

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА СВОЙСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ БОЛОМЕТРОВ

© 2004 г. К. В. Иванов; И. А. Хребтов, канд. техн. наук; А. И. Степанов, доктор техн. наук

ВНЦ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

Проведено расчетное и экспериментальное моделирование высокотемпературных сверхпроводниковых болометров мембранного типа в режиме с активной отрицательной электротепловой обратной связью. Исследовано влияние обратной связи на чувствительность, обнаружительную способность, постоянную времени и шумовые параметры болометров. Предложена модель, описывающая поведение напряжения шума, чувствительности болометра в зависимости от частоты, тока смещения и коэффициента обратной связи.

Коды OCIS: 040.3060.

Поступила в редакцию 07.07.2003.

Введение

По пороговой чувствительности высокотемпературные сверхпроводниковые (ВТСП) болометры не уступают фотоэлектрическим приемникам излучения в ИК диапазоне, однако, обладая равномерной чувствительностью в широкой области спектра, имеют хорошие перспективы применения в ИК фурье-спектроскопии, тепловидении, метрологии, космических наблюдениях и т. д. [1–3]. В ряде случаев применение ВТСП болометров ограничено из-за невозможности одновременно обеспечить высокую пороговую чувствительность и требуемое быстродействие. Отчасти эта проблема может быть решена при использовании эффекта отрицательной электротепловой обратной связи (ЭОС) как в пассивном, так и в активном режимах. В проведенных ранее исследованиях пассивного режима работы ВТСП болометров при постоянном напряжении смещения (ПНС) [2, 4, 5] было показано, что эффективность ЭОС определяется коэффициентом обратной связи $L_0 = P\beta/G$ (где β – температурный коэффициент сопротивления, G – коэффициент теплопотерь, $P = U_b^2/R_b$ – джоулева мощность при сопротивлении болометра R_b и напряжении U_b). Отрицательная ЭОС в пассивном режиме уменьшает тепловую постоянную времени τ_0 на величину $1 + L_0$, при этом быстродействие болометра определяется эффективной постоянной времени τ_e . Увеличивая напряжение смещения, можно усилить влияние отрицательной ЭОС, что позволит существенно повысить быстродействие болометра, однако при этом возрастает сила тока, протекающего через болометр, что ведет к увеличению составляющей $1/f$ -шума (f – частота) и, тем самым, снижает его обнаружительную способность. В отличие от пассивного режима ПНС в активном режиме для увеличения влияния отрицательной ЭОС используется внешняя петля обратной связи с электронным усилителем [6].

В данной работе было проведено расчетное и экспериментальное моделирование характеристик ВТСП GdBaCuO-болометров на Si/Si₃N₄-мембране, работающих в режиме с отрицательной электротепловой активной обратной связью (АОС).

Болометр в режиме с активной отрицательной электротепловой обратной связью

Для реализации режима с отрицательной электротепловой АОС в работе использовалась схема с дифференциальным усилителем (рис. 1).

На схеме болометр R_b включен в равноплечий мост Уинстона ($R_1 = 4,7$ кОм). Изменение сопротивления болометра, возникающее под действием шумовых

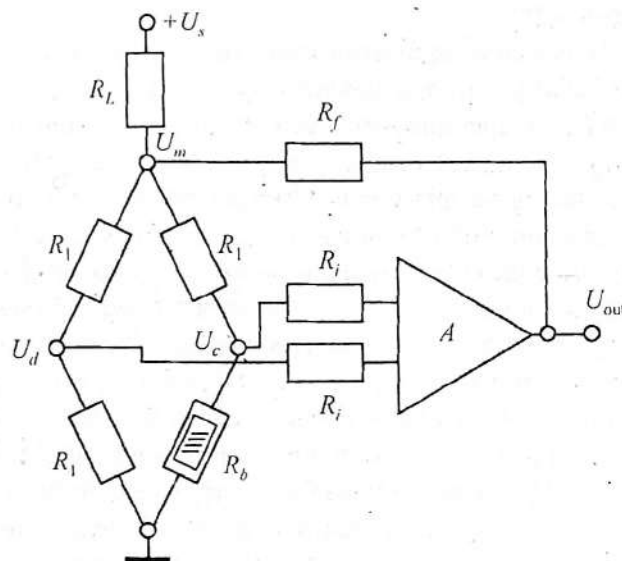


Рис. 1. Электронная схема для режима с АОС. U_m – напряжение питания моста, R_b – болометр, R_1 – сопротивление в плечах моста, R_f – сопротивление обратной связи, R_L – нагрузочное сопротивление, R_i – входные сопротивления, A – дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления K .

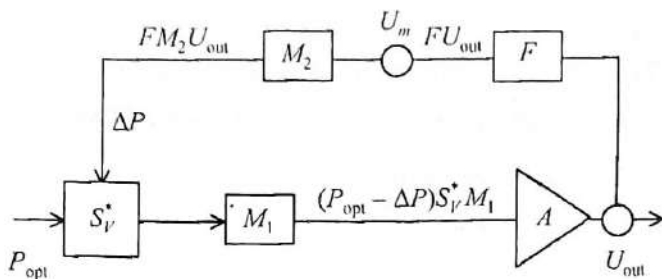


Рис. 2. Принцип действия отрицательной электро-тепловой активной обратной связи.

колебаний и оптического излучения, ведет к разбалансу моста. Напряжение разбаланса $U_{cd} = U_c - U_d$ с моста передается на дифференциальный усилитель A и далее через сопротивление $R_f = 100$ кОм усиленный сигнал поступает на диагональ питания моста U_m . Усилитель подключен таким образом, что увеличение сопротивления болометра приводит к уменьшению напряжения питания моста U_m и болометра и, следовательно, к уменьшению джоулевой мощности и сопротивления болометра. Таким образом, реализуется режим с активной отрицательной ЭОС.

Механизм действия отрицательной АОС поясняет блок-схема на рис. 2. На входе блок-схемы поглощенная болометром мощность оптического излучения P_{opt} увеличивает его сопротивление и преобразуется в изменение напряжения ΔU_b через вольт-ваттную чувствительность болометра S_V^* . Без учета ЭОС и при коэффициенте поглощения $\epsilon = 1$ чувствительность S_V^* будет иметь вид

$$S_V^* = \frac{U_b \beta}{G} \frac{1}{1 + i\omega\tau_0}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Изменение сопротивления болометра ведет к разбалансу моста, напряжение разбаланса поступает на дифференциальный усилитель с коэффициентом усиления K . С выхода усилителя напряжение U_{out} передается на диагональ питания моста через сопротивление обратной связи R_f . Сопротивление R_f и суммарное сопротивление моста R_m образуют делитель напряжения. С учетом делителя изменение напряжения в диагонали питания моста будет равно произведению $F U_{out}$, где $F = R_m / (R_m + R_f)$ – делитель напряжения. Для равноплечего моста $R_m = R_1$.

Изменение напряжения питания моста под действием U_{out} передается на болометр через делитель $M_2 = R_b / (R_1 + R_b)$. При малых сигналах изменение сопротивления болометра ΔR_b много меньше сопротивления R_1 , поэтому для равноплечего моста $R_b = R_1$ и $M_2 = 0,5$.

Изменение напряжения на болометре под влиянием отрицательной обратной связи ведет к изменению выделяющейся в нем джоулевой мощности ΔP , что частично компенсирует действие поглощенной

оптической мощности, при этом $R_b \rightarrow R_1$ и разбаланс моста уменьшается. С учетом вышесказанного приращение сопротивления ΔR_b и, следовательно, напряжение разбаланса моста в режиме с АОС будут определяться некомпенсированной мощностью поглощенного оптического излучения $(P_{opt} - \Delta P)$.

Полагая, что изменение сопротивления болометра мало, запишем выражение для изменения джоулевой мощности болометра

$$\Delta P = \Delta U_b I_b + U_b \Delta I_b = 2 \Delta U_b I_b, \quad (2)$$

здесь U_b и I_b – напряжение и ток через болометр при сбалансированном мосте, а ΔU_b и ΔI_b – приращения напряжения и тока болометра при изменении напряжения питания моста U_m под действием обратной связи.

С учетом F и M_2 изменение напряжения на болометре в режиме с АОС

$$\Delta U_b = F M_2 U_{out}. \quad (3)$$

Без учета обратной связи сигнал на выходе схемы равен $U_{out} = S_V^* P_{opt} M_1 K$, где M_1 – коэффициент передачи изменения напряжения болометра, вызванного оптическим сигналом к выходу моста. Для равноплечего моста $M_1 = 0,5$.

В схеме с АОС из поглощенной на входе оптической мощности вычитается изменение электрической мощности болометра ΔP , в этом случае выражение для сигнала на выходе схемы будет иметь вид

$$U_{out} = S_V^* (P_{opt} - \Delta P) M_1 K = S_V^* P_{opt} M_1 K - 2 S_V^* I_b F M_2 U_{out} M_1 K. \quad (4)$$

Перепишем выражение (4) как отношение напряжения на выходе схемы к поглощенной мощности

$$\frac{U_{out}}{P_{opt}} = \frac{S_V^* M_1 K}{1 + 2 S_V^* M_1 I_b M_2 F K}. \quad (5)$$

В выражении (5) записана чувствительность схемы. Разделив отношение (5) на коэффициент усиления K , получим вольт-ваттную чувствительность, приведенную к выходу моста. Учитывая $M_1 = 0,5$ и $M_2 = 0,5$, выражение (1) и соотношение

$$S_V^* I_b = \frac{P \beta}{G} \frac{1}{1 + i\omega\tau_0} = L_0 \frac{1}{1 + i\omega\tau_0}, \quad (6)$$

вольт-ваттную чувствительность схемы в режиме с отрицательной электротепловой АОС, приведенную к выходу моста при $\epsilon = 1$, можно выразить как

$$S_V = \frac{1}{I_b} \frac{0,5 L_0}{1 + 0,5 L_0 F K} \frac{1}{1 + i\omega\tau_e}, \quad (7)$$

где эффективная постоянная времени

$$\tau_e = \frac{\tau_0}{1 + 0,5 L_0 F K}. \quad (8)$$

Шумы

Собственный шум болометра обусловлен тремя основными компонентами: джонсоновским шумом, фоновым шумом и $1/f$ -шумом. Без учета электротепловой обратной связи суммарное напряжение шума в полосе 1 Гц составит [3]

$$U_n^* = \sqrt{4kT_b R_b + S_V^2 4kT_b^2 G + \frac{\alpha_H}{NV_0 f^a} U_b^2}, \quad (9)$$

где k – постоянная Больцмана, T_b – температура болометра, α_H – параметр Хоуге, N – концентрация носителей заряда, V_0 – объем ВТСП, a – параметр, как правило, равный 1.

Для оценки действия АОС на шум болометра используем блок-схему, рассмотренную при выводе выражения для чувствительности болометра (рис. 2). На входе вместо поглощенной оптической мощности $P_{\text{опт}}$ подставляем мощность шума болометра U_n^*/S_V^* . Все последующие преобразования для мощности шума аналогичны преобразованиям, рассмотренным для поглощенной мощности оптического излучения.

В результате, заменив в выражении (5) оптическую мощность напряжения на мощность шума болометра и произведя необходимые преобразования, получим частотную зависимость напряжения шума болометра, приведенную к выходу моста:

$$U_n = U_n^* \frac{0,5(1 + \omega^2 \tau_0^2)^{1/2}}{((1 + 0,5L_0 FK)^2 + \omega^2 \tau_0^2)^{1/2}}. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что на малых частотах при $f \ll 1/(2\pi\tau_0)$ будет наблюдаться подавление напряжения шума в $(1 + 0,5L_0 FK)$ раз. По мере увеличения частоты подавление будет уменьшаться, и при частотах $f \gg 1/(2\pi\tau_0)$ влияние АОС практически не наблюдается.

Эксперимент

В эксперименте исследовался GdBaCuO-болометр на Si/Si₃N₄-мембране в режиме с отрицательной электротепловой АОС при использовании электронной схемы с мостовым включением болометра (рис. 1). Тот же болометр исследовался в режиме с постоянным током смещения (ПТС) в схеме с нагрузочным сопротивлением и с другим усилителем.

Технология изготовления мембранного болометра описана в работе [2]. Исследуемый болометр имел приемную площадку $A = 0,85 \times 0,85$ мм, постоянную времени $\tau_0 = 50$ мс и высокий коэффициент поглощения $\epsilon = 0,7$, обусловленный поглощающим покрытием (золотая чернь). Другие параметры болометра представлены в таблице.

Значения параметров ВТСП болометра при различных режимах работы

Параметр	Режим		
	ПТС	АОС	АОС
T_0 , К	84,3	84,3	79,2
R_b , кОм		4,7	
β , К ⁻¹	0,9	—	—
G , Вт/К		$1,2 \times 10^{-5}$	
τ_0 , мс	50	7	1,2
$f_{\text{св-оп}}$, Гц	3	23	133
I_b , мкА	40	40	150
S_V , кВ/Вт	5,3	0,35	0,1
U_n , В/Гц ^{1/2}	65×10^{-9}	14×10^{-9}	12×10^{-9}
NEP, Вт/Гц ^{1/2}	12×10^{-12}	40×10^{-12}	120×10^{-12}
D^* , см ^{1/2} Гц ^{1/2} /Вт	$7,1 \times 10^9$	$2,1 \times 10^9$	$0,7 \times 10^9$

Примечание. T_0 – температура подложки (в токовом режиме приблизительно равна температуре ВТСП пленки). При измерении чувствительности использовалось АЧТ ($T = 373$ К).

Необходимо отметить, что в режиме с АОС в отличие от режима ПТС используется мостовая схема, при этом измеряемой величиной является не изменение падения напряжения на болометре, а напряжение разбаланса моста.

На рис. 3 представлены экспериментальные и расчетные частотные зависимости чувствительности схемы в относительных единицах. По сравнению с режимом ПТС в режиме с АОС наблюдается существенное увеличение быстродействия и уменьшение чувствительности схемы. Наименьшее значение постоянной времени болометра $\tau_0 = 1,2$ мс (в 42 раза меньше собственной постоянной времени) было получено при токе 150 мкА. Однако при этом чувствительность уменьшилась в 46 раз.

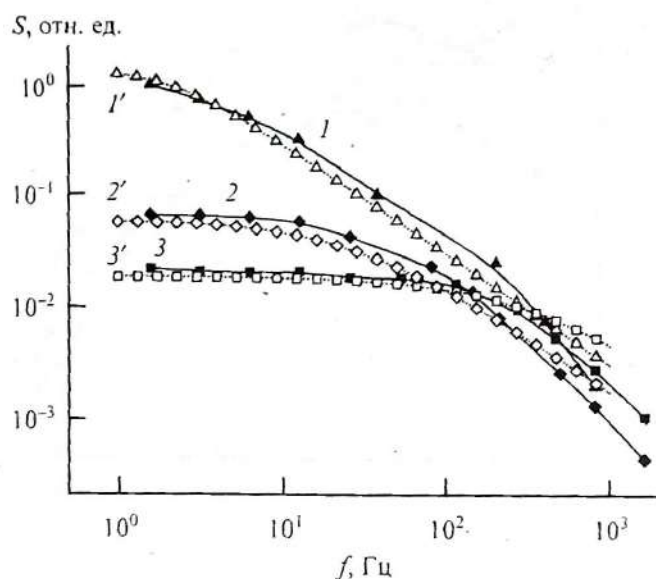


Рис. 3. Частотные зависимости вольт-ваттной чувствительности S_v в режимах ПТС (1, 1') и АОС (2, 2', 3, 3'). 1–3 – эксперимент, 1'–3' – расчет. $I_b = 40$ (1, 1', 2, 2'), 150 мкА (3, 3').

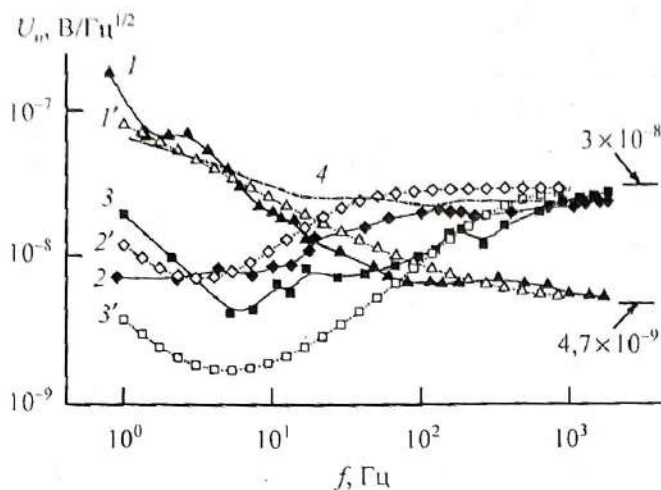


Рис. 4. Частотные зависимости напряжения шума U_n в режимах ПТС (1, 1') и АОС (2, 2', 3, 3'). 1–3 – эксперимент, 1'–3' – расчет. Приведены уровни джонсоновского шума сопротивлений R_f ($T = 293$ К) в режиме АОС (3×10^{-8} В/Гц $^{1/2}$) и джонсоновского шума болометра R_b ($T = 84$ К) в ПТС ($4,7 \times 10^{-9}$ В/Гц $^{1/2}$). $I_b = 40$ (1, 1', 2, 2'), 150 мкА (3, 3'). 4 – шум схемы АОС.

Был проведен расчет частотных зависимостей чувствительности для режима ПТС и АОС. В режиме ПТС использовалось известное выражение для чувствительности болометра с учетом ЭОС [2]. В режиме АОС расчет проводился по предложенному выражению для чувствительности (7). Предполагалось, что значение β в режиме с АОС такое же, как и в режиме ПТС. Расчетные результаты представлены на рис. 3. Было получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений чувствительности и постоянной времени.

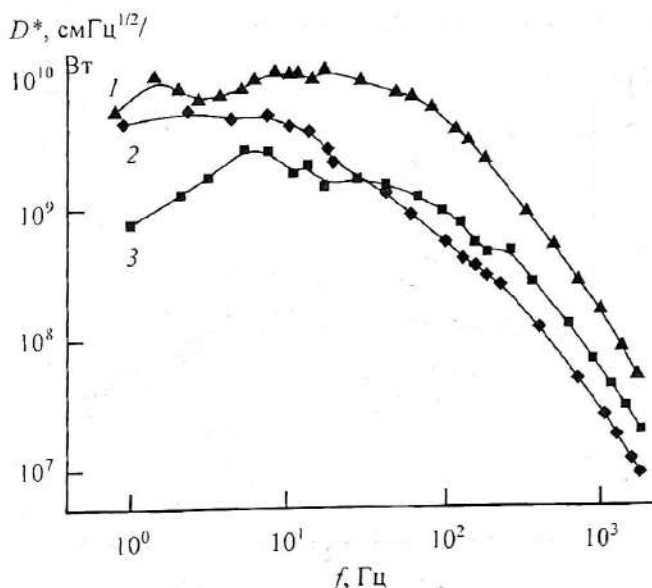


Рис. 5. Частотные зависимости обнаружительной способности D^* . Экспериментальные результаты. Режим АОС исследовался при токах через болометр 40 мкА, 150 мкА, режим ПТС при токе 40 мкА.

На рис. 4 представлены частотные зависимости напряжения шума болометра в режимах АОС и ПТС для нескольких значений тока. В режиме АОС на низких частотах наблюдается подавление напряжения шума болометра. Кроме собственного шума болометра в режиме АОС подавлялся шум электронной схемы (штрихпунктирная линия на рис. 4), который, к сожалению, был достаточно высок и определялся избыточным шумом микросхемы и джонсоновским шумом сопротивлений $R_f = 26$ кОм (рис. 1). Полученный в эксперименте собственный шум схемы учитывался при проведении расчета для режима с АОС.

Согласно выражению (10) увеличение тока смещения ведет к увеличению подавления напряжения шума. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей напряжения шума показывает хорошее их совпадение при малых значениях тока через болометр, однако при значениях тока больше тока тепловой неустойчивости расчет не совпадает с экспериментом в области низких частот (рис. 4). Расхождение экспериментальных и расчетных зависимостей напряжения шума в АОС может быть объяснено двумя факторами. Во-первых, возможен неучтенный рост избыточного $1/f$ -шума болометра, так как его поведение в этом режиме может не описываться использованным нами выражением и, возможно, имеет более сильную зависимость от тока и частоты. Во-вторых, при больших токах болометр работает в неизотермическом режиме, что может привести к уменьшению температурного коэффициента сопротивления и снижению коэффициента подавления $L_0 MK$ в выражении (10).

Тем не менее, уменьшение напряжения шума не позволило получить увеличение обнаружительной способности болометра ($D^* = A^{1/2}/NEP$, где A – площадь приемника, $NEP = U_n/S_f$ – эквивалентная мощность шума). На рис. 5 представлены экспериментальные частотные зависимости D^* , полученные в режиме ПТС и АОС. Точечный режим имеет наибольшее значение D^* во всем исследованном частотном диапазоне. Меньшую обнаружительную способность в режиме АОС можно объяснить существенным вкладом избыточного $1/f$ -шума и джонсоновского шума электронной схемы, а также возрастанием токового $1/f$ -шума болометра при токе 150 мкА. В соответствии с предложенной расчетной моделью уменьшение избыточного $1/f$ -шума и джонсоновского шума электронной схемы до уровня джонсоновского шума сопротивления моста позволит в режиме АОС достичь уровня обнаружительной способности режима ПТС.

Экспериментальные значения D^* , NEP , S_f и U_n , полученные в режимах АОС и ПТС для частот отсечки $f_{cut-off}$ представлены в таблице.

Выводы

Предложена расчетная модель для ВТСП болометра в режиме с отрицательной электротепловой АОС. Полученные результаты расчетного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными результатами только в изотермическом режиме, т. е. при малых токах смещения. При токе смещения, большем тока тепловой неустойчивости, наблюдается сильный рост избыточного шума болометра и шумовые характеристики ухудшаются. Показано, что использование отрицательной электротепловой АОС для ВТСП болометров повышает быстродействие и подавляет напряжение шума болометра и цепи электронной обратной связи, однако не дает выигрыша в обнаружительной способности. Повысить обнаружительную способность в режиме АОС до уровня, полученного в ПТС, можно при снижении шума электронной схемы.

Работа проведена при частичной поддержке программы "Ведущие научные школы", грант № 00-15-99067 и ФЦП "Интеграция", проект № Б-0034. Авторы выражают благодарность W. Michalke за подготовку болометров для экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neff H., Laukemper J., Khrebtov I.A. et al. Sensitive high- T_c transition edge bolometer on a micromachined silicon membrane // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 66. P. 2421–2423.
2. De Nivelle M.J.M.E., Bruijn M.P., de Vries R. 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.
3. Khrebtov I.A. Noise properties of high temperature superconducting bolometers // *Fluctuation and Noise Letters*. 2002. V. 2. № 2. P. R51–R70.
4. Lee A.T., Gildemeister J.M., Lee S.-F., Richards P.L. Voltage-based high- T_c superconducting infrared bolometers with strong electrothermal feedback // *IEEE Trans. Appl. Sup.* 1997. V. 7. P. 2378–2381.
5. Neff H., Lima A.M.N., Deep G.S. et al. Non-linearity and electrothermal feedback of high- T_c -transition edge bolometers // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 76. P. 640–642.
6. 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.