

6 мкм (относительный коэффициент поглощения равен 0,42) до 14 мкм (0,1). Изготовлены и исследуются структуры, у которых оптическое расстояние между поглощающим слоем и металлизированным дном подложки составляет $\lambda/4n$ (n — показатель преломления сред).

Разработаны конструкции 64-элементной линейки (шаг 0,1 мм) и матрицы размерностью 8×8 (шаг 0,12 мм), которые помещены в многовыводные металло-стеклянные корпуса. Максимальный диаметр корпуса 36 мм.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Bolometer infrared sensors from titanium-based material

A. G. Zhukov, A. N. Bazhinov, V. N. Rjabov, E. B. Vorovich
FSUE RPC "Istok", Fryazino, Russian Federation

Bolometric sensors arrays were manufactured on Ti-based material. The temperature coefficient of resistive material is 1.3 %/K. The values of bolometers detectivity and time constant reached $(6\text{---}8) \cdot 10^7 \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ (700 K, 30 Hz) and 0.1...—0.01 s accordingly (depending on possible variations of bolometer manufacturing technology and pressure inside the body). The field of spectral sensitivity of bolometers is within 6...—14 μm wavelength range.

УДК 535.231.6

Определение тепловых параметров микроболометров из электрических измерений

И. Б. Чистохин, М. А. Демьяненко
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Проведен анализ динамики саморазогрева и электрических сигналов, импульсно смещенных микроболометров, включенных в разных режимах (при постоянном напряжении, токе, а также в мостовой схеме Уитстона). Получены аналитические выражения для определения тепловых параметров (тепловая постоянная времени, теплоемкость и теплопроводность) терморезистивных микроболометров, применимые при значительных разогревах. Экспериментальные результаты измерений находятся в хорошем соответствии с предложенными аналитическими зависимостями.

В связи с бурным развитием микромашиной технологии матричные фотоприемники на основе неохлаждаемых микроболометров доминируют над другими типами фотоприемников в системах ИК-изображения. Тепловизионные приборы на основе неохлаждаемых матриц [1, 2] по температурной чувствительности приближаются к современным фотонным приемникам, использующим охлаждение до низких температур. Выгодным отличием являются значения эксплуатационных характеристик и стоимость благодаря отсутствию систем криогенного охлаждения, что делает их доступными для широкого использования в промышленности, медицине, экологии, на транспорте и в сфере обслуживания.

Болометрические неохлаждаемые матрицы считаются наиболее перспективными, так как не нуждаются в модуляции ИК-потока, а методики их изготовления в наибольшей степени совместимы с современными тонкопленочными микроэлектронными технологиями.

Базовая структура микроболометра состоит из двух компонент: поглотителя ИК-излучения в виде мембраны или мостиковой структуры, изготовленной, напри-

мер из Si_3N_4 , и терморезистора, имеющего высокий температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Тепловая изоляция болометра достигается путем подвешивания над схемой считывания на слабопроводящих тепло "ног". Падающее ИК-излучение разогревает болометр, и изменение сопротивления фиксируется внешней схемой считывания. При этом болометр разогревается не только за счет падающего ИК-излучения, но и саморазогрева (Джоулева тепла), обусловленного внешним смещением схемы считывания. Основные свойства микроболометра обычно характеризуются теплоемкостью C , теплопроводностью G и тепловой постоянной времени $\tau_0 = C / G$. Точное определение этих параметров имеет большое значение для разработки болометров.

Тепловые процессы болометра в общем случае нелинейны, что затрудняет их анализ. В работах [3—5] для определения тепловых параметров используют приближение постоянства Джоулевой мощности, справедливое при изменении сопротивления болометра ΔR , много меньшего его начального сопротивления R_0 при

исходной температуре. Это требует использования малых сигналов, что понижает точность определения тепловых параметров. При повышении уровня сигналов данное приближение становится некорректным.

В данной работе проводится анализ динамики саморазогрева и электрических сигналов микроболометров при подаче импульсного смещения в отсутствие внешнего падающего ИК-излучения с учетом зависимости от температуры Джоулевой мощности.

При Джоулевом разогреве терморезистивного болометра рассеиваемую мощность можно представить:

для режима постоянного тока как $P_I = P_{0I} \pm \Delta P_I = I_{in}^2 [R_0 \pm \Delta R(\alpha, \Delta T)]$;

для режима постоянного напряжения $P_V = P_{0V} \mp \Delta P_V = V_{in}^2 / [R_0 \pm \Delta R(\alpha, \Delta T)]$.

Следует заметить, что изменения мощности ΔP_I и ΔP_V зависят от знака ТКС α болометра (для металлов имеет положительный знак, для полупроводников — отрицательный).

Динамические характеристики микроболометров под действием внешнего импульса напряжения (тока) описываются уравнением теплового баланса

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = P - G\Delta T, \quad (1)$$

где $\Delta T = T - T_0$ — разность температур;

T_0 — температура окружающей среды;

C и G — теплоемкость и теплопроводность чувствительного материала, соответственно;

$P = P_I$ или P_V — мощность, рассеиваемая на болометре.

В дальнейшем анализ проведен для полупроводниковых болометров, учитывающих уменьшение сопротивления с ростом температуры. При этом в качестве значения ТКС α будем принимать его абсолютное значение.

Тогда сопротивление полупроводникового микроболометра можно аппроксимировать как $R_b \approx R_0 (1 - \alpha \Delta T)$, где R_0 — сопротивление болометра при комнатной температуре, кроме того, C и G считаем постоянными.

Такой подход оправдан для аналитических приближений [6]. Будем рассматривать динамическое поведение микроболометра в разных режимах (при ступенчатом включении постоянного напряжения или тока, а также подключенного в одно из плеч мостовой схемы Уитстона) (рис. 1).

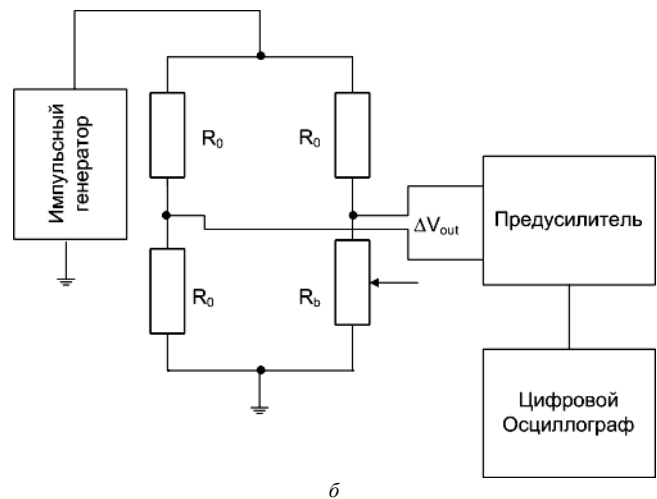
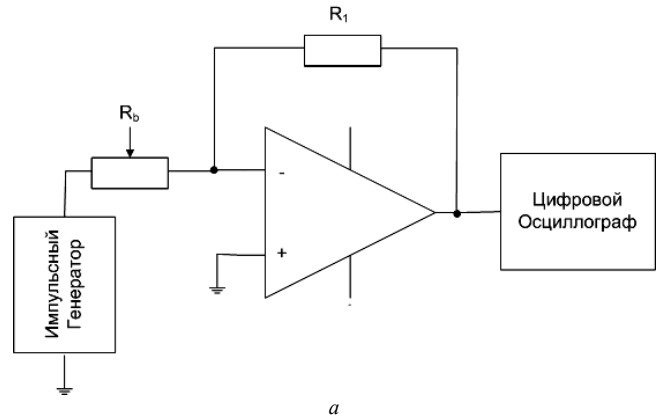


Рис. 1. Схемы включения болометра для определения тепловых параметров микроболометра: а — в режиме постоянного напряжения; б — мостовая схема Уитстона

Режим постоянного тока

$P_I = I_{in}^2 R_0 (1 - \alpha \Delta T)$. Решением уравнения (1) для ΔT будет следующее выражение:

$$\Delta T = \frac{I_{in}^2 R_0}{G + \alpha I_{in}^2 R_0} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_I}\right) \right), \quad (2)$$

где $\tau_I = \frac{C}{G \left(1 + \frac{\alpha I_{in}^2 R_0}{G} \right)} = \frac{\tau_0}{1 + \frac{\alpha I_{in}^2 R_0}{G}}$ — эффективное

время релаксации.

Выходное напряжение для такого включения будет иметь вид

$$V_b = I_{in} R_0 (1 - \alpha \Delta T).$$

При малых длительностях импульса $t < \tau_I$ экспоненциальный член можно разложить в ряд, и выражение ΔT приобретает вид

$$\Delta T = \frac{I_{in}^2 R_0 t}{C}.$$

Импульсный генератор

R_0

R_1

Цифровой осциллограф

При увеличении амплитуды внешнего сигнала происходит уменьшение эффективного теплового времени τ_f . Такой режим является стабильным.

Режим постоянного напряжения

Для этого режима решение уравнения (1) получается нелинейным. Чтобы преодолеть эти трудности, рассеиваемую мощность можно аппроксимировать следующим образом:

$$R_V = \frac{V_{in}^2}{R_0(1 - \alpha\Delta T)} \approx \frac{V_{in}^2}{R_0}(1 + \alpha\Delta T).$$

Тогда решение уравнения (1) для этого включения выглядит следующим образом:

$$\Delta T = \frac{V_{in}^2}{R_0 G - \alpha V_{in}^2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_V}\right) \right), \quad (3)$$

где $\tau_V = \frac{C}{G \left(1 - \frac{\alpha V_{in}^2}{R_0 G} \right)} = \frac{\tau_0}{1 - \frac{\alpha V_{in}^2}{R_0 G}}$.

Выходной ток для такого включения имеет вид

$$I_b = \frac{V_{in}}{R_0(1 - \alpha\Delta T)} \approx \frac{V_{in}}{R_0}(1 + \alpha\Delta T). \quad (4)$$

Аналогично, как для режима постоянного тока, при малых длительностях импульса напряжения имеем

$$\Delta T = \frac{V_{in}^2 t}{R_0 C}.$$

Для этого режима увеличение амплитуды внешнего сигнала приводит к увеличению эффективного теплового времени τ_f . При значениях $V^2 = GR_0 / \alpha$ знаменатель уравнения (3) стремится к нулю. При этом $\Delta T \rightarrow \infty$ и $\tau_V \rightarrow \infty$, что приводит к нестабильной работе.

Общий недостаток этих схем включения — наличие в выходном сигнале V_b и I_b постоянной составляющей, превосходящей по уровню переменную на порядки. С другой стороны, постоянную составляющую можно отсечь с помощью схем с вычитанием минимального значения постоянной составляющей.

Анализируя экспериментальную зависимость выходного напряжения (тока) от времени, можно получить значение эффективного времени релаксации τ_f из (2) или τ_V — из (3), а из стационарного значения — предэкспоненциальный член. Измерив предварительно величину ТКС, α и R_0 , можно отдельно определить величины C , G и τ_0 .

Мостовая схема Уитстона

На практике часто используют схемы с нагрузочным сопротивлением при приложении импульса напряжения. Наиболее используется для болометров мостовая схема Уитстона (см. рис. 1, б), состоящая из одного микроболометра R_b и трех нагрузочных сопротивлений R_0 . Это дает возможность исключить постоянную составляющую сигнала. При комнатной температуре выходное напряжение ΔV_{out} равно нулю. При подаче импульса напряжения амплитудой V_{in} на мостовую схему сопротивление болометра изменяется в результате саморазогрева, в то время как нагрузочные сопротивления R_0 остаются неизменными.

Рассеиваемую мощность на болометре можно аппроксимировать следующим образом:

$$R_V = \frac{V_{in}^2}{4R_0} \left(1 - \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{4} \right).$$

Решение уравнения (1) для этого включения будет выглядеть как

$$\Delta T \approx \frac{V_{in}^2}{4R_0 G} \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{in}^2 \alpha}{8R_0 G} \right)^2} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right), \quad (5)$$

где $\tau = \frac{C}{G \left(1 + \frac{V_{in}^4 \alpha^2}{16R_0^2 G^2} \right)^{1/2}} = \frac{\tau_0}{\left(1 + \frac{V_{in}^4 \alpha^2}{16R_0^2 G^2} \right)^{1/2}}$. (6)

Выходное напряжение ΔV_{out} с мостовой схемы можно выразить как

$$\Delta V_{out} = \frac{\alpha V_{in}}{4} \Delta T = \frac{\alpha V_{in}^3}{16GR_0} \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)}{1 + \left(\frac{V_{in}^2 \alpha}{8R_0 G} \right)^2}. \quad (7)$$

Если значение амплитуды импульса напряжения V_{in} мало при $\left(V_{in}^2 \alpha / 8R_0 G \right)^2 \ll 1$, то выражения (5) и (7) будут соответствовать линейному приближению, описанному в работах [3, 4]. При увеличении амплитуды V_{in} начинает влиять поправка квадратичного члена, и происходит уменьшение эффективного теплового времени τ . Такой режим является стабильным.

Если t в несколько раз больше τ , то ΔV_{out} переходит в стационарное значение V_{stat} , которое выражается как

$$V_{stat} = \frac{\alpha V_{in}^3}{16GR_0} \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{in}^2 \alpha}{8R_0 G} \right)^2}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) видно, что можно независимо найти значения величин C и G , определив из эксперимента τ и V_{stat} .

Экспериментальная апробация метода проводилась на двух микроболометрах, изготовленных на основе термочувствительных слоев оксидов ванадия, полученных золь-гель методом [7] с последующим восстановлением в водородной среде, и микромостиков из нитрида кремния. Контакты к оксиду ванадия формировались магнетронным распылением титана

толщиной 500 \AA . В качестве жертвенного слоя использовался полиимид, который вытравливался в кислородной плазме. Размер структур составляет $50 \times 50 \text{ мкм}$, высота вакуумного зазора, осуществляющего термическую изоляцию, — $2,5 \text{ мкм}$. Ширина поддерживающей балки на основе нитрида кремния составляла 3 мкм , а проходящей по ней контактной металлической титановой шины — 2 мкм . Конструктивные детали описаны в работе [8].

Измерение тепловых параметров микроболометра осуществлялось в режиме постоянного напряжения и с помощью мостовой схемы Уитстона. Схема включения показана на рис. 1, *a*, *b*, соответственно. Микроболометр размещался в вакуумированном криостате, который откачивался до уровня вакуума $10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ С помощью импульсного генератора задавалось регулируемое импульсное напряжение с амплитудой от $0,2$ до $1,0 \text{ В}$ и длительностью $50\text{--}90 \text{ мс}$. Период повторения между импульсами выбирался таким образом, чтобы после воздействия импульса напряжения на микроболометр он успевал остыть до прихода очередного импульса

напряжения. Балансировка моста Уитстона достигалась за счет использования трех фиксированных резисторов, сопротивление каждого соответствовало сопротивлению болометра на воздухе при комнатной температуре.

На рис. 2, *a* приведены релаксационные зависимости выходного сигнала микроболометра в режиме постоянного напряжения при амплитудах внешнего импульса напряжения $0,2$; $0,3$; $0,4$ и $0,5 \text{ В}$. Предварительно измеренные значения R_0 и α составили 47 кОм и $0,014 \text{ К}^{-1}$, соответственно, сопротивление обратной связи $R_1 = 100 \text{ кОм}$. Видно, что с увеличением приложенного входного напряжения происходит увеличение времени релаксации τ_V от $6,75$ до $13,27 \text{ мс}$. Такое поведение релаксации выходного тока соответствует полученному выражению (4). Рассчитанные данные тепловых параметров из эксперимен-

тальных кривых представлены в табл. 1. Для этого болометра в режиме постоянного напряжения критическое напряжение, приводящее к нестабильной работе, составляет $0,73 \text{ В}$. Рассчитанная тепловая постоянная времени τ_0 практически не меняется и составляет $6,24\text{--}6,73 \text{ мс}$.

На рис. 2, *b* приведены релаксационные зависимости выходного сигнала микроболометра в режиме постоянного напряжения для мостовой схемы Уитстона при амплитудах внешнего импульса напряжения $0,4$; $0,7$; $0,9$ и $1,0 \text{ В}$. Предварительно измеренные значения R_0 и α составили 91 кОм и $0,02 \text{ К}^{-1}$, соответственно. Видно, что при увеличении входного напряжения время релаксации τ падает от $4,09$ до $3,75 \text{ мс}$. Рассчитанные данные тепловых параметров в соответствии с полученными выражениями (6) и (7) из экспериментальных кривых представлены в табл. 2. Режим с мостовой схемой Уитстона предпочтительнее, чем режим постоянного напряжения, поскольку стабилен, и изменение времени релаксации τ при близких ΔT незначительно.

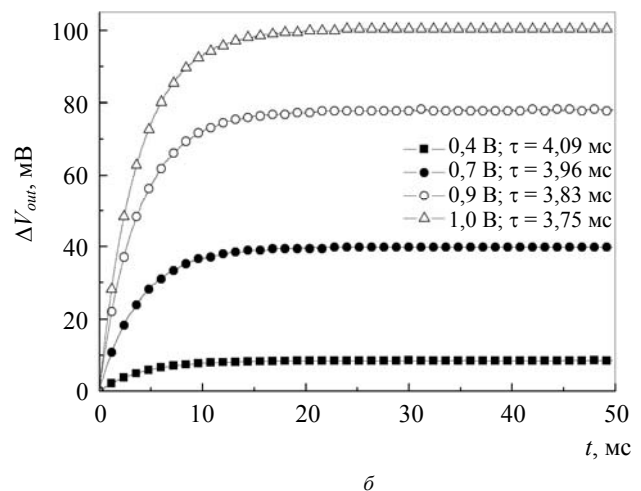
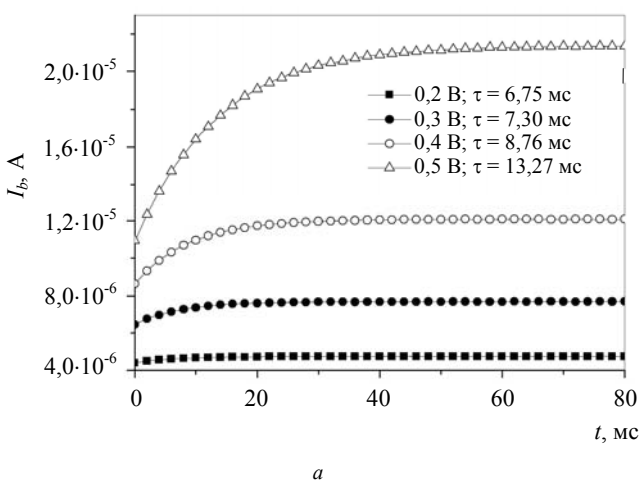


Рис. 2. Экспериментальные релаксационные зависимости: *a* — выходного тока микроболометра, включенного в режиме постоянного напряжения; *b* — выходного напряжения микроболометра, включенного в мостовой схеме Уитстона

$V_{in}, \text{В}$	$G, \text{Вт/К}$	$C, \text{Дж/К}$	$\tau_r, \text{мс}$	$\tau_0 = C/G, \text{мс}$	$\Delta T, \text{К}$
0,2	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$9,78 \cdot 10^{-10}$	6,75	6,24	5,9
0,3	$1,67 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-9}$	7,30	6,13	13,7
0,4	$1,67 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-9}$	8,76	6,25	28,6
0,5	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-9}$	13,27	6,73	69,4

Таблица 2

$V_{in}, \text{В}$	$G, \text{Вт/К}$	$C, \text{Дж/К}$	$\tau, \text{мс}$	$\tau_0 = C/G, \text{мс}$	$\Delta T, \text{К}$
0,4	$1,04 \cdot 10^{-7}$	$4,27 \cdot 10^{-10}$	4,09	4,11	4,2
0,7	$1,17 \cdot 10^{-7}$	$4,74 \cdot 10^{-9}$	3,96	4,06	11,4
0,9	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$5,05 \cdot 10^{-9}$	3,83	4,07	17,4
1,0	$1,31 \cdot 10^{-7}$	$5,34 \cdot 10^{-9}$	3,75	4,06	20,1

В принципе C и G имеют температурную зависимость, однако в этом случае решение уравнения теплового баланса (1) возможно только численным методом. Несмотря на это, полученные соотношения для различных режимов включения хорошо описывают временную зависимость выходного напряжения и позволяют определять тепловые параметры микроболометров.

Заключение

Получены аналитические выражения для определения тепловых параметров (тепловая постоянная времени, теплоемкость и теплопроводность) терморезистивных микроболометров, учитывающие изменение Джоулевой мощности в процессе разогрева. Аналитические зависимости находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами вплоть до разогревов, соответствующих $\alpha \Delta T$, близких к 1, что позво-

ляет надежно определять тепловые параметры болометров.

Л и т е р а т у р а

1. Murphy D. et al.// Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 222.
2. Mottin E. et al.// Ibid. 2003. V. 4820. P. 200.
3. Gu X., Karunasiri G. et al.// Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 1881.
4. Neuzil P., Mei T.// Ibid. 2002. V. 80. P. 1838.
5. Gu X., Karunasiri G. et al.// Sensors and Actuators A. 1998. V. 69. P. 92.
6. Thermal Sensors, edited by G. C. M. Meijer and A. W. Herwaarden (Institute of Physics, Bristol, 1994).
7. Guzman G., Morineau R., Livage J.// Materials Research Bulletin. 1994. V. 5. P. 509.
8. Jerominec H., Pope T. D., Renaud M. et al.// Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 236.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Determination of thermal parameters of microbolometers from electrical measurements

I. B. Chistokhin, M. A. Demjanenko

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Division, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The analysis of dynamics of self-heating and electrical signals in pulse biased microbolometers, connected in different modes (constant voltage and constant current modes, and also Wheatstone bridge) is presented. Analytical expressions for determination of thermal parameters (thermal time constant, heat capacitance and thermal conductance) of thermoresistive microbolometers applicable under significant heating are derived. The experimental results are in good agreement with the theoretical analytical dependences.