

ГЛУБОКООХЛАЖДАЕМЫЙ ГЕРМАНИЕВЫЙ БОЛОМЕТР ДЛЯ БЛИЗКОЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ

Н. А. Панкратов и В. П. Коротков

Приводятся характеристики глубокоохлаждаемого болометра из $p\text{-Ge} + \text{Ga}$, компенсированного Sb, зачерненного золотой чернью. Болометр охлаждался до температуры 4.23°K и имел постоянную времени $2.5 \cdot 10^{-3}$ сек. Его эквивалентная мощность шума в области спектра $1 \div 25$ мкм на порядок превосходит ЭМШ оптико-акустического приемника.]

С тех пор как Лоу предложил первый глубокоохлаждаемый болометр из $p\text{-Ge} + \text{Ga}$ [1], появилась целая серия работ этого направления [2-9]. Характеристики болометров из n и $p\text{-Ge}$ с разным содержанием примесей оказались чрезвычайно противоречивы, а результаты, опубликованные Лоу в первой же статье, не удалось получить ни в одной из последующих работ. Основная причина большого расхождения заключалась в том, что ЭМШ болометров определялись разными способами. В упомянутой работе Лоу характеристики болометра являются просто составленными из характеристик двух болометров (см. таблицу, болометры № 1 и 2), поэтому попытка Адни [5, 6] объяснить невоспроизводимость результатов оказалась тщетной. Непосредственное сравнение чувствительности болометра в спектрометре фирмы Perkin Elmer относительно приемника

Характеристики болометров

Параметр	Величина параметра	
	болометр № 1	болометр № 2
Размер чувствительного элемента, мм ²	7×0.8	7×0.8
Спектральная область чувствительности, мкм	$0.5 \div 50$	$0.5 \div 50$
Угловое поле чувствительности, стер.	$\pi/15$	$\pi/15$
Коэффициент поглощения, %	85	85
Температура гелиевой ванны, °K	4.23	4.23
Сопротивление болометра, ом	$2.46 \cdot 10^5$ ($3.3 \cdot 10^5$)	$1.1 \cdot 10^5$ ($1.9 \cdot 10^5$)
Ток смещения, мка	4	4
Тепловая проводимость, Вт·K ⁻¹	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Вольт-ваттная чувствительность, * В·Вт ⁻¹	$8 \cdot 10^3$ ($1.6 \cdot 10^4$)	$6 \cdot 10^3$ ($1.5 \cdot 10^4$)
Постоянная времени, τ	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$ **
Частота модуляции, Гц	12.5	12.5
Средний квадратичный шум (в·Гц ^{-1/2}): усилителя	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$
болометра	$3.1 \cdot 10^{-8}$	$3.5 \cdot 10^{-8}$
Эквивалентная мощность шума, Вт·Гц ^{-1/2}	$3.8 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-12}$

* Вольт-ваттная чувствительность определена из вольт-амперной характеристики.

** Постоянная времени этого болометра составляет $2.5 \cdot 10^{-3}$ на $\lambda = 1.4$ мкм, на других длинах волны постоянная времени уменьшается (см. в тексте).

Голея [4] дало увеличение разрешения прибора в области спектра $100\div 200$ мкм лишь в 3 раза. В работе Адни выигрыш в чувствительности в далекой ИК-области составил 18 раз [5, 6]. В большинстве упомянутых работ болометры были предназначены для ИК-области, их чувствительные элементы делались сравнительно толстыми и охлаждались до температур $0.3\div 1.7^\circ\text{K}$. В результате глубокого охлаждения теплоемкость спектроскопических исследований. Радиация в этих болометрах поглощалась решеткой и примесями в самом чувствительном элементе, а иногда нанесенной на поверхность специальной краской [7]. Относительно «бархатистой» черни указывалось, что ее применение не было эффективным [8]. Некоторые параметры глубокоохлаждаемых болометров в близкой инфракрасной области приводятся лишь в одной работе [9], но в ней нет спектральных характеристик.

Ниже дается описание устройства болометра для близкой инфракрасной области, некоторые его характеристики, а спектральная чувствительность сравнивается со спектральной чувствительностью оптико-акустического приемника.

Устройство болометра

Чувствительный элемент болометра изготовлен из $p\text{-Ge}+\text{Ga}$, компенсированного Sb. Концентрация примесей выбиралась такой, чтобы получилось нужное сопротивление чувствительного элемента, а проводимость оставалась «прыжковой». Концентрация компенсирующей примеси выбиралась оптимальной в соответствии с опубликованными ранее расчетами [10] и составляла 6%. В использованном материале удельное сопротивление при комнатной температуре было $0.1\text{ ом}\cdot\text{см}$, $N_a=5.7\times 10^{16}\text{ см}^{-3}$, $N_d=3.5\cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$. При температуре 4.3°K температурный коэффициент $\alpha=-1.5\text{ град}^{-1}$. В местах контактов на поверхность Ge осаждались золото и индий. С другой стороны, на поверхность чувствительного элемента в вакууме нанесены (служившая в качестве изолятора) моноокись кремния толщиной около 0.3 мкм и золотая чернь. Толщина черни выбиралась такой, чтобы при однократном прохождении радиации поглощалось около 70%.

Для охлаждения болометры вместе с нагрузочным сопротивлением помещались в вакуумном пространстве криостата, в котором экран охлаждался испарившимся гелием [11, 12]. Емкость криостата равнялась 1.5 л и обеспечивала возможность работы в течение 15 час. Окно из CsJ в этом криостате находилось на боковой поверхности, размер охлажденной диафрагмы и расположение ее относительно приемника обеспечивали угловое поле чувствительности $\pi/15$ стер. Охлажденные фильтры ни на экране, ни непосредственно перед болометром не устанавливались, поэтому излучение фона вызывало изменение характеристик болометра (сопротивление, чувствительность, шум) и повышало испаряемость гелия. В криостате в отличие от работы [8] температура ванны с помощью ротационного насоса со скоростью откачки $16\text{ л}\cdot\text{сек}^{-1}$ получалась равной 1.7°K .

Характеристики болометров

Для получения максимальной чувствительности (см. таблицу) при выбранной спектральной области и угловом поле чувствительности тепловая проводимость экспериментально выбрана равной $1.5\cdot 10^{-4}\text{ вт/град}^1$. Даже при такой довольно большой тепловой проводимости сопротивление, чувствительность и ЭМШ болометров оказываются разными, когда чувствительный элемент закрыт охлажденным металлическим экраном

¹ Такая же величина получилась и в результате расчетов на оптимум чувствительности и ЭМШ, выполненных П. Н. Никифоровым.

и открыт для излучения фона и сигнала. Характеристики открытых болометров в таблице записаны первыми, закрытых — в скобках.

Величины вольт-ваттной чувствительности рассчитаны из вольт-амперных характеристик. В открытом криостате чувствительность уменьшается в два раза. Постоянная времени болометров измерялась в разных областях спектра по частотным характеристикам. У болометра № 1 она оставалась неизменной на $\lambda=1.6, 4.3, 13.1$ мкм и равной $2.5 \cdot 10^{-3}$ сек. У болометра № 2 при $\lambda=1.4$ мкм постоянная времени равнялась $2.5 \cdot 10^{-3}$ сек. При больших длинах волн частотная характеристика шла более полого, но не соответствовала одной постоянной времени.

Эквивалентная мощность шума этих болометров по электрическим измерениям отличается в 1.5 раза, по оптическим $\sim$ в 2.5 раза. Расхождение объясняется, по-видимому, разным поглощением черни. Косвенно это подтверждается отличием фотоэффекта в чувствительном элементе под слоем черни. У болометра № 2 он примерно в 1.9 раза больше.

Спектральная чувствительность болометров

Спектральная чувствительность болометров определялась путем сравнения со спектральной чувствительностью оптико-акустического приемника ОАП-5 на монохроматоре прибора ИКС-12. Для удобства размещения приемника ОАП-5 и криостата с болометром осветитель с глобаром был установлен за выходной щелью обычного размещения, а

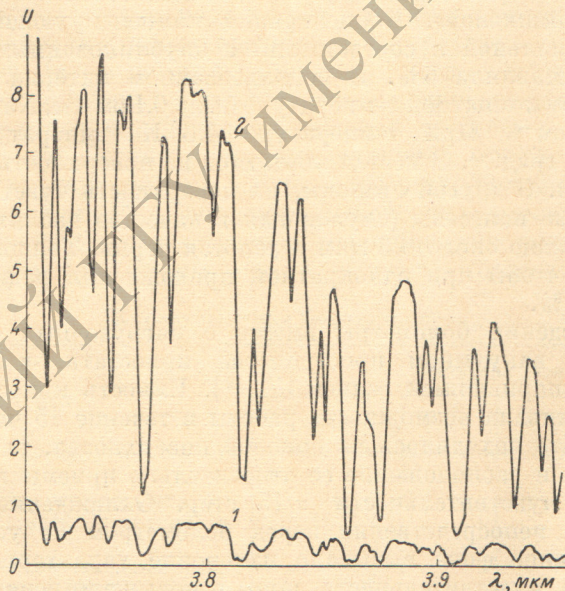


Рис. 1. Спектрограммы в области 3.7–4 мкм.

1 — оптико-акустический приемник, 2 — болометр.

приемники — слева от монохроматора. Изображение выходной щели на приемник проецировалось сферическим зеркалом, обычно используемым в этом приборе в приставке для измерения коэффициентов отражения. Переброска изображения одного приемника на другой осуществлялась поворотом на некоторый угол плоского зеркала.² Поверхности металлического модулятора были отполированы, а сам модулятор был установлен перед входной щелью. В противном случае из-за высокой чувствительности болометра обнаруживались помехи, вызванные неодинаковой температурой диска и некоторым отличием излучательной способности по поверхности.

² Эта переделка прибора была осуществлена М. В. Робачевским.

Регистрация спектров поглощения атмосферы в приборе обоими приемниками осуществлялась при одних и тех же щелях, а шум устанавливался одинаковым в обоих случаях регулировкой коэффициента усиления. Регистрация сигналов осуществлялась по очереди с обеспечением

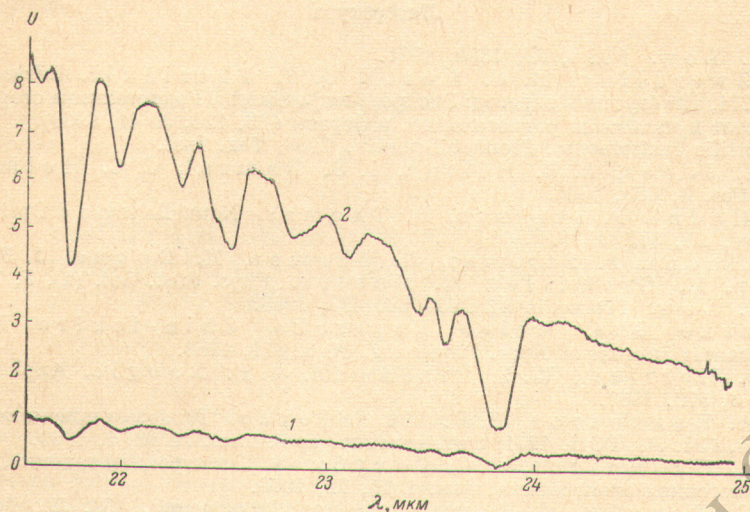


Рис. 2. Спектрограммы в области 21÷25 мкм.

1 — оптико-акустический приемник, 2 — болометр.

постоянства напряжения питания глобара. Таким путем спектры регистрировались с разными призмами, перекрывая область от видимой до 25 мкм. На рис. 1 и 2 приведены для сравнения спектры в области 3.7÷4 и 21÷25 мкм. Сравнивая эти спектрограммы, легко заключить, что болометр дает отношение сигнала к шуму в 10 раз больше, чем ОАП. В широкой области спектральная чувствительность болометра оказывается равномерной (рис. 3). Исключение составляет лишь область границы поглощения германия. Здесь за счет фотопроводимости чувствительность резко возрастает и ЭМШ охлажденного приемника почти в 100 раз больше, чем у ОАП-5. На самом деле эта величина значительно больше, так как около 80% падающей на приемник радиации поглощается золотой чернью и участия в фотопроводимости не принимает. Полярность фотопроводимости у большинства приемников не совпадает с полярностью сигнала, развиваемого болометром (рис. 3, кривая 2), а у некоторых она оказывалась одинаковой. В этом случае постоянная времени фотопроводимости оказывалась такой же, что и болометра в других областях спектра. Здесь не интерпретируется возможный механизм фотопроводимости, так как экспериментальных данных недостаточно. Величина же фотопроводимости без черни соответствует ЭМШ $\sim 10^{-15}$ Вт·Гц $^{-1/2}$.

Все приведенные характеристики были получены при температуре ванны 4.23° К и реализуются они более простыми средствами — без откачки паров гелия. Другими авторами подобные результаты получались при более низких температурах. Адни, например, откачивая пары жидкого гелия ротационным насосом производительностью 33 л·сек. $^{-1}$

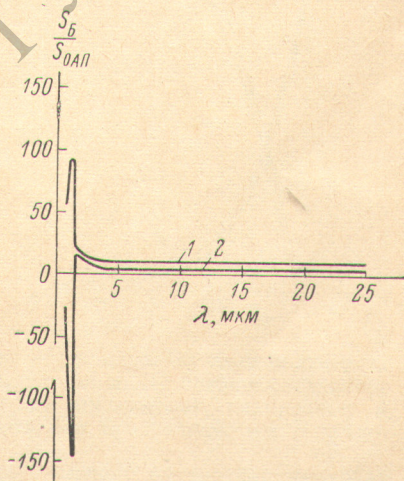


Рис. 3. Относительная спектральная чувствительность.

1 — болометра № 1, 2 — болометра № 2.

(100 м³·час⁻¹) и охладив приемник до 1.5° К в дальней ИК области, где излучение фона значительно меньше, удалось получить с болометром ЭМШ всего в 18 раз лучше, чем ОАП [5, 6].

Литература

- [1] F. I. Low. JOSA, 51, 1300, 1961.
- [2] S. Zwerdling, R. A. Smith, J. P. Theriault. Infrared Phys., 8, 271, 196 (русский перевод: Экспресс-информация, Радиотехника сверхвысоких частот и квантовая радиотехника, рефераты 123, 124, № 41, 1969).
- [3] Scientific Instruments, Product Bulletin, C163, Tex. Inst.
- [4] C. E. Jones, A. R. Hilton, I. B. Damrel, C. C. Helms. Appl. Optics, 4, 683, 1965.
- [5] A. Hadni, P. Strimer, R. Thomas. Nouvelle revue d'Optique appliquée, B2, 379, 1971.
- [6] A. Hadni, P. Strimer, R. Thomas, M. Duque, J. F. Coul-
lin, M. Gremillet, M. Moulin. Phys. Stat. Sol. (a), 5, 707, 1971.
- [7] F. I. Low. Proceedings IEEE, 54, 477, 1966.
- [8] Jasako Oka, Keigo Nagasaka, Shin-ichiro Narita.
Japanese Journal of Appl. Physics, 7, № 6, 611, 1968.
- [9] I. D. Merriam, W. L. Eisenman, A. B. Naugle. Appl. Optics, 6,
№ 3, 576, 1967.
- [10] Н. А. Панкратов, П. Н. Никифоров. Тепловые приемники излу-
чения. 134. Л., ГОИ, 1971; Опт.-механич. промыш., № 12, 1, 1969.
- [11] Н. А. Панкратов, В. С. Голубков. Электронная техника, серия 15,
Криогенная электроника, вып. 1 (2), 72, 1970.
- [12] В. С. Голубков. Тепловые приемники излучения. 158. Л., ГОИ, 1971.

Поступило в Редакцию 23 марта 1973 г.