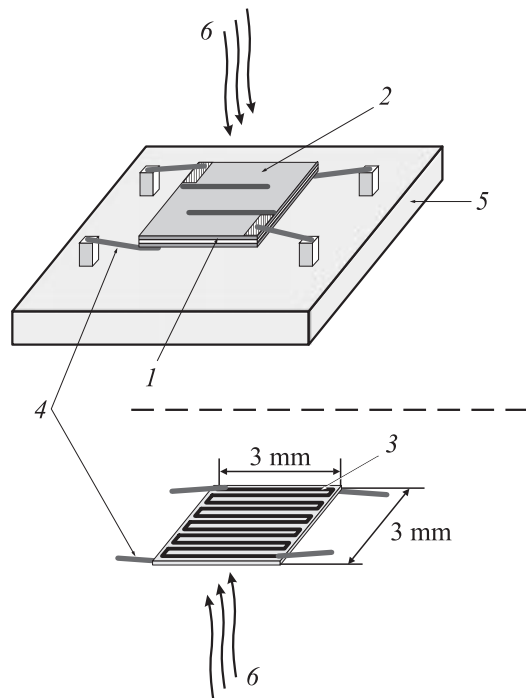


Рис. 1. Устройство чувствительного элемента YBCO-болометра с электрическим замещением для СИ-радиометра.

жидкого азота, — один из основных вариантов ее решения. При этом радиометр должен обладать высокочувствительным приемником, способным регистрировать излучение мощностью около $1 \mu\text{W}$, с точностью измерения не хуже 1% в спектральном диапазоне от 150 до 3000 eV. Схематично чувствительный элемент радиометра — ВТСП-болومتر с электрическим замещением представляет собой подложку из сапфира (или алюмината лантана Al_2O_3) толщиной $50 \mu\text{m}$ 1, на лицевую сторону которой напылен NiCr — пленочный нагреватель 2, а на обратную — ВТСП-термометр ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ пленка в виде меандра 3) (рис. 1). Для достижения высокой чувствительности необходимо использовать такую конструкцию, когда чувствительный элемент подвешен на тонких

металлических проволоках из Au или W 4 к массивному Cu — основанию 5, контактирующему с дном азотного криостата. Измерения основываются на сравнении эффекта нагрева болометра поглощенным излучением 6 в сапфировой подложке с эффектом изменения электрической мощности NiCr нагревателя, связанного системой обратной связи с термометром [2].

В настоящей работе приведены результаты ряда экспериментов для эпитаксиальных пленок YBCO, проведенных для оптимизации технологии роста и последующего изготовления наиболее подходящего термометра составного болометра для абсолютной радиометрии. Так же были проведены модельные расчеты основных характеристик болометра с использованием экспериментально полученных параметров этих YBCO-пленок.

В работе использовались эпитаксиальные пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, выращенные при помощи двух различных технологий роста на разных диэлектрических подложках, Al_2O_3 с буферными слоями CeO_2 (образцы № 533 и 538) и LaAlO_3 (образец № 412-1).

Технология импульсного лазерного напыления эпитаксиальных пленок имеет следующую схему. Исходный материал керамической мишени $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ стехиометрического состава распылялся в окислительной среде N_2O давлением 0.4 mm Hg сфокусированным излучением эксимерного лазера KrF и осаждался на нагретую до 730°C подложку Al_2O_3 (1-102) с буферными слоями CeO_2 (001), обеспечивающую эпитаксиальный рост пленки из осажденного слоя. Длина волны лазерного излучения составляла 248 nm, мощность 80 mJ/pulse, длительность импульсов 15 ns, частота следования импульсов 5–20 Hz.

Пленки на подложках LaAlO_3 выращивались путем магнетронного распыления мишеней стехиометрического состава (1 : 2 : 3) в смеси газов Ar/O при давлении 40 Pa и температуре подложки 750°C [3].

Для изучения структурных свойств YBCO-пленок использовались методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноструктурного анализа [4]. Последний метод дает наиболее полную информацию о структурных параметрах ВТСП-образцов, их влиянии на шумовые характеристики и степени эпитаксиальных пленок. В табл. 1 приведены основные структурные параметры для образцов № 538 и 533, где размер оси *c* элементарной ячейки YBCO и область когерентного рассеяния (средний размер микрокристаллита в поликристаллической матрице пленки) отвечают за структурное совершенство ВТСП пленок;

Таблица 1. Структурные данные для образцов № 538 и 533

Номер образца	538	533
Параметр элементарной ячейки — c	11.693 Å	11.700 Å
Область когерентного рассеяния	257 nm	218 nm
Величина флуктуации внутренних напряжений $\langle \varepsilon \rangle$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{-3}$
Разориентация осей c подложки и пленки	0.03°	0.015°

$\langle \varepsilon \rangle = \sqrt{\left\{ \left(\frac{c-c_0}{c} \right)^2 \right\}}$ — среднее квадратичное отклонение параметра c от его номинального значения c_0 (11.66 Å) в объемном монокристалле YBCO. Незначительная разориентация осей c подложки и пленки свидетельствует о высокой степени эпитаксиальности выращенных пленок.

Применение РЭМ, в свою очередь, позволило изучить морфологию поверхности образцов и с достаточно высокой точностью оценить их толщины.

Так же были проведены сравнительные экспериментальные исследования электрофизических и шумовых характеристик образцов (рис. 2, *a*, табл. 2). Для всех образцов в области сверхпроводящего перехода наблюдался избыточный фликкер-шум типа $1/f^a$ в диапазоне частот

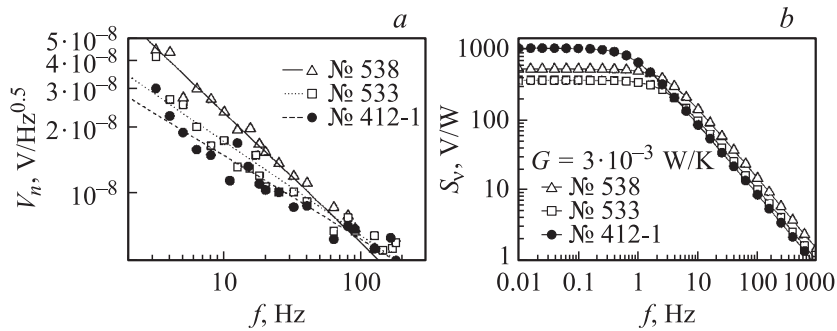


Рис. 2. *a* — зависимости напряжения шума V_n от частоты для различных образцов ВТСП-пленок. На графике так же проведена линейная аппроксимация зависимостей $V_n(f)$; *b* — рассчитанные зависимости вольт-ваттной чувствительности от рабочей частоты модуляции потока излучения для болометров на основе образцов № 538, 533, 412-1 при $G = 3 \cdot 10^{-3}$ W/K.

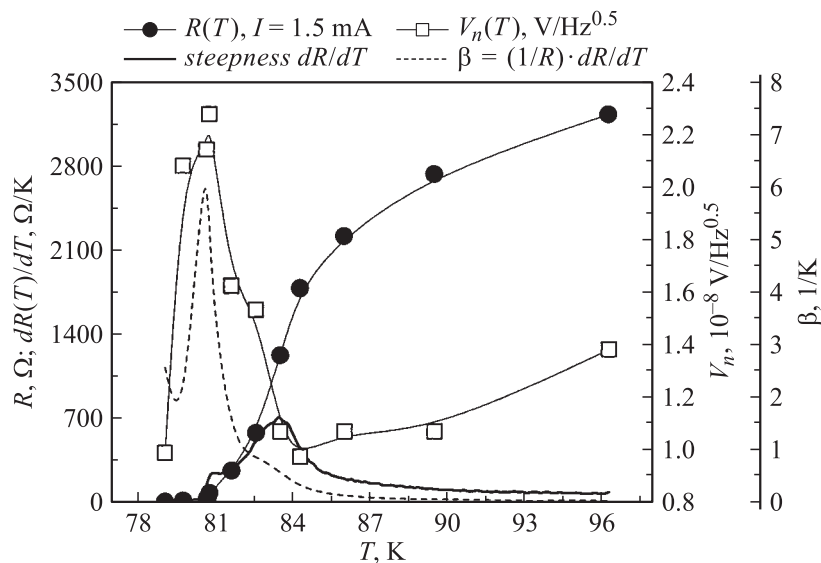


Рис. 3. Зависимость сопротивления, крутизны $\frac{dR(T)}{dT}$, температурного коэффициента сопротивления ($\beta = \frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT}$), напряжения шума от температуры для образца № 533, выполненного для $f = 10$ Hz.

1–200 Hz. Коэффициент a лежал в пределах от 0.8 до 1.2. Наименьшим шумом обладали пленки, выращенные на подложках LaAlO_3 , для них шумовой параметр Хоуге (α_H) был на порядок меньше, чем для пленок на подложках $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$:

$$\alpha_H = \frac{V_n^2 N V f^a}{(IR)^2}, \quad (1)$$

где N — концентрация носителей заряда в пленке; $V = tA$, t — толщина пленки, A — площадь пленки; f — рабочая частота модуляции потока излучения; I , R — ток и сопротивление образца.

При создании болометра и выборе режима его работы необходимо знать зависимость напряжения шума от температуры и сопротивления на переходе. В качестве примера рис. 3 демонстрирует, что для образца № 533 шум принимает свое максимальное значение в начале перехода, а в максимуме крутизны, т.е. в предполагаемой рабочей

точке болометра, почти минимален, что выгодно с точки зрения получения оптимального отношения сигнал/шум. При измерениях электрофизических параметров ток составлял 1.5 мА; шумовые измерения проводились на частоте 10 Hz.

Используя полученные экспериментальные данные, было проведено расчетное моделирование наиболее важных характеристик YBCO-болометра (см. также табл. 2).

1. Вольт-ваттная чувствительность S_v .

Для болометра, работающего при постоянном токе смещения, т.е. в режиме с положительной электротепловой обратной связью, вольт-ваттная чувствительность S_v равна:

$$S_v = \frac{\varepsilon L_0}{I_b(1 - L_0)(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

где ε — коэффициент поглощения приемника (в расчетах принимался за единицу); $L_0 = \beta P_b/G$ — коэффициент обратной связи; $P_b = I_b^2 R_b$ — мощность смещения болометра; I_b — расчетный ток смещения болометра; R_b — сопротивление болометра в рабочей точке; G — тепловая проводимость; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; $\tau_e = \tau_0/(1 - L_0)$ — эффективное значение постоянной времени; τ_0 — тепловая постоянная времени. Для стабильной работы L_0 должен быть меньше 1; $L_0 = 0.3$ выбирается как близкий к оптимуму. Расчетные зависимости $S_v(f)$ для болометров на основе исследованных образцов представлены на рис. 2, *b*.

2. Эквивалентная мощность шума NEP_Σ .

Выражение, показывающее вклад различных источников шума в эквивалентную мощность шума, дано в работе [5] и записывается в следующем виде:

$$NEP_\Sigma = \left\langle \frac{4k T_b^2 G}{\varepsilon^2} + \left(\frac{4k T_b G^2}{\varepsilon^2 \beta^2 P_b} + \frac{G^2 \alpha_H}{\varepsilon^2 \beta^2 N A t f^a} \right) [1 + \omega^2 \tau_0^2] \right\rangle^{1/2}. \quad (3)$$

В (3) первая компонента зависит от фононного шума (NEP_{phon}), вторая — от джонсоновского шума (NEP_R) и третья компонента зависит от $1/f$ -шума ($NEP_{1/f}$). Заметим, что NEP_R и $NEP_{1/f}$ зависят от тепловой постоянной времени τ_0 , а не от τ_e , как это характерно для S_v . Вычисления были проведены в диапазоне частот модуляции излучения 0.001–1000 Hz при значениях тепловой проводимости $G = 3 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-3}$ W/K.

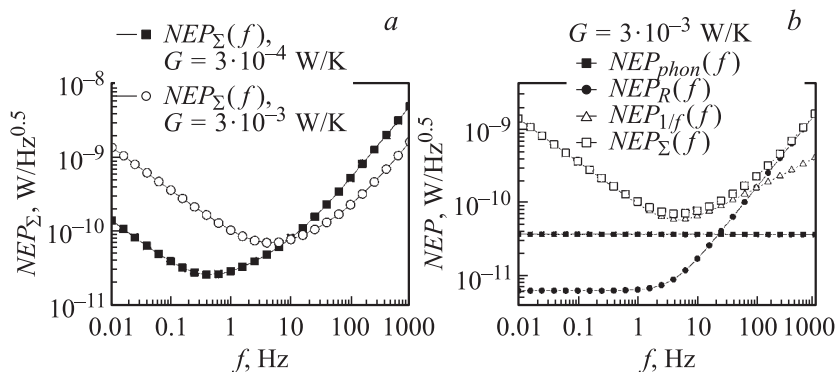


Рис. 4. *a* — зависимости результирующей NEP_{Σ} от рабочей частоты модуляции потока излучения для болометра на основе образца № 533 при $G = 3 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-3} \text{ W/K}$; *b* — расчетные зависимости NEP от рабочей частоты модуляции потока излучения различных составляющих шума для болометра на основе образца № 533 при $G = 3 \cdot 10^{-3} \text{ W/K}$.

Из рис. 4, *a* видно, что при увеличении тепловой проводимости NEP_{Σ} увеличивается на частотах, меньших 10 Hz, и уменьшается за счет джонсоновской составляющей на частотах, больших 10 Hz. Проведенный сравнительный анализ влияния основных источников шума на эквивалентную мощность шума NEP (рис. 4, *b*) показал, в частности, что NEP_{Σ} главным образом должен определяться фликкер-шумом, который является основной причиной ограничения чувствительности болометра; и только на частотах выше 100 Hz начинает сказываться вклад джонсоновского шума.

Расчеты, приведенные в работе [6], показали, что режим с отрицательной электротепловой обратной связью дает возможность уменьшить постоянную времени, поддерживая низкую NEP_{Σ} , близкую к ограниченной фоновым шумом. Это позволяет работать на модулированном потоке синхротронного излучения, уменьшая влияние температурного дрейфа в криостате на точность измерения.

В заключение, проведены анализ экспериментальных данных для пленок YBCO и расчетное моделирование основных характеристик бо-

Таблица 2. Экспериментальные характеристики YBCO-пленок и расчетные параметры болометров на их основе

№ образца	538	533	412-1
Тип подложки и буфера	CeO ₂ /Al ₂ O ₃	CeO ₂ /Al ₂ O ₃	LaAlO ₃
Толщина YBaCuO, nm	500	500	200

Экспериментальные характеристики YBaCuO пленок

$R_{300\text{K}}$, k Ω	9.6	11.1	20.7
T_b , K	91.3	83.47	87.85
R_b , k Ω	1.21	1.2	3.08
γ_{max} , Ω/K	1524	714	5945
β , 1/K	1.26	0.6	1.93
$\alpha_H; a$	3.77; 1.18	1.29; 0.85	0.12; 0.8

Рассчитанные параметры YBaCuO болометров

G , W/K	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$
τ_0/f_{cut} , s/Hz	0.41/0.39	0.04/3.93	0.41/0.39	0.04/3.93	1.38/0.12	0.14/1.15
I_b , μA	243.5	769.9	354.1	1120	123.1	389.4
S_V , V/W	48.4	147.64	33.28	101.5	28.12	88.64
V_n , V/Hz ^{0.5}	$3.9 \cdot 10^{-9}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$4.4 \cdot 10^{-9}$	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$4.2 \cdot 10^{-9}$	$7.3 \cdot 10^{-9}$
NEP_{Σ} , W/Hz ^{0.5}	$8.1 \cdot 10^{-11}$	$7.8 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-10}$	$8.3 \cdot 10^{-11}$

T_b и R_b — температура и сопротивление ВТСП-пленки в максимуме крутизны; γ_{max} — максимальное значение крутизны; a и α_H определены в максимуме крутизны; f_{cut} — частота среза; NEP_{Σ} — результирующая мощность, эквивалентная шуму. Величины S_V , V_n , NEP_{Σ} приведены для частоты модуляции потока излучения, равной 10 Hz. Расчетные параметры вычислены для режима работы болометра с постоянным током.

лометра на их основе. Оценка прогнозируемой величины эквивалентной мощности шума $NEP_{\Sigma} = 8 \cdot 10^{-11} - 1.3 \cdot 10^{-10}$ W/Hz^{0.5} демонстрирует возможность использования таких пленок для создания высокоточного абсолютного радиометра, способного регистрировать сигналы мягкого рентгеновского синхротронного излучения в широком диапазоне частот мощностью около 1 μW с точностью измерения не хуже 1%.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 2920.

Список литературы

- [1] *Rabus H., Persch V., Ulm G.* // Appl. Opt. 1997. V. 36 (22). P. 5421.
- [2] *Rice J.P.* // Metrologia. 2000. V. 37. P. 433.
- [3] *Karmanenko S.F., Nikolaev D.A.* et al. // IEEE International students seminar on MW applications of Novel Physical Phenomena. St.Petersburg Electrotechnical University, 2002. P. 13.
- [4] *Bobyl A.V., Gaevskii M.E., Karmanenko S.F., Kutt R.N., Suris R.A.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. N 3. P. 1274.
- [5] *Khrebtov I.A., Malyarov V.G., Ivanov K.V., Khokhlov D.A.* et al. // Proc. of 7th International Workshop on Low Temperature Electronics, WOLT-7. Noordwijk, Netherlands, ESA. 2006. V. WPP-264. P. 217.
- [6] *Lee T., Richards P.L.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 1801.