

Тепловой приемник для измерения параметров излучения импульсных лазеров и генераторов субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов

М.А.Кик, А.С.Сигов, А.А.Шиляев, В.В.Завьялов

Получена теоретическая формула, позволяющая установить связь быстродействия и чувствительности болометров с геометрическими и теплофизическими параметрами приемного элемента и подложки. Результат подтвержден предварительным (оценочным) экспериментом. Предложенными тепловыми приемниками можно регистрировать и измерять мощность излучения лазеров и генераторов субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов.

Ключевые слова: болометры, тонкопленочный висмут.

1. Введение

Тепловые приемники широко применяются для регистрации излучения в ИК области спектра [1]. В продолжение исследований, опубликованных в [2, 3], нами проведены экспериментальные исследования болометров с приемным элементом (ПЭ) в виде тонкой пленки висмута на подложке, показавшие возможность расширения спектрального диапазона таких болометров на миллиметровую (ММ) и субмиллиметровую (СММ) области. Предложена формула и оценочные соотношения, связывающие быстродействие τ и чувствительность болометра с геометрическими и теплофизическими параметрами его составных частей. Сформулированы условия неискаженной регистрации болометрами формы сигнала импульсного излучения лазеров и генераторов в ММ и СММ областях.

2. Теоретическая основа работы приемников

Без ущерба для общности проанализируем модельный болометр (рис.1), который состоит из тонкопленочного прямоугольного приемного элемента (ПЭ) площадью $S = 2a2b$, где $2a$ и $2b$ – длины сторон прямоугольника. ПЭ расположен на тонкой мембране с теплопроводностью K_1 и температуропроводностью χ_1 . Мембрана, в свою очередь, расположена на массивной подложке (например, из кремния) с теплопроводностью K и температуропроводностью χ . Если кремний из-под мембраны вытравлен, то роль массивной подложки выполняет воздух,

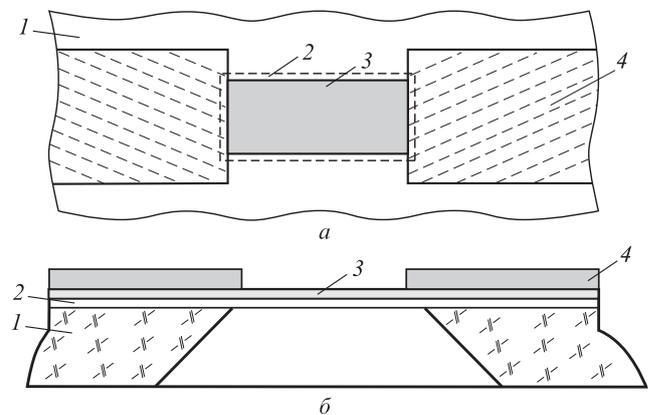


Рис.1. Схема болометра (вид сбоку (а) и вид сверху (б)): 1 – кремниевая подложка; 2 – несущая мембрана; 3 – термочувствительный элемент; 4 – контакты (МЭМС-технология [1]).

а остальной кремний выполняет роль механического крепления мембраны с ПЭ к подложке. ПЭ площадью S совмещает в себе функции поглотителя с коэффициентом поглощения A и термочувствительного элемента (ТЧЭ).

Необходимо найти временную зависимость температурного отклика $T(t)$ ($T(t)$ – это усредненная по площади S температура $T(x, y, t)$ при учете распространения тепла от ТЧЭ во все трехмерное пространство), когда на ПЭ падает излучение с плотностью потока

$$P(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ P_0, & t \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$T(t) = \frac{A}{S} \iint_S T(x, y, t) dx dy.$$

Решив трехмерное уравнение теплопроводности [3] и опустив простые, но громоздкие выкладки, получим

$$T(x, y, t) = P_0 \frac{A}{2\pi K} \int_{-a}^a d\eta \int_{-b}^b d\xi \left\{ \frac{1}{r} \left[1 - F\left(\frac{r}{2\sqrt{\chi t}}\right) \right] \right\}, \quad (2)$$

$$T(t) \approx P_0 \frac{AL}{2\pi K} \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_0}{t}} \right),$$

где $r^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2$, $z \geq 0$; F – интеграл ошибок;

М.А.Кик. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: prostokik@mail.ru

А.С.Сигов. Российский технологический университет, Россия, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

А.А.Шиляев. Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н.Семенова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 4

В.В.Завьялов. Институт физических проблем им. П.Л.Капицы РАН, Россия, 119334 Москва, ул. Косыгина, 2; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 101000 Москва, ул. Мясницкая, 20; e-mail: v_zav@mail.ru

Поступила в редакцию 26 декабря 2019 г., после доработки – 30 мая 2020 г.

Табл.1. Результаты измерений характеристик ПЭ-1 в ММ и СММ диапазонах.

Диапазон	Коэффициент поглощения (%)	Напряжение шума (в полосе 1 Гц) (нВ)	Чувствительность (В/Вт)	Пороговая чувствительность (NEP) (Вт/Гц ^{1/2})	Быстродействие (мс)
ММ*	67	2–3	3–5	$\sim 0.5 \times 10^{-9}$	100
СММ**	40	2–3	3	$\sim 10^{-9}$	30

Примечание: * частота 146 ГГц; ** длина волны $\lambda = 220$ мкм [4].

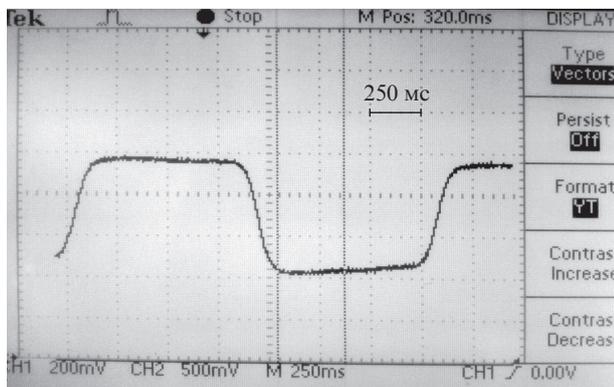


Рис.2. Оциллограмма отклика ПЭ-1 на модулированное (меандр) излучение от СВЧ генератора с частотой генерации 146 ГГц.

$$L = \frac{4}{ab} \left\{ b^2 a \ln \left(\frac{a}{b} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2}} \right) + a^2 b \ln \left(\frac{b}{a} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \right) + \frac{1}{3} \left[a^3 + b^3 - \sqrt{(a^2 + b^2)^3} \right] \right\}.$$

Параметр $\tau_0 = (1/\pi\chi)(S/L)^2$ определяет быстродействие τ приемника, а параметр L характеризует средний размер теплового пятна в плоскости (x, y) .

При выводе (2) мы пренебрегли влиянием толщины мембраны l . Это возможно при выполнении неравенства $(\chi/\chi_1)(l/L)^2 \ll 1$, которое следует из того условия, что время прогрева тонкой мембраны $\tau_1 \ll \tau_0$. Соотношение (2) справедливо при $S/4\chi t \ll 1$; если же $S > 4\chi t$, то $T(t) = AP_0(2/K)\sqrt{\chi t/\pi}$ [2].

На рис. 2 представлена оциллограмма отклика болометра ПЭ-1, ПЭ которого изготовлен в соответствии со схемой рис.1 термическим напылением висмута в вакууме, при воздействии на него импульса излучения от генератора Г4-161 с частотой генерации ~ 146 ГГц и длитель-

ностью импульса ~ 0.7 с (длительность фронта импульса $\tau \sim 0.1$ с, площадь ПЭ $S = 1$ см \times 0.5 см). Для проведения измерения в СММ диапазоне использовалось излучение лазера на парах воды [4], в этом случае площадь ПЭ составляла 0.15 см \times 0.07 см.

Остальные предварительно-оценочные измерения характеристик приемника ПЭ-1 для ММ и СММ диапазонов при общих значениях параметров болометров, таких как сопротивление $R_0 = 245\text{--}247$ Ом, напряжение смещения $U_0 = 0.3$ В, рабочая температура $T_0 = 275$ К, температурный коэффициент сопротивления 0.5%, представлены в табл.1.

3. Заключение

Полученная теоретическая формула, устанавливающая связь быстродействия и чувствительности болометров с геометрическими и теплофизическими параметрами приемного элемента и подложки, подтверждена экспериментально. Выполненные расчеты и моделирование также могут найти применение при разработке ряда болометрических преобразователей импульсного излучения в расширенном спектральном диапазоне. Показана возможность их использования для регистрации и измерения параметров излучения импульсных генераторов и лазеров ММ и СММ диапазонов.

Работа выполнена при поддержке РТУ МИРЭА в рамках плана инициативных НИР, использовано оборудование ЦКП РТУ МИРЭА.

1. Иванов С.Д., Косцов Э.Г. *Успехи прикладной физики*, **5** (2), 136 (2017).
2. Баутин А.В., Поляков Ю.А., Шилиев А.А. *Квантовая электроника*, **3** (7), 1527 (1976) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **6** (7), 827 (1976)].
3. Емохонов В.Н., Клягин А.С., Шилиев А.А. Патент 1825246 РФ. №4641108/25; заявл. 26.12.1988; опубл. 10.04.1995.
4. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. *ИТЭ*, №3, 174 (1982).