

05.4; 07; 12

© 1991

МЕХАНИЗМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ
ВТСП-БОЛОМЕТРОМ

В.Н.А л ф е е в, С.Г.О р л о в, А.Н.С у х а н о в

Простейшая структура сверхпроводящего болометра включает в себя три элемента: сверхпроводящую пленку (СПП), подложку и термостат, который обеспечивает требуемую рабочую температуру прибора R_H (рис. 1, а). Для регистрации фототока болометр подключается к источнику напряжения через нагрузочный резистор R_H (рис. 1, б). При температуре жидкого азота предельное значение обнаружительной способности таких ВТСП-болометров, ограниченное флуктуациями фоновой мощности, достигается лишь в инерционных приборах с постоянной времени $\tau_0 \geq 0.1$ с [1]. Увеличение скорости теплоотдачи за счет использования подложек с высокой теплопроводностью уменьшает постоянную времени прибора. Однако при этом возрастает температурный шум, обусловленный флуктуациями теплообмена между СПП и подложкой. Расчеты показывают, что при быстродействии $\tau_0 \approx 10^{-3}$ с максимальное значение удельной обнаружительной способности $\frac{1}{2} \frac{D\lambda^*}{\lambda^2}$ ВТСП-болометра не превосходит величину $2 \cdot 10^9$ см Гц/Вт.

В настоящей работе рассматривается новый механизм работы ВТСП-болометра, позволяющий существенно увеличить быстродействие прибора без ухудшения обнаружительной способности.

Принципиальная схема включения болометра, реализующая предлагаемый механизм работы, показана на рис. 2, а. Болометр подключается ко входу дифференциального усилителя с параллельной обратной связью по напряжению с дополнительным источником напряжения U_0 , который обеспечивает постоянное смещение на болометре. Излучение сигнала, поглощаемое в СПП (или специальном поглотителе), вызывает увеличение ее средней по объему температуры на некоторую малую величину ΔT_S . При этом величина тока болометра уменьшается на величину, пропорциональную ΔT_S . Регистрируя изменение фототока, можно регистрировать и амплитуду сигнального излучения. Уменьшение тока болометра приводит также и к уменьшению джоулевой мощности, выделяемой в СПП вследствие прохождения тока. В предлагаемом механизме работы параметры системы выбираются такими, чтобы изменения температуры болометра, обусловленные поглощением излучения сигнала, компенсировались вариациями джоулевой мощности. При таком режиме работы болометра изменения его температуры ΔT_S малы. Соответственно будет мало и время релаксации температуры к стационарному значению, т.е. инерционность болометра. Так как в рассматриваемом случае быстродействие прибора не определяется скоростью теплоотдачи в тер-

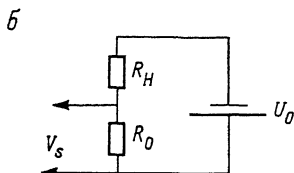
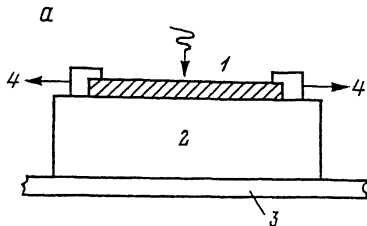


Рис. 1. Простейшая структура сверхпроводящего болометра (а), схема его включения (б): 1 - сверхпроводящая пленка, 2 - подложка, 3 - термостат, 4 - токовые контакты.

мостат, то для уменьшения температурного шума, обусловленного флуктуациями теплового потока, необходимо обеспечить минимальный теплообмен между СПП и термостатом. Последнее достигается в неизотермической структуре болометра за счет уменьшения площади теплового контакта между подложкой и термостатом (рис. 2, б) [2].

Для идеального операционного усилителя (ОУ) нетрудно получить, что в схеме показанной на рис. 2, а напряжение сигнала болометра определяется выражением:

$$\Delta V_s = R_o^{-1} R_{oc} U_o \alpha \Delta T_s, \quad (1)$$

где R_{oc} - сопротивление обратной связи; R_o - статическое сопротивление болометра; $\alpha = R_o^{-1} \frac{dR_o}{dT}$ - температурный коэффициент

сопротивления СПП. Величина ΔT_s определяется пространственно-временным распределением сигнальной компоненты температуры болометра $T_s(\vec{r}, t)$. Значение $T_s(\vec{r}, t)$ зависит от размеров СПП и подложки. Обычно на практике толщина СПП значительно меньше толщины подложки d , так что влиянием СПП на распределение температуры можно пренебречь. Ограничимся также рассмотрением тонких структур, в которых инерционность прибора τ_o существенно превосходит диффузионное время релаксации температуры по толщине подложки $t_1 = cd^2 \varkappa^{-1}$ (c, \varkappa - объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала подложки). Для тонких структур $t_1 \sim 10$ мкс ($c = 1$ Дж/см³ К; $\varkappa = 10^{-3}$ Вт/см К; $d = 1$ мкм). В этом случае температуру вдоль

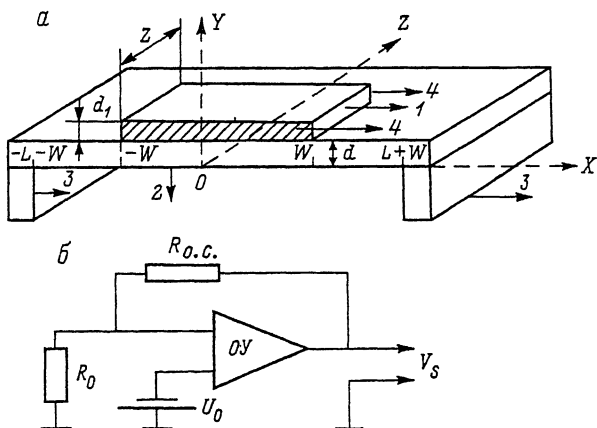


Рис. 2. Пояснение к механизму работы ВТСП-болометра: а - структура ВТСП-болометра, б - схема его включения. На рис. а: 1 - сверхпроводящая пленка, 2 - подложка, 3 - термостат, 4 - токовые контакты.

оси Y (рис. 2, а) можно считать постоянной. Тогда, при однородной засветке СПП гармонически модулированным сигнальным излучением (рис. 2, а) уравнения теплопроводности для $T_S(\vec{r}, t)$ имеют вид:

$$c \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial j_x}{\partial x} = d^{-1} [P_0 e^{i\omega t} - \beta T_S(x, t)], \quad \text{при } |x| \leq W, \quad (2)$$

$$c \frac{\partial T_S(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial j_x}{\partial x} = 0, \quad \text{при } W \leq |x| \leq W+L, \quad (3)$$

где $j_x = -\chi \frac{\partial T_S}{\partial x}$ - плотность теплового потока; P_0 - плотность амплитуды сигнального излучения; $\beta = U_0 \alpha d_1 / Z^2 \rho$; ρ - удельное сопротивление СПП; $Z, 2W$ - длина и ширина СПП; ω - частота модуляции сигнала. Второе слагаемое в правой части уравнения (2) описывает вариации джоулевой мощности, выделяемой в СПП. Граничные условия для уравнений (2), (3) вытекают из постоянства температуры термостата и имеют вид (рис. 2, а):

$$T_S(W+L) = T_S(-W-L) = 0. \quad (4)$$

Наиболее интересен, с точки зрения практической реализации, случай когда выполняются условия:

$$W \gg J\omega; \quad L \gg L\omega, \quad (5)$$

где $J\omega^2 = \frac{\alpha d}{\sqrt{\beta^2 + \omega^2 c^2 d^2}}$; $L\omega = \frac{\alpha}{\omega c}$ - соответственно характерные длины распространения тепла в структуре вдоль оси X (рис.2, а) при $|X| \leq W$ и $|X| \geq W$. При выполнении условия (5) из (1)-(4) следует, что в рассматриваемом режиме работы болометра его вольтовая чувствительность определяется формулой:

$$S_U = R_{oc} U_o^{-1} \left[1 + \left(\frac{\omega c d}{\beta} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что быстродействие болометра равно:

$$\tau_o = \frac{c d Z^2 \rho}{\alpha d_1 U_o^2} \sim U_o^{-2} \quad (7)$$

Таким образом, варьируя напряжение смещения, можно управлять инерционностью болометра. Заметим, что при $\omega \tau_o \ll 1$

$$S_U = U_o^{-1} R_{oc}, \quad (8)$$

т.е. не зависит от значения α . Это обстоятельство определяет дополнительное преимущество предлагаемого механизма работы ВТСП-болометра перед обычным, т.к. позволяет устранить геометрический шум в многоэлементных фотопреобразователях на основе ВТСП-болометров, обусловленный технологическим разбросом величины α .

Спектральная плотность флуктуаций выходного напряжения ОУ при $R_{oc} \gg R$ и $\omega \ll (R_{oc} c_{in})^{-1} (c_{in} - \text{выходная емкость ОУ})$ определяется формулой [3]:

$$\overline{U_{ш}^2} = e_{ш} \left(\frac{R_{oc}}{R_o} \right)^2 + R_{oc}^2 \overline{I_{\Sigma}^2} + 4kT_o R_{oc}, \quad (9)$$

где $e_{ш}$ - спектральная плотность флуктуаций напряжения ОУ; $\overline{I_{\Sigma}^2} = \overline{I_y^2} + \overline{I_S^2}$, $\overline{I_y^2}$; $\overline{I_S^2}$ - соответственно спектральная плотность флуктуаций тока ОУ и болометра. Величину $\overline{I_S^2}$ можно представить в виде

$$I_S^2 = \frac{4kT_0}{R_0} + \left(\frac{U_0}{R_0}\right)^2 \alpha^2 \overline{\delta T^2}, \quad (10)$$

где $\overline{\delta T^2}$ - спектральная плотность флуктуаций температуры СПП. Первое слагаемое в (10) представляет собой шум Найквиста, а второе - шум, обусловленный флуктуациями температуры СПП. Величину $\overline{\delta T^2}$ можно найти, решив систему уравнений (2), (3) с граничными условиями (4) для случайной компоненты температуры СПП по методу Ланжевена. В области частот, удовлетворяющих условию (5) и $\omega\tau_0 \ll 1$, результат расчета имеет вид:

$$\overline{\delta T^2} = \frac{16\sigma kT_\phi + 2\sqrt{2} kT_0 dW^{-1} \sqrt{\alpha\omega C}}{2\beta^2 ZW}, \quad (11)$$

где T_ϕ - температура фона; σ - постоянная Стефана-Больцмана. Первое слагаемое в числителе (11) представляет собой температурные шумы, обусловленные флуктуациями фоновой мощности, а второе - флуктуациями теплообмена. Из формул (8)-(11) и общего определения удельной обнаружительной способности фотоприемника $D_\lambda^* = S_\nu \sqrt{A} / \sqrt{U_\nu^2}$ следует, что в рассматриваемом случае

$$D_\lambda^* = \left[\frac{\epsilon_{ш} U_0^2}{A R_0^2} + \frac{\bar{I}_y^2 U_0^2}{A} + \frac{4kT_0 U_0^2}{A} (R_{oc}^{-1} + R_0^{-1}) + 16\sigma kT_\phi^5 + kT_0^2 dW^{-1} \sqrt{8\alpha\omega C} \right]^{-1/2}, \quad (12)$$

где $A = 2ZW$ - фоточувствительная площадка болометра. Оценим параметры болометра из СПП $\gamma BaCuO$ ($d_1 = 0.1$ мкм; $Z = 200$ мкм; $W = 100$ мкм; $\alpha = 1 \text{ K}^{-1}$; $\rho = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/см}$) на кварцевой подложке ($C = 0.5 \text{ Дж/см}^3$; $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{см К}}$; $d = 1$ мкм). При напряжении смещения $U_0 = 0.1$ В, согласно (7), $\tau_0 = 0.5$ мс, а величина D_λ^* , согласно (12), при $\omega = 0.5 \text{ кГц}$, $T_0 = 90 \text{ К}$, $T_\phi = 300 \text{ К}$ равна $1.3 \cdot 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ ($\epsilon_{ш} = 10^{-18} \text{ В}^2/\text{Гц}^{1/2}$; $\bar{I}_y^2 = 10^{-28} \text{ А}^2/\text{Гц}^{1/2}$). Полученное значение D_λ^* близко к предельной величине, определяемой флуктуациями фоновой мощности $D_{\phi\phi}^* = 1.8 \cdot 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2}/\text{Вт}$.

Таким образом, предложенный механизм работы ВТСП-болометра позволяет достигать предельных значений величины D_λ^* при быстродействии менее 1 мс и рабочих температурах выше 90 К.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Алфеев В.Н., Осипов В.В., Суханов А.Н. Тез. 1-го Всес. семинара „Физика электронных структур на основе высокотемпературной сверхпроводимости“, М., 1989. С.15-16.
- [2] Алфеев В.Н., Бахтин П.А., Васенков А.А. и др. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках. / Под ред. В.Н.Алфеева. М.: Радио и связь, 1985. 230 с.
- [3] Гауэр Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989, 504 с.

Поступило в Редакцию
3 июня 1991 г.