

УДК 621.317.794 : 621.391.829

Ф. ЮНОСОВ, И. В. КОРАБЛЕВ, В. В. ПОТЕМКИН

## О ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БОЛОМЕТРОВ

Исследуются собственные шумы и пороговые характеристики полупроводниковых болометров, используемых при комнатных температурах. Показано, что на частотах порядка 10 гц спектр собственного шума болометра имеет вид  $1/f^\alpha$ , где  $\alpha \approx 1$ . Экспериментально найдено, что величина минимальной обнаруживаемой мощности  $P_m$  равна  $10^{-9}$  вт·гц<sup>-1/2</sup>. Определены оптимальные значения параметров, задающих режим работы болометра и минимизирующих величину  $P_m$ .

Болометрические приемники инфракрасной радиации широко используются в спектроскопии и в системах обнаружения слабо излучающих объектов. Имеется немного работ, посвященных изучению пороговых характеристик болометров, и они носят в основном теоретический характер [1—5].

Чувствительность болометрических приемников излучения ограничивается их собственными шумами. В частности, в металлических болометрах с малой инерционностью и малым внутренним сопротивлением существенную роль играют температурные флуктуации [5, 6]. Для некоторых полупроводниковых болометров с большой инерционностью, применяемых при низких температурах, основными являются генерационно-рекомбинационные, а на частотах ниже 10 кгц — избыточные шумы [7]. В полупроводниковых болометрах, применяемых при комнатных температурах, преобладают тепловые и избыточные флуктуации [2], однако шумовые характеристики подобных болометров детально не изучались.

Данная работа — экспериментальное исследование собственных шумов и пороговых характеристик полупроводниковых оксидных-кобальто-марганцевых болометров типа БКМ-5 при комнатных температурах в различных режимах их работы.

### Собственные шумы болометров

Измерения собственных шумов болометров были выполнены методом сравнения. Исследуемый шум подавался на вход широкополосного усилителя (или узкополосного усилителя, настроенного на одну из следующих частот — 8, 10, 12, 5, 15 и 20 гц) и затем проводился спектральный анализ шума анализатором гармоник типа С5-3. Изме-

рения проводились для двух типов включения болометра в рабочую схему (рис. 1).

«Двойной болометр». В этом случае нагрузкой  $R_H$  активного элемента болометра  $R_a$  служил другой такой же болометрический элемент, носящий название компенсационного элемента  $R_h$ . Обычно  $R_a = R_h = 1/2 R$ , где  $R = R_a + R_h$  — полное сопротивление «двойного болометра».

«Одинарный болометр». В этом случае нагрузкой  $R_H$  активного элемента болометра  $R_a$  служило проволочное сопротивление  $r$ .

Исследуемый шум  $\overline{u^2}$  сравнивался с тепловым шумом активного сопротивления  $R_{эв}$ , и величина относительной шумовой

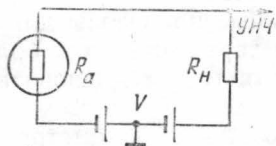


Рис. 1. Схема включения болометра

температуры болометра  $n$  вычислялась по формуле

$$n = \frac{\overline{u^2}}{4kT\Delta f} \frac{R_a + R_H}{R_a R_H}, \quad (1)$$

где  $\overline{u^2}$  — среднее квадратичное шумовое напряжение болометра,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура активного элемента болометра,  $\Delta f$  — полоса пропускания усилителя или анализатора гармоник.

Относительная шумовая температура  $n$  для двух типов включения болометра определяется как

$$n_1 = \frac{\overline{u_1^2}}{4kT\Delta f} \frac{R_a + r}{R_a \cdot r}, \quad n_2 = \frac{\overline{u_2^2}}{kTR\Delta f}, \quad (2)$$

индексы 1 или 2 означают, что данная физическая величина относится к «одинарному» или «двойному» режимам соответственно.

Напряжение питания  $V$  подавалось на болометр от батареи аккумуляторов и регулировалось от 0 до 400 в. Установка термостатировалась в интервале температур от 0 до 50°C с точностью не ниже 0,1°C.

Представим тепловые и избыточные шумы болометра соответствующими генераторами шумового тока [2, 3]:

$$\overline{i_T^2} = 4kT \frac{R_a + R_H}{R_a R_H} \Delta f, \quad \overline{i_{ex}^2} = AI^\nu f^{-\alpha} \Delta f, \quad (3)$$

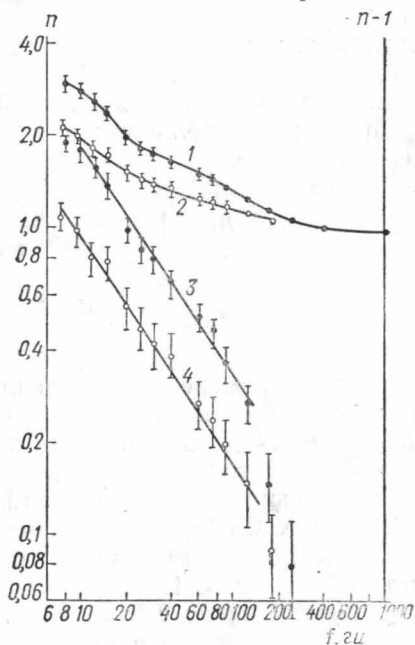


Рис. 2. Зависимость относительной шумовой температуры (кривые 1 и 2) и избыточного шума болометра  $\overline{i_{ex}^2}/\overline{i_T^2} = n - 1$ , выраженного в единицах  $n$  (кривые 3 и 4) от частоты наблюдения  $f$ . Кривые 1 и 3 соответствуют режиму двойного болометра, 2 и 4 — режиму одинарного болометра с согласованной нагрузкой  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $V = 200 \text{ в}$

где  $\overline{i_T^2}$  — среднеквадратичный ток теплового шума,  $\overline{i_{ex}^2}$  — среднеквадратичный ток избыточного шума,  $I$  — ток болометра,  $f$  — частота наблюдения,  $A, \gamma, \alpha$  — постоянные величины, характеризующие выбранный образец болометра.

Допуская, что избыточные и тепловые шумы статистически независимы, и считая, что активный и компенсационный элемент болометра идентичны по своим шумовым свойствам, мы можем, используя (2) и (3), представить величину  $n$  для двух типов включения болометра в виде

$$n_1 = 1 + \frac{A I^\gamma f^{-\alpha} R_{ar}}{4kT(R_a + r)} = 1 + \overline{i_{ex}^2} / \overline{i_T^2}, \quad (4)$$

$$n_2 = 1 + \frac{A I^\gamma f^{-\alpha} R}{8kT} = 1 + 2 \overline{i_{ex}^2} / \overline{i_T^2}.$$

Результаты измерений собственных шумов представлены на рис. 2, где приведены зависимости  $n$  от частоты наблюдения  $f$ . Там же показана зависимость избыточного компонента шума болометра, выраженная в единицах  $n$  от  $f$ , вычисленная согласно (4).

На всех рисунках экспериментальные данные приведены для болометра БКМ-5 № 158 гр. Б, свойства которого характерны для болометров типа БКМ-5. В дальнейшем для краткости будем именовать этот болометр образцом № 1.

Как видно из рис. 2, спектр собственного шума болометра имеет достаточно сложный вид и аппроксимируется функцией вида (4) лишь на малых частотных интервалах. Избыточные шумы проявляются в достаточной степени лишь на частотах ниже 100 гц.

Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что для всех исследованных болометров зависимость избыточного шума  $\overline{i_{ex}^2}$  от тока квадратичная ( $\gamma = 2 \pm 0,1$ ).

Величина  $A$  для образца № 1 в частотном интервале 10—90 гц имеет значение  $A = 4,4 \cdot 10^{-18} \pm 0,1 \cdot 10^{-18}$  и величина  $\alpha$  равна  $0,7 \pm 0,05$ . Для различных образцов болометра типа БКМ-5 величины  $A$  и  $\alpha$  заключены в пределах  $10^{-17} \div 10^{-18}$  и  $0,6 \div 0,8$  соответственно.

### Минимальная обнаруживаемая мощность

Общепринято характеризовать предельную чувствительность приемников излучения величиной минимальной обнаруживаемой мощности излучения  $P_m$ , которая по определению равна

$$P_m = \sqrt{\overline{u^2}} / S, \quad (5)$$

где  $\overline{u^2}$  — среднеквадратичное шумовое напряжение на выходе рабочей схемы болометра,  $S$  — коэффициент преобразования болометрического приемника.

Рассчитаем величину  $P_m$  для двух типов включения болометра при воздействии на него амплитудно модулированного излучения вида

$$P_{изл} = \frac{P}{2} [1 + \cos(2\pi f_m t)],$$

где  $f_m$  — частота модуляции.

Двойной болометр. Дифференциальные уравнения теплового баланса активного и компенсационного элементов болометра имеют вид

$$C \frac{d\Delta T_a}{dt} + \kappa \Delta T_a - \Delta W_a = \varepsilon \frac{P}{2} [1 + \cos(2\pi f_m t)], \quad (6)$$

$$C \frac{d\Delta T_k}{dt} + \kappa \Delta T_k - \Delta W_k = 0, \quad (7)$$

где  $C$  и  $\kappa$  — теплоемкость и константа тепловых потерь активного (компенсационного) элемента болометра соответственно<sup>1</sup>,  $\varepsilon$  — коэффициент поглощения излучения,  $\Delta W_a$ ,  $\Delta W_k$  — приращение мощности, отдаваемой источником питания активному и компенсационному элементам соответственно<sup>2</sup>,  $\Delta T_a = T_a - T$  — приращение температуры активного элемента, вызванное облучением болометра и изменением его тока,  $\Delta T_k = T_k - T$  — приращение температуры компенсационного элемента, вызванное изменением тока болометра,  $T$  — температура необлученного болометра,  $T_a$ ,  $T_k$  — температура активного и компенсационного элементов болометра при облучении активного элемента.

Температура необлученного болометра  $T$  определяется выражением

$$2(T - T_0)\kappa = VI = W, \quad (8)$$

где  $T_0$  — температура окружающей среды (фона),  $W$  — мощность потребляемая необлученным болометром от источника питания.

Уравнения (6) и (7) приближенные, так как записаны без учета краевых эффектов для потерь тепла элемента болометра, сложного распределения температуры по объему болометра и некоторых других эффектов. Приближение выражается в том, что мы считаем величины  $C$ ,  $\kappa$  и  $\varepsilon$  константами, тогда как физически они являются сложными функциями многих переменных.

Сопrotивление полупроводникового болометра  $R$  зависит от температуры  $T$  следующим образом:

$$R = R_0 \exp \left\{ \frac{\Delta E}{2k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}, \quad (9)$$

где  $\Delta E$  — ширина запрещенной зоны полупроводника,  $R_0$  — сопротивление болометра при температуре  $T_0$ .

Используя (9) и считая также, что активный и компенсационный элементы болометра идентичны, можно записать

$$\Delta W_a = \frac{\Delta E V^2}{4kT^2 R} \Delta T_k, \quad \Delta W_k = \frac{\Delta E V^2}{4kT^2 R} \Delta T_a. \quad (10)$$

По определению коэффициент преобразования  $S = \Delta U / \Delta P$ , где  $\Delta U$  — приращение напряжения на нагрузке болометра, вызванное приращением мощности излучения  $\Delta P$ , падающего на активный элемент болометра. В соответствии с рис. 1 и соотношениями (6) и (7) коэффициент преобразования  $S_2$  равен

$$S_2 = \frac{\Delta E V}{8PkT^2} (\Delta T_k - \Delta T_a). \quad (11)$$

<sup>1</sup> Считаем, что активный и компенсационный элементы идентичны.

<sup>2</sup> Если источником питания болометра служит генератор тока, то  $\Delta W_a = -\Delta W_k = 0$  [2].

Решив уравнения (6) и (7) с использованием выражений (10) и (11), получим для коэффициента преобразования  $S_2$  на частоте модуляции  $f_m = f$  выражение<sup>1</sup>

$$S_2 = \frac{\varepsilon V \Delta E}{16k\kappa T^2} [(2\pi\tau f)^2 + (1 + \varphi_2)^2]^{-1/2}, \quad (12)$$

где  $\tau = C/\kappa$  — постоянная времени болометра,  $\varphi_2 = \frac{\Delta E V^2}{4k\kappa T^2 R}$ .

За счет  $\varphi_2$  подкоренное выражение в (12) отличается от традиционного для инерционных приемников соотношения  $[(2\pi\tau f)^2 + 1]$ . Величина  $\varphi_2$  определяет ответную реакцию компенсационного элемента, являющегося нагрузкой болометра, на облучение активного элемента. Физический смысл этой реакции состоит в том, что уменьшение сопротивления активного элемента под действием облучения вызывает увеличение тока болометра, что приводит к дополнительному его разогреву за счет джоулева тепла, а следовательно, к уменьшению сопротивления в основном компенсационного элемента. Такая реакция нагрузки при достаточно больших напряжениях питания болометра  $V$  может сильно уменьшить величину коэффициента передачи  $S_2$ .

Из выражений (3), (5) и (12) с учетом того, что  $\gamma = 2$ , определим минимальную обнаруживаемую мощность двойного болометра:

$$P_{m2} = \frac{16k\kappa T^2 V \sqrt{\Delta f}}{\varepsilon \Delta E V} \left\{ [(2\pi\tau f)^2 + (1 + \varphi_2)^2] \left[ kTR + 2A \frac{V^2}{16} f^{-\alpha} \right] \right\}^{1/2}. \quad (13)$$

Одинарный болометр. Уравнение теплового баланса одинарного болометра имеет вид (6), где в данном случае

$$\Delta W_a = \frac{\Delta E V^2 R_a (R_a - r)}{2kT^2 (R_a + r)^3} \Delta T_a. \quad (14)$$

и, следовательно, коэффициент преобразования «одинарного болометра» на частоте модуляции  $f_m = f$  определяется выражением

$$S_1 = \frac{\Delta E V}{16k\kappa T^2} \frac{4R_a r}{(R_a + r)^2} [(2\pi\tau f)^2 + (1 - \varphi_1)^2]^{-1/2}. \quad (15)$$

Здесь

$$\varphi_1 = \frac{\Delta E V^2}{4k\kappa T^2 R_a} \frac{2R_a^2 (R_a - r)}{(R_a + r)^3}.$$

Величина  $\varphi_1$  в выражении (15) появляется в силу того, что при облучении болометра его сопротивление уменьшается, что приводит к увеличению тока болометра и дополнительному его разогреву. Этот эффект может привести к заметному увеличению коэффициента преобразования при условии, что  $r < R_a$  и  $\varphi_1 \approx 1$ . Однако условие  $\varphi_1 \approx 1$  практически неосуществимо, так как его реализация связана с подачей на болометр недопустимо высокого напряжения питания  $V$ . Для одинарного болометра с согласованной нагрузкой величина  $\varphi_1 = 0$ .

Из (3), (5) и (15) получим выражение для минимальной обнаруживаемой мощности согласованного одинарного болометра

$$P_{m1} = \frac{16k\kappa T^2 V \sqrt{\Delta f}}{\varepsilon \Delta E V} \left\{ [(2\pi\tau f)^2 + 1] \left[ 2kTR_a + \frac{A}{16} V^2 f^{-\alpha} \right] \right\}^{1/2}. \quad (16)$$

<sup>1</sup> Считаем, что мощность излучения мала по сравнению с мощностью, потребляемой болометром от источника питания  $P_{изл} \ll V^2/R$ .



## Оптимальный режим работы болометра

Анализ выражений (13) и (16) показывает, что при заданных температуре и напряжении питания болометра существует оптимальное значение частоты модуляции  $f_{\text{опт}}$ . Приближенные выражения  $f_{\text{опт}}$  для двойного и одинарного болометров имеют вид

$$f_{\text{опт2}} \approx \left[ \frac{\alpha AV^2}{[16kTR(2\pi\tau)^2]} \right]^{1/(2+\alpha)}, \quad f_{\text{опт1}} \approx \left[ \frac{\alpha AV^2}{64kTR_a(2\pi\tau)^2} \right]^{1/(2+\alpha)}. \quad (17)$$

При заданных значениях температуры  $T_0$  и частоты модуляции  $f_m$  минимальная обнаруживаемая мощность  $P_m$  как функция  $V$  имеет минимум, который достигается при

$$V_{\text{опт2}} \approx \left[ \frac{16k^2 \times T^3 R^2 f_m^\alpha}{\Delta EA} \right]^{1/4}, \quad V_{\text{опт1}} \approx \left[ \frac{4R_a(\Delta E - 10kT) f_m^\alpha}{A} \right]^{1/2} \quad (18)$$

для двойного и одинарного болометров соответственно.

Однако практически не рекомендуется подавать на болометр напряжение большее 60% от некоторого критического значения  $V_{\text{кр}}$  [8], определяемого из выражения  $\frac{dV}{dI} = 0$ .

Тогда, используя (8) и (9), можно найти, что максимальные напряжения питания «двойного» и «одинарного» болометров определяются соотношениями

$$V_{\text{max2}} \approx 0,6 \sqrt{\frac{4k \times T^2 R}{\Delta E}}, \quad V_{\text{max1}} \approx 0,6 \sqrt{\frac{2k \times T^2 (R_a + r)^2}{\Delta ER_a}}. \quad (19)$$

Таким образом, если  $V_{\text{опт2}} < V_{\text{max2}}$  или  $V_{\text{опт1}} < V_{\text{max1}}$ , то величину напряжения питания следует выбирать исходя из (18). В противном случае величина  $V$  берется равной  $V_{\text{max}}$ .

Подставляя (17) и (18) в (13), получим

$$P_m \sim T^{3/2}. \quad (20)$$

Для уменьшения  $P_m$  необходимо использовать болометр при минимально допустимой температуре. Разумеется, выражение (20) справедливо лишь в рабочем интервале температур болометра.

Сравнение выражений (13) и (16) показывает, что в оптимальном режиме работы с «одинарным болометром» можно получить величину минимальной обнаруживаемой мощности, на 30—40% меньшую, чем при работе с двойным болометром.

## Измерения минимальной обнаруживаемой мощности

Измерения минимальной обнаруживаемой мощности  $P_m$  проводились по следующей методике.

При заданном режиме работы болометра, т. е. при выбранных значениях температуры фона  $T_0$  и напряжении питания  $V$ , усиленное шумовое напряжение болометра подавалось на вход анализатора спектра, настроенного на частоту  $f = f_m$  (см. первый раздел), и производилась фиксация показания  $N_1$  выходного прибора анализатора. Затем активный элемент болометра подвергался облучению потоком радиации  $P_{\text{изл}} = \frac{P}{2} [1 + \cos(2\pi f_m t)]$  и производился новый отсчет показания  $N_2$  анализатора. При этом мощность излучения  $P$  выбиралась

такой, что величина  $N_2$  превышала величину  $N_1$  не более чем в 1,5 раза. Тогда

$$P_m = PN_1 / \sqrt{N_2^2 - N_1^2}.$$

Источником излучения служила модель абсолютно черного тела с температурой излучающей полости  $T_{изл}$ , превышающей температуру фона  $T_0$  на 5—10°C. Величина  $P$  вычислялась по формуле Стефана—Больцмана. Точность определения  $P$ —5%. Модуляция радиации производилась механическим способом. Так как полоса  $\Delta f$  системы изменилась в зависимости от частоты наблюдения, то производился пересчет величины  $P_m$  на единичную полосу пропускания.

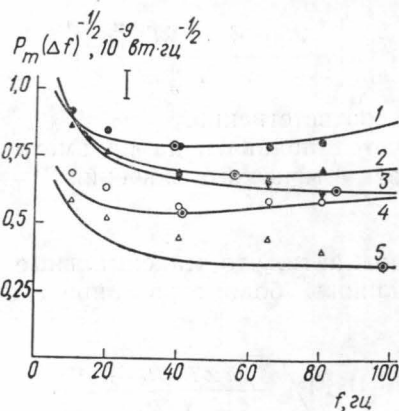


Рис. 3. Зависимость минимальной обнаруживаемой мощности  $P_m(\Delta f)^{-1/2}$  от частоты модуляции излучения  $f_m$  для двойного болометра: 1 —  $T_0 = 280^\circ \text{K}$ ,  $V = 200 \text{ в}$ ; 2 —  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $V = 200 \text{ в}$ ; 3 —  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $\dot{V} = V_{опт_2}$ ; и для одинарного болометра с согласованной нагрузкой: 4 —  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $V = 200 \text{ в}$ , 5 —  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $\dot{V} = V_{опт_1}$ . Кружком с точкой отмечены значения  $f_{опт-1/2}$ .

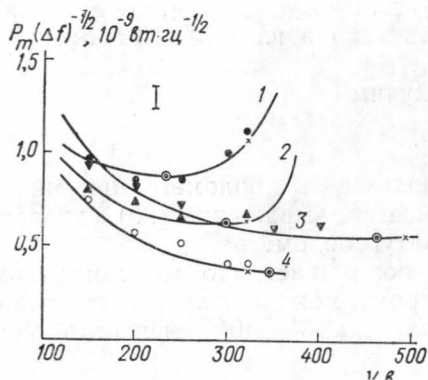


Рис. 4. Зависимость минимальной обнаруживаемой мощности  $P_m(\Delta f)^{-1/2}$  от напряжения питания  $V$  для двойного болометра: 1 —  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $f_m = 10 \text{ Гц}$ ; 2 —  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $f_m = f_{опт_2}$ ; 3 —  $T_0 = 280^\circ \text{K}$ ,  $f_m = f_{опт_2}$ ; и для одинарного болометра с согласованной нагрузкой: 4 —  $T_0 = 300^\circ \text{K}$ ,  $f_m = f_{опт_1}$ . Кружком с точкой отмечены вычисленные значения  $V_{опт}$ , крестиком —  $V_{max}$ .

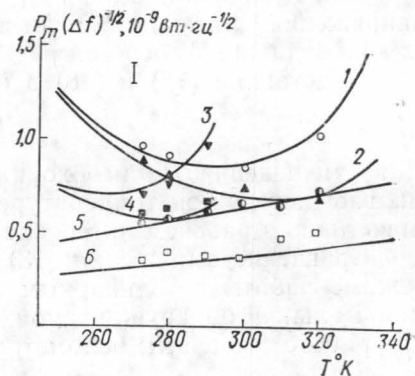


Рис. 5. Зависимость минимальной обнаруживаемой мощности  $P_m(\Delta f)^{-1/2}$  от температуры фона  $T_0$  для двойного болометра: 1 —  $f_m = 10 \text{ Гц}$ ,  $V = 200 \text{ в}$ ; 2 —  $f_m = f_{опт_2}$ ,  $V = 200 \text{ в}$ ; 3 —  $f_m = 10 \text{ Гц}$ ,  $V = 400 \text{ в}$ ; 4 —  $f_m = f_{опт_2}$ ,  $V = 400 \text{ в}$ ; 5 —  $f_m = f_{опт_2}$ ,  $V = V_{опт_2}$ ; и одинарного болометра с согласованной нагрузкой: 6 —  $f_m = f_{опт_1}$ ,  $V = V_{опт_1}$ .

Результаты измерений минимальной обнаруживаемой мощности  $P_m/\sqrt{\Delta f}$  в зависимости от частоты модуляции излучения  $f_m$ , напряжения питания  $V$  и температуры фона  $T_0$ , полученные для образца № 1,

представлены в виде точек на рисунках 3, 4 и 5. На рисунках также указана величина максимальной ошибки измерения.

Для сравнения с экспериментальными данными сплошными линиями показаны теоретические зависимости  $P_m/\sqrt{\Delta f}$  от  $f$ ,  $T_0$  и  $V$ , вычисленные по формулам (13) или (16) при условии, что  $\alpha=0,7$ ,  $A=4,4 \cdot 10^{-18}$  (см. первый раздел);  $\tau=1,2 \cdot 10^{-3}$  сек,  $R_a=364$  ком,  $R_h=374$  ком при температуре  $24^\circ\text{C}$  (паспортные данные);  $\Delta E=0,7$  эв,  $\kappa=10^{-2}$  вт/град [2, 8];  $\epsilon=1$ .

Из приведенных экспериментальных данных для образца № 1 следует, что оптимизация параметров работы болометра дает выигрыш в минимальной обнаруживаемой мощности в 3 раза по сравнению с общепринятым режимом включения болометров БКМ-5 ( $f_m=12,5$  гц,  $V=190$  в,  $T_0=300^\circ\text{K}$ ). Для других исследованных образцов был получен выигрыш в 2÷5 раз.

На рис. 5 даны также зависимости величины  $P_m/\sqrt{\Delta f}$  от температуры фона при условии, что  $f=f_{\text{опт}}$  и  $V=V_{\text{опт}}$  для двух типов включения болометров. Эти зависимости дают возможность оценить величину удельной детектирующей способности болометра  $D^*$ . По определению

$$D^* = \frac{\sqrt{F\Delta f}}{P_m},$$

где  $F$  — площадь приемной площадки активного элемента болометра.

Учитывая, что для БКМ-5  $F=1$  мм<sup>2</sup>, получим при температуре фона  $300^\circ\text{K}$  для двойного болометра  $D_2^*=1,6 \cdot 10^8$  см·вт<sup>-1</sup>·гц<sup>1/2</sup> и для «одинарного болометра»  $D_1^*=2,7 \cdot 10^8$  см·вт<sup>-1</sup>·гц<sup>1/2</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смит Р., Джонс Ф., Чесмер Р. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. М., 1959.
2. Марков М. Н. Приемники инфракрасного излучения. М., 1968.
3. Шоль Ж и др. Приемники инфракрасного излучения. М., 1969.
4. Barth G. Optic. XI, Bb 15, No. 11, s. 694, 1958.
5. Панкратов Н. А., Зайцев Г. А., Хребтов И. А. «Радиотехника и электроника», 15, вып. 9, 1903, 1970.
6. Barker G., Charlton D. E. Infrared phys., 8, 16, 1968.
7. Pajot B., Darviot Y., Sorrentino A., Joly B. Infrared phys., 7, 1, 1967.
8. Li S. C., Chen T. M. J. Appl. Phys., 38, 3449, 1967.

Поступила в редакцию  
22.2 1972 г.

Кафедра  
физики колебаний