

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.231.62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО БОЛОМЕТРА ДЛЯ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2007 г. **И. А. Хребтов***, канд. техн. наук; **В. Г. Маляров***, канд. техн. наук; **К. В. Иванов***, канд. техн. наук; **Д. А. Хохлов***; **А. Д. Николенко****; **В. Ф. Пиндюрин****

* НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

** Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

Проведено расчетное моделирование характеристик составного болометра с электрическим замещением на основе высокотемпературной сверхпроводящей пленки. Обсуждается принцип действия болометра как основного элемента абсолютного радиометра для абсолютных измерений синхротронного излучения мягкого рентгеновского диапазона 150–3000 эВ. Сделана оценка влияния различных шумовых составляющих на пороговую чувствительность болометров, работающих с положительной и отрицательной электротепловой обратной связью при изменении постоянной времени, сопротивления, типа материала подложки, размеров приемной площадки. В оптимальном варианте возможно достигнуть эквивалентной мощности шума $NEP \approx 4 \times 10^{-11}$ Вт/Гц^{-1/2} на частоте модуляции 10 Гц и точности радиометра не хуже 1% при измерении мощности синхротронного излучения порядка 1 мкВт.

Коды OCIS: 040.0040, 340.6720.

Поступила в редакцию 27.11.2006.

1. Введение

В настоящее время синхротронное излучение (СИ) широко используется в научных исследованиях в спектральном диапазоне от инфракрасного до жесткого рентгеновского [1–4]. Возможность точного расчета спектрального пучка СИ и его временных и геометрических характеристик позволяет использовать источник СИ как эталонный с точностью не хуже 0,01%. В то же время установка селективных спектральных элементов (монокроматор, фильтр и т. д.) на пути первичного пучка СИ в большинстве случаев приводит к появлению существенной неопределенности в спектральном пучке фотонов и потере точности при измерениях до единиц и более процентов из-за неопределенности характеристик используемых селективных элементов. Это особенно важно в мягком рентгеновском диапазоне 150–3000 эВ (8–0,4 нм), где оптические параметры селективных элементов могут существенно измениться со временем из-за изменения свойств их поверхности.

Несмотря на отдельные успешные примеры создания прецизионных приемников для мягкого рентгеновского диапазона [1], круг таких приемников

весьма ограничен и задача развития абсолютных приемников как первичных стандартов для метрологических измерений на источниках СИ остается до конца не решенной. Одним из перспективных методов регистрации излучения является метод преобразования энергии падающего излучения в тепловую с последующим измерением температуры чувствительного элемента приемника [2–4]. В работе [1] сообщалось о радиометре с электрическим замещением, в котором используется охлаждаемый жидким гелием полупроводниковый датчик температуры. Радиометр применялся для регистрации мягкого рентгеновского излучения мощностью менее 1 мкВт с точностью до 0,2%. В предлагаемой работе анализируется возможность измерения абсолютных значений мощности мягкого рентгеновского СИ с помощью радиометра (абсолютного радиометра) на основе охлаждаемого жидким азотом высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) болометра с электрическим замещением. Возможность создания абсолютного радиометра СИ с чувствительностью, близкой к той, о которой сообщалось в [1], но с лучшими временными и габаритными параметрами и более простого в изготовлении и эксплуатации исследуется ниже.

Обратим внимание, что создание ВТСП болометра для различных применений ограничено конкуренцией между его быстродействием и чувствительностью. Однако тепловой механизм работы болометра позволяет решить эту проблему, используя отрицательную электротепловую обратную связь (ЭТОС) как в пассивном, так и активном режимах работы [4–11]. В режиме с отрицательной ЭТОС можно значительно уменьшить постоянную времени болометра [4–9, 11]. Заметим, что шумовые свойства ВТСП болометра также зависят от ЭТОС [6–11]. Повышение быстродействия болометра с сохранением высокой чувствительности может быть достигнуто при использовании активного (электронного) управления отрицательной ЭТОС [4, 9, 11].

2. Принцип действия и конструкция радиометра СИ на основе ВТСП болометра с электрическим замещением

Устройство чувствительного элемента составного ВТСП болометра с электрическим замещением показано на рис. 1. Пучок СИ ($P_{\text{СИ}}$) падает со стороны нагревателя 2 в форме меандра из металлической пленки (например, из NiCr), осажденной на сапфировую (Al_2O_3) подложку 3. СИ поглощается в основном сапфировой подложкой, NiCr-пленка служит нагревателем для электрического замещения. Термометр 4 в форме меандра из сверхпроводящей YBaCuO-пленки осажден на обратной стороне подложки и таким образом защищен от прямого воздействия СИ. Чувствительный элемент подвешен на четырех тонких золотых проволочках 1 над медным теплостоком 6, которые используются для подачи тока смещения через YBaCuO-пленку и

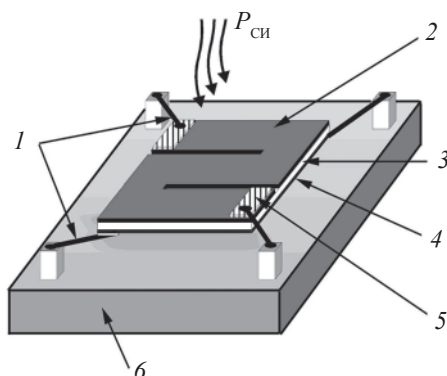


Рис. 1. Чувствительный элемент составного YBaCuO-болометра с электрическим замещением. 1 – проволочные Au-вводы, 2 – пленочный NiCr-нагреватель, 3 – сапфировая подложка, 4 – пленочный YBaCuO-термометр, 5 – контактные Au-слои, 6 – Cu-теплосток.

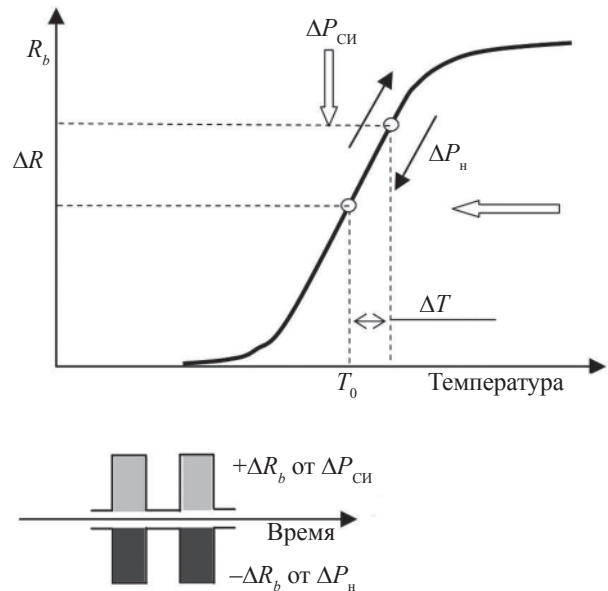


Рис. 2. Принцип действия ВТСП болометра с электрическим замещением. R_b – сопротивление болометра, $\Delta P_{\text{Н}}$ – изменение мощности пленочного нагревателя.

нагреватель, а также для тепловой изоляции болометра. Принцип работы ВТСП болометра в режиме с электрическим замещением поясняет рис. 2.

Радиометр может работать как с модуляцией пучка СИ, так и без нее. В первом случае предел точности измерения СИ ограничивается температурным дрейфом (ТД) в криостате с жидким азотом. Из-за высокой крутизны сверхпроводящего перехода имеет место сдвиг рабочей точки и, соответственно, изменение вольтовой чувствительности. Оценка эквивалентной мощности шума с учетом этого ТД для типичного случая дает значение $\text{NEP} \approx 3 \times 10^{-9}$ Вт, которое может быть улучшено на порядок ($\text{NEP} \approx 3 \times 10^{-10}$ Вт) при использовании дополнительной электронной стабилизации температуры. Модуляция пучка СИ предпочтительнее, так как при этом уменьшаются время процесса измерений, а также влияние ТД и низкочастотных шумов болометра и предусилителя на величину NEP. Для практической реализации этой задачи были проанализированы возможности режима активной отрицательной ЭТОС для ВТСП болометров [9–11].

3. Некоторые вопросы теории ВТСП болометров с электротепловой обратной связью

Чаще всего ВТСП болометры работают в пассивном режиме с положительной ЭТОС при постоянном токе смещения (РПТ). В этом случае болометр включен в схему с сопротивлением нагрузки

$R_L \gg R_b$ (см. рис. 3а). При работе в РПТ излучение, поглощенное болометром, нагревает чувствительный элемент, что приводит к изменению сопротивления ВТСП болометра. Положительный температурный коэффициент сопротивления $\beta > 0$ ведет к увеличению сопротивления и к дополнительному росту электрического нагрева, что в свою очередь приводит к нарастающему увеличению температуры и сопротивления болометра. Этот эффект называют положительной ЭТОС, которая при увеличении тока смещения может привести к тепловой неустойчивости и переходу ВТСП пленки в нормальное состояние с потерей чувствительности болометра.

Электрическая цепь болометра в пассивном режиме с отрицательной ЭТОС при постоянном напряжении смещения (РПН) показана на рис. 3б [6]. Напряжение смещения приложено параллельно входной катушке SQUID (superconducting quantum

interferometric device), последовательно соединенной с ВТСП пленочным термометром болометра. Чтобы эффективно реализовать РПН, сопротивление шунтирующего резистора должно быть $R_{sh} \ll R_b$. В этом режиме выходным сигналом является изменение тока, измеряемого SQUID. При этом увеличение R_b из-за нагрева поглощенным излучением ведет к уменьшению тока и, следовательно, к уменьшению электрической мощности и некоторой компенсации уменьшения сопротивления болометра. Так работает механизм отрицательной ЭТОС.

Практически первоначально рассмотренное решение использовалось для сверхпроводниковых болометров, работающих при температуре жидкого гелия [5], а использование этого эффекта для ВТСП болометров впервые было проанализировано в работах [6–8]. Альтернативным решением является применение режима активной (электронной) отрицательной ЭТОС [4, 9, 11]. В этом случае, как показано на рис. 3в, болометр включают в равноплечий мост, соединенный с усилителем. Усиленное напряжение разбаланса моста воздействует на напряжение питания моста, что приводит к увеличению коэффициента усиления в петле ЭТОС.

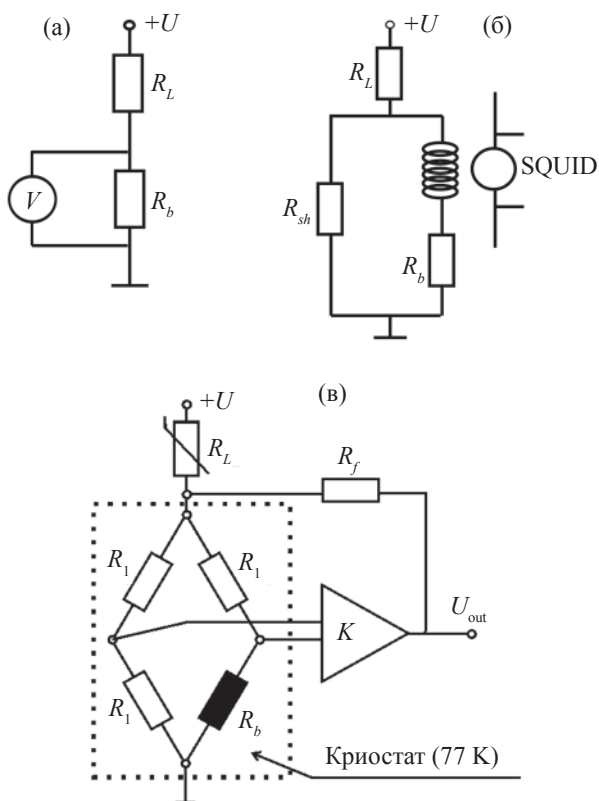


Рис. 3. Схемы включения болометра: а – в режиме с постоянным током смещения (РПТ); б – в режиме с постоянным напряжением смещения (РПН); в – в режиме отрицательной ЭТОС. +U – напряжение питания, V – вольтметр, R_L – сопротивление нагрузки, R_{sh} – резистор-шунт, SQUID – сверхпроводящий квантовый интерференционный амперметр, K – дифференциальный усилитель, R_f – резистор петли обратной связи, R_1 – резисторы плеч моста.

4. Характеристики ВТСП болометров, работающих в различных режимах электротепловой обратной связи

4.1. Режимы с постоянным током смещения и постоянным напряжением смещения

В работе [7] описано функциональное поведение болометра как электрической системы с замкнутой петлей отрицательной ЭТОС и получены выражения для болометрических характеристик, которые используются в настоящей работе при моделировании и оценке характеристик ВТСП болометров для СИ-радиометра. Согласно этой модели вольтовая чувствительность S_V болометра, работающего в пассивном РПТ, т. е. с положительной ЭТОС,

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

где ε – оптическое поглощение, $L_0 = \beta P_b / G$ – коэффициент усиления петли обратной связи, $P_b = I_b^2 R_b$ – мощность смещения, I_b – ток смещения, G – тепловая проводимость болометра, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, f – рабочая частота, $\tau_0 = C/G$ – тепловая постоянная времени, C – теплоемкость болометра, $\tau_e = \tau_0 / (1 - L_0)$ – эффективная тепловая постоянная времени. Для стабильной работы коэффициент L_0 должен быть меньше 1. В литературе обычно при-

нимают $L_0 = 0,3$, что близко к оптимальному значению. Если болометр работает в пассивном РПН, т. е. в режиме с отрицательной ЭТОС, токовая чувствительность записывается как

$$S_I = \frac{\varepsilon L_0}{V_b(1 + L_0)(1 + \omega^2 \tau_e^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

где $\tau_e = \tau_0/(1 + L_0)$, $L_0 = V_b^2 \beta / R_b G$, V_b – напряжение смещения. В этом случае нет предела для увеличения напряжения смещения, так как ВТСП пленка имеет положительный коэффициент β и из выражения (2) следует, что с увеличением L_0 устойчивость работы не нарушается. Таким образом, если болометр работает в режиме с отрицательной ЭТОС, эффективная постоянная времени может быть уменьшена в $1 + L_0$ раз за счет увеличения мощности смещения P_b .

Исходя из (1) и (2), можно полагать, что в РПН, в отличие от РПТ, нет никакого прямого ограничения на коэффициент обратной связи L_0 . Однако прак-

тически ограничение на величину L_0 существует, так как для удержания сопротивления болометра в рабочей точке R_b при увеличении электрической мощности из-за увеличения напряжения смещения требуется соответствующее охлаждение. При выбранных β и R_b (или T_b) максимальное значение L_0 определяется температурой охлаждающей ванны T_0

$$L_{\text{omax}} = \beta(T_b - T_0) = \beta \Delta T. \quad (3)$$

На практике для ВТСП болометров минимальная температура охлаждения ванны жидким азотом $T_0 \geq 77$ К. Принимая типичную температуру перехода T_c для YBaCuO-пленки близкой к 87 К, получаем, что в пассивном режиме при $\Delta T \approx 10$ К и $\beta = (0,5-2)$ К⁻¹ максимальный коэффициент отрицательной обратной связи $L_{\text{omax}} \approx 10-30$ [6]. Выражения для вкладов различных шумовых напряжений V_n в суммарную эквивалентную мощность шума NEP_Σ приведены в [6, 7, 12]. Суммарная NEP_Σ , которая является одинаковой для работы в пассивных РПТ и РПН, записывается как

$$\text{NEP}_\Sigma = \left\langle \frac{4kT_b^2 G}{\varepsilon^2} + \left(\frac{4kT_b G^2}{\varepsilon^2 \beta^2 P_b} + \frac{G^2 \alpha}{\varepsilon^2 \beta^2 N A t f^a} \right) \left[1 + \omega^2 \tau_0^2 \right] \right\rangle^{1/2} = \left[\text{NEP}_{ph} + (\text{NEP}_R + \text{NEP}_{1/f}) (1 + \omega^2 \tau_0^2) \right]^{1/2}. \quad (4)$$

В выражении (4) первый компонент (NEP_{ph}) обусловлен фоновым шумом, второй (NEP_R) – тепловым шумом сопротивления (шум Джонсона), третий компонент ($\text{NEP}_{1/f}$) зависит от низкочастотного токового $1/f$ -шума. Следует отметить, что NEP_R и $\text{NEP}_{1/f}$ зависят от тепловой постоянной времени τ_0 , но не от эффективной τ_e , как это имеет место для S_V (1) и для S_I (2). Это можно объяснить, принимая в расчет влияние ЭТОС на шум Джонсона и $1/f^a$ -шум, которыми обычно пренебрегали ранее. В случае работы в РПН мощность смещения P_b может быть больше, чем в РПТ, поэтому в соответствии с (4) составляющая теплового шума подавляется с увеличением P_b .

При расчетах для $1/f^a$ -шума использовали эмпирическую формулу Хоуге [12], коэффициент $a \approx 1$, α – шумовой параметр Хоуге, зависящий от структурного совершенства ВТСП пленок; $N = 10^{21}$ см⁻³ – плотность концентрации носителей зарядов в пленке [13], A – площадь, $t \approx 0,2$ мкм – толщина пленки. Обычно при сравнении шумовых характеристик YBaCuO-пленок используется $\alpha = \alpha_n$, где α_n – параметр Хоуге пленки в нормальном состоянии при $T = 95-100$ К. Для оценки $\text{NEP}_{1/f}$ в конкретном случае брали сопротивление болометра в рабочей точке R_b и величину α , зависящую от R_b [13]. Коэффициент поглощения излучения принимали $\varepsilon \approx 1$.

4.2. Режим с активной отрицательной электротепловой обратной связью

Использование принципа прохождения электрического сигнала в цепи с петлей обратной связи, который рассматривали ранее [7, 11] при анализе работы ВТСП болометра в режиме с активной отрицательной ЭТОС, дает следующие выражения для основных характеристик болометра (вольтовой чувствительности S_V и суммарного напряжения шума V_n):

$$S_V = \frac{1}{I_b} \times \frac{0,5L_0}{1 + 0,5L_0 FK} \frac{1}{1 + i\omega \tau_e}, \quad (5)$$

где $\tau_e = \tau_0/(1 + L_0 FK)$;

$$V_n = V_n^* \frac{\sqrt{1 + (\omega \tau_0)^2}}{\sqrt{(1 + 0,5L_0 FK)^2 + (\omega \tau_0)^2}}, \quad (6)$$

где $F = R_m/(R_m + R_f)$ – коэффициент передачи сигнала с выхода моста на болометр для равноплечего моста, R_m – сумма сопротивлений моста, равная R_1 (рис. 3в); K – коэффициент усиления усилителя, V_n^* – сумма напряжений шумов болометра и без учета ЭТОС:

$$V_n^* = \{V_R^2 + (0,5V_{1/f})^2 + (0,5V_{ph})^2\}^{1/2}, \quad (7)$$

где V_R – напряжение шума сопротивлений моста, включая сопротивление болометра (шум Джонсона); $V_{1/f}$ – $1/f$ -шум и V_{ph} – напряжение фонов шума, приведенное к выходу моста без активной отрицательной ЭТОС [11]. Здесь

$$V_R = (4kT_b R_b)^{1/2}, \quad V_{ph} = S_V (4kT_b^2 G)^{1/2}, \quad (8)$$

$$V_{1/f} = \left(\frac{\alpha V^2}{NA t f^a} \right)^{1/2}.$$

5. Результаты моделирования чувствительности, постоянной времени, шумовых и спектральных характеристик

Основные результаты расчетного моделирования и оценок болометрических характеристик, которые определяют как эффективность, так и точность радиометра, приведены в таблице и на рис. 4–7. На рис. 4 приведены экспериментальные температурные зависимости R_b , dR/dT , β для модели болометра с пленочным YBaCuO-меандром на подложке из титаната стронция (SrTiO_3). Представленные зависимости характерны и для экспериментальных YBaCuO-пленок, осажденных на толстые (более

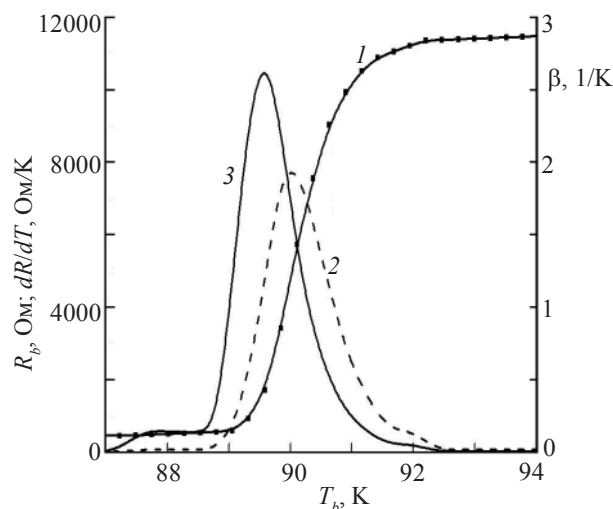


Рис. 4. Зависимости сопротивления болометра R_b – 1, крутизны dR/dT – 2 и температурного коэффициента сопротивления $\beta = (1/R)(dR/dT)$ – 3 от температуры для YBaCuO-пленок на подложке из титаната стронция ($3 \times 3 \times 0,5$ мм).

100 мкм) подложки. Отметим, что в РПТ рабочая точка выбирается в максимуме крутизны, а в РПН – в максимуме β [10]. Максимум β согласуется с (3) при условии, что температура теплостокка 80 К.

Расчетные параметры YBaCuO-болометров

Параметр	Подложка Al_2O_3 , $5 \times 5 \times 0,05$ мм			Подложка SrTiO_3 , $3 \times 3 \times 0,05$ мм		
	Режим			Режим		
	РПТ	РПН	Активн. отр. ЭТОС	РПТ	РПН	Активн. отр. ЭТОС
T_b , К	90,4	84,5	90,4	90,3	89,6	90,3
R_b , кОм	19,0	0,23	19,0	4,9	1,7	4,9
β , K^{-1}	0,53	1,23	0,53	1,65	2,68	1,65
G , Вт/К	3×10^{-3}	3×10^{-3}	3×10^{-3}	3×10^{-3}	3×10^{-3}	3×10^{-3}
L_o/L_A	0,3	5,5	5,5/221	0,3	25,7	17/199
τ_o/f_{cp} , с/Гц	0,11/1,4	0,1/1,4	0,11/1,4	0,15/1,1	0,15/1,1	0,15/1,1
τ_e/f_{cp} , с/Гц	0,16/1,0	0,017/9,3	$5 \times 10^{-4}/314$	0,21/0,74	$5,6 \times 10^{-3}/28$	$7,5 \times 10^{-4}/212$
S_V , ($f = 0$ Гц), В/Вт	1432			1288		
S_V , ($f = 10$ Гц), В/Вт	141		9,7	95,4		17
S_p , ($f = 0$ Гц), А/Вт		0,48			0,14	
S_p , ($f = 10$ Гц), А/Вт		0,32			0,13	
V_n , В/Гц ^{1/2}	$1,3 \times 10^{-8}$		$8,3 \times 10^{-10}$	$6,1 \times 10^{-9}$		$6,6 \times 10^{-10}$
I_n , А/Гц ^{1/2}		$1,2 \times 10^{-11}$			$4,7 \times 10^{-12}$	
NEP_Σ , Вт/Гц ^{1/2}	$9,2 \times 10^{-11}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$8,6 \times 10^{-11}$	$6,4 \times 10^{-11}$	$3,7 \times 10^{-11}$	$3,9 \times 10^{-11}$

Примечание. $L_A = 0,5L_oFK$ – коэффициент активной отрицательной ЭТОС, $F = R_m/(R_m + R_p)$ – делитель, $K = 500$ – коэффициент усиления усилителя с обратной связью, $R_m = R_1 = R_b$ – сопротивление моста, R_p – сопротивление в петле обратной связи. Значения S_V , S_p , V_n , I_n , NEP_Σ рассчитаны для предполагаемой рабочей частоты модуляции $f = 10$ Гц, f_{cp} – частота среза по уровню 0,7. Шумовой параметр Хоуге для YBaCuO-пленки в нормальном состоянии принят равным $\alpha_n = 0,09$ для пленки на Al_2O_3 -подложке и 3×10^{-4} – на SrTiO_3 [12].

Из таблицы видно, что YBaCuO-пленка на SrTiO₃ имеет более высокий коэффициент β , что обусловлено более узким сверхпроводящим переходом по сравнению с пленкой на Al₂O₃, и, кроме того, она имеет более низкий уровень избыточного $1/f$ -шума. Однако удельная теплоемкость Al₂O₃ в 5 раз меньше, чем SrTiO₃, кроме того подложку из Al₂O₃ технологически более просто сделать более тонкой, чем из SrTiO₃. Эти факторы необходимо принимать во внимание при выборе подложки для конкретной разработки радиометра.

На рис. 5 приведены частотные зависимости NEP для отдельных шумовых компонентов. Видно, что для болометра на Al₂O₃-подложке фоновый компонент NEP_{ph} не зависит от частоты для пассивных РПТ и РПН. Режим РПН позволяет уменьшить NEP_R примерно в 10 раз и $NEP_{1/f}$ в 4–5 раз на частотах $f < 1$ Гц. В этом же диапазоне $NEP_{1/f}$, обусловленная избыточным токовым шумом, больше NEP_R . Однако на частотах $f > 1$ Гц влияние теплового шума сопротивления на NEP начинает преобладать, так как токовый шум и вольтовая чувствительность с ростом частоты уменьшаются.

Расчеты для болометра на SrTiO₃-подложке показывают, что $1/f$ -шум ограничивает суммарную NEP_{Σ} на частотах $f < 10^{-3}$ Гц, так как YBaCuO-пленки на SrTiO₃ имеют более совершенную структуру и поэтому избыточный $1/f$ -шум значительно меньше, чем для пленок на Al₂O₃. На $f > 10$ Гц NEP_{Σ}

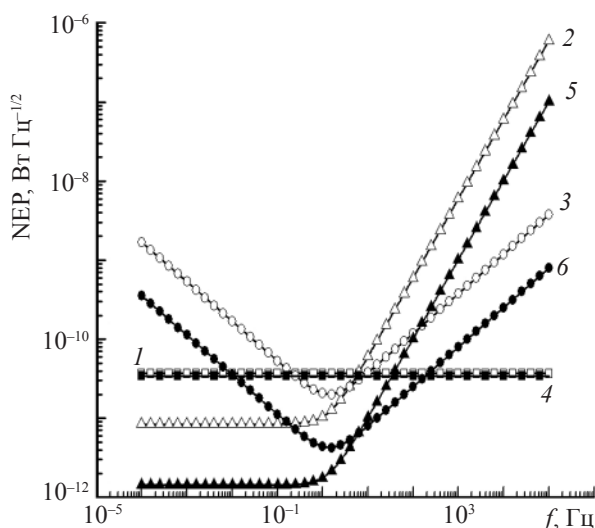


Рис. 5. Расчетные зависимости NEP от частоты для различных шумовых компонентов для YBaCuO-болометра на Al₂O₃-подложке в пассивных РПТ и РПН и в режиме с активной отрицательной ЭТОС. 1 – NEP_{ph} (РПТ), 2 – NEP_R (РПТ), 3 – $NEP_{1/f}$ (РПТ), 4 – NEP_{ph} (РПН), 5 – NEP_R (РПН), 6 – $NEP_{1/f}$ (РПН).

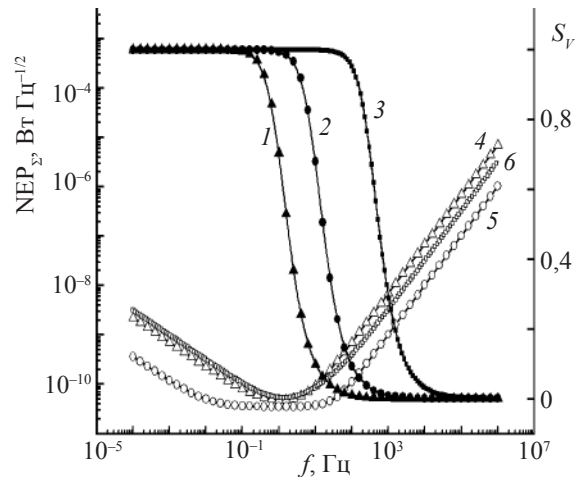


Рис. 6. Расчетные зависимости суммарной NEP_{Σ} и нормированной вольтовой чувствительности S_{Vnorm} от частоты для YBaCuO-болометра на Al₂O₃-подложке в пассивных РПТ и РПН и в режиме с активной отрицательной ЭТОС. 1 – S_{Vnorm} (РПТ), 2 – S_{Vnorm} (РПН), 3 – S_{Vnorm} (актив.), 4 – NEP_{Σ} (РПТ), 5 – NEP_{Σ} (РПН), 6 – NEP_{Σ} (актив.).

обусловлена шумом Джонсона для всех режимов работы. Для болометра на Al₂O₃-подложке NEP_{Σ} начинает ограничиваться $1/f$ -шумом с более высоких частот ($f < 0,1$ Гц), что видно из рис. 6.

Из всех режимов наилучшие результаты, учитывая NEP и постоянную времени, могут быть получены в режиме с активной отрицательной ЭТОС, что показано в таблице. При использовании мал шумящих ВТСП пленок NEP_{Σ} уменьшается и область минимальной NEP_{Σ} расширяется. На высоких частотах с уменьшением $1/f$ -шума NEP_{Σ} обусловлена в основном шумом Джонсона. Наименьшая постоянная времени $(5-7,5) \times 10^{-4}$ с может быть реализована в режиме с активной отрицательной ЭТОС.

На рис. 7 приведены спектральные характеристики, показывающие долю потерь мощности СИ при регистрации в результате отражения от чувствительного элемента болометра и пропускания его подложкой рентгеновского излучения (спектральная зависимость поглощения). Расчет был выполнен для различных толщин Al₂O₃-подложек: 30, 50 и 100 мкм (кривые 1, 2 и 3 соответственно). В мягкой части рабочего участка основной вклад вносит отражение, в жесткой части превалирует вклад пропускания подложки. Особенность спектральных свойств болометра вблизи 1500 эВ на графике вызвана К-краем поглощения Al. Для более толстых подложек поглощение велико и слабо влияет на спектральную чувствительность болометра в рабочей области. Расчет показывает, что в рассматриваемой рабочей области 150–3000 эВ коэффициент поглощения излучения близок к единице с точностью не хуже 1,0%.

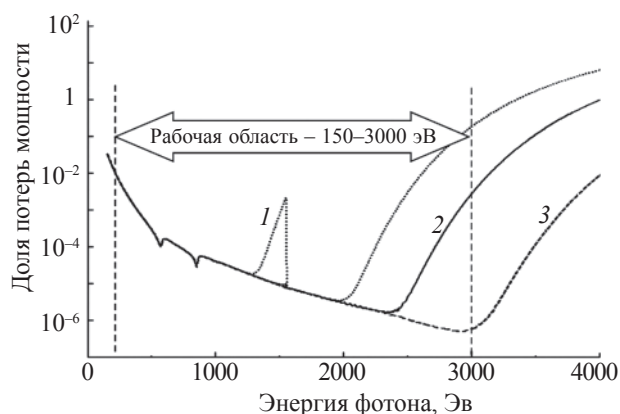


Рис. 7. Спектральные характеристики радиометра на основе YBaCuO-болометра при различных толщинах Al_2O_3 -подложки: 1 – 30, 2 – 50, 3 – 100 мкм.

Кроме отражения и пропускания, существует еще один канал, который может внести заметный (до нескольких процентов) вклад в потерю измеряемой мощности – это фотоэлектронная эмиссия. Наибольшего значения этот фактор может достигать в мягкой области спектрального диапазона радиометра, а также на коротких участках спектра вблизи K - и L -краев элементов, входящих в состав материалов нагревателя и подложки чувствительного элемента. Для оценки влияния этого фактора конструкция радиометра должна иметь дополнительный электрод для измерения фототока.

6. Заключение

Основные результаты расчетного моделирования абсолютного радиометра для мягкого рентгеновского синхротронного излучения следующие:

- Шумовые параметры высокотемпературного сверхпроводящего YBaCuO-болометра с электрическим замещением как чувствительного элемента прибора являются важнейшими компонентами, которые ограничивают точность измерений мощности синхротронного излучения.

- Сравнительный анализ влияния, обусловленного основными источниками шумов (фонный шум, шум Джонсона и $1/f$ -шум), на эквивалентную мощность шума NEP_Σ был выполнен для различных режимов работы с электротепловой обратной связью (ЭТОС): 1) пассивный режим с постоянным током смещения (РПТ) – положительная ЭТОС, 2) пассивный режим с постоянным напряжением смещения (РПН) – отрицательная ЭТОС, 3) режим с активной отрицательной ЭТОС.

- Расчетное моделирование показало, что режим с отрицательной ЭТОС дает возможность уменьшить постоянную времени ВТСП болометра и дос-

тичь NEP_Σ , близкую к ограничению фоновым шумом. Это позволяет работать на модулированном потоке СИ, уменьшая влияние $1/f$ -шума предусилителя и температурных флуктуаций в криостате на точность измерения.

- Прогнозируемая $\text{NEP}_\Sigma \approx 4 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-10} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$ на частоте модуляции 10 Гц и анализ других факторов, в частности коэффициента поглощения, влияющих на точность радиометра, показали реальную возможность достигнуть точности не хуже 1% при измерении мощности потока мягкого рентгеновского синхротронного излучения около 1 мкВт в спектральном диапазоне 150–3000 эВ (8–0,4 нм).

Эта работа поддержана МНТЦ, проект № 2920.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rabus H., Persch V., Ulm G. Synchrotron-radiation-operated cryogenic electrical-substitution radiometer as the high-accuracy primary detector standard in the ultraviolet, vacuum-ultraviolet, and soft-x-ray spectral ranges // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. P. 5421–5440.
2. Rice J.P., Lorentz S.R., Dalta R.U. et al. Active cavity radiometer based on high- T_c superconductors // *Metrologia*. 1998. V. 35. P. 289–293.
3. Rice J.P. An electrically substituted bolometer as a transfer – standard detector // *Metrologia*. 2000. V. 37. P. 433–436.
4. Khrebtov I.A., Tkachenko A.D., Ivanov K.V. et al. Absolute high- T_c superconducting radiometer with electrical-substitution for X-rays measurements // *Phys. IV France*. 2002. V. 12. P. 3-137–140.
5. Lee T., Richards P.L., Nam S.W. et al. A superconducting bolometer with strong electrothermal feedback // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 69. P. 1801–1803.
6. Lee T., Gildemeister J.M., Lee S-F. et al. Voltage-biased high- T_c superconducting infrared bolometers with strong electrothermal feedback // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1997. V. 7. P. 2378–2381.
7. Nivelle M.J.M.E de., Bruijn M.P., Vries R. de. et al. Low noise high- T_c superconducting bolometers on silicon nitride membranes for far-infrared detection // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82. P. 4719–4726.
8. Neff H., Lima A.M.N., Deep G.S. et al. Nonlinearity and electrothermal feedback of high T_c transition edge bolometers // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76. P. 640–642.
9. Хребтов И.А., Ткаченко А.Д., Иванов К.В., Штайнбайс Е. Исследование режима активной электротепловой отрицательной обратной связи для высокотемпературного сверхпроводникового болометра // *Оптический журнал*. 2001. Т. 68. № 4. С. 63–67.
10. Ivanov K., Lima A.M., Neff H. et al. Effects of electrothermal feedback effect on the operation of high- T_c superconducting bolometers of different types // *Physica C*. 2002. V. 372–376. P. 432–435.

11. *Иванов К.В., Хребтов И.А., Ткаченко А.Д.* Расчетное и экспериментальное моделирование работы высокотемпературного сверхпроводникового болометра с активной электротепловой обратной связью // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 9. С 57–62.
 12. *Khrebtov I.A.* Noise properties of high temperature superconducting bolometers // Fluctuation and Noise Letters. 2002. V. 2. № 2. P. R51–R70.
 13. *Kiss L.B., Svedlindh P.* Noise in high Tc superconductors // IEEE. Trans. Electron. Devices. 1994. V. 41. P. 2112–2122.
-