

РАСЧЕТ ЗОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОПЛЕНОЧНОГО БОЛОМЕТРА

Одним из источников погрешности измерений мощности и энергии лазерного излучения является неравномерность чувствительности измерительного преобразователя по его приемной поверхности, или неравномерность зонной характеристики [1]. При априорной оценке погрешности средства измерений важно знать значение этой неравномерности. В работе [2] проведен расчет зонной характеристики и получено решение для модели типа «полупространство». Однако такая модель в ряде случаев не отражает адекватно свойства реальных преобразователей, например болометрических, изготовленных методом вакуумного напыления металла на плоскую изоляционную подложку [3]. Такие преобразователи нельзя представить полупространством так как толщина подложки на несколько порядков меньше других линейных размеров. Например, подложки болометров, описанных в работе [3], имеют размеры 40×40 мм, а их толщина составляет примерно 50 — 70 мкм.

Рассмотрим следующую задачу для получения более точного решения.

На преобразователь нормально к его поверхности падает пучок лазерного излучения радиусом R_n с равномерным распределением мощности. Координаты центра его проекции на плоскость преобразователя $[x_0, y_0]$. Размеры подложки преобразователя — $A \times B \times h$, а тонкопленочного слоя — $a \times v \times \Delta$ (рис. 1). Так как толщина пленки составляет доли микрона и $h \gg \Delta$, считаем, что пленка не влияет существенным образом на формирование температурного поля преобразователя, и для упрощения задачи ее не учитываем. Предположим также, что теплофизические характеристики материала подложки c, ρ, λ (удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности) не зависят от температуры. Начало координат расположим, как на рис. 1

Информативным параметром при использовании болометров является приращение их сопротивления, которое пропорционально сред-

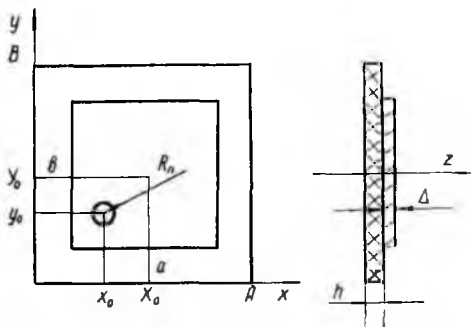


Рис. 1

нему приращению температуры болометра. Поэтому зонную характеристику ищем как среднее значение температуры по поверхности термочувствительной пленки при перемещении пучка по оси преобразователя ($y = Y_0 = B/2$) в пределах $(A - a)/2 \leq x_0 \leq (A + a)/2$, нормируя ее к средней температуре пленки при падении пучка в центр преобразователя [$x_0 = X_0$, $y_0 = Y_0$]:

$$\gamma = \frac{\theta_{cp}(x_0, y_0)}{\theta_{cp}(X_0, Y_0)} = \frac{\int_{S_n} \theta(x, y, z, x_0, y_0) dx dy}{\int_{S_n} \theta(x, y, z, X_0, Y_0) dx dy}, \quad (1)$$

где $\theta(x, y, z, x_0, y_0)$ — распределение температуры преобразователя при падении пучка излучения в точку [x_0, y_0]; $\theta(x, y, z, X_0, Y_0)$ — распределение температуры преобразователя при падении пучка в его центр.

Таким образом, задача сводится к нахождению средней температуры термочувствительного слоя при перемещении зондирующего пучка по его поверхности. Для получения средней температуры найдем ее распределение из уравнения теплопроводности [4]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c\rho} P(x, y, z, t), \quad (2)$$

$$P(x, y, z, t) = \begin{cases} P_0 e^{-\alpha z}, & x_0 - R_n \leq x \leq x_0 + R_n \\ & y_0 - R_n \leq y \leq y_0 + R_n, t > 0 \\ 0, & x_0 - R_n > x > x_0 + R_n \\ & y_0 - R_n > y > y_0 + R_n, t \geq 0 \end{cases}$$

где θ — прирост температуры; $\kappa = \lambda/c\rho$ — температуропроводность подложки; $P(x, y, z, t)$ — мгновенная объемная плотность мощности излучения; α — показатель поглощения подложки при следующих граничных условиях:

$$\frac{d\theta}{dz} - q_1 \theta = 0, \quad z = 0 \quad (3); \quad \frac{d\theta}{dz} + q_1 \theta = 0, \quad z = h \quad (4); \quad \frac{d\theta}{dx} - q_2 \theta = 0,$$

$$x = 0 \quad (5); \quad \frac{d\theta}{dx} + q_2 \theta = 0, \quad x = A \quad (6); \quad \frac{d\theta}{dy} - q_2 \theta = 0, \quad y = 0; \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dy} + q_2 \theta = 0, \quad y = B \quad (8).$$

Здесь $q_{1,2}$ — относительный коэффициент теплообмена $q_{1,2} = a_{1,2}/\lambda$; $a_{1,2}$ — коэффициент теплоотдачи в плоскостях $z = 0$, $z = h$. Примем начальное условие $\theta(x, y, z, 0) = 0$ (9). Решение задачи (2) — (9) имеет вид

$$\theta(x, y, z, t) = \sum_{m,n,k=1}^{\infty} \frac{G_{m,n,k}(x_0, y_0)}{\omega_{m,n,k}} \times \\ \times F_m(x) F_n(y) F_k(z) (1 - e^{-\omega_{m,n,k}t}), \quad (10)$$

где

$$G_{m,n,k}(x_0, y_0) = 16 \frac{P_0}{BCP} G_{1m}(x_0) G_{2m,n,k} I_{m,n}(y_0);$$

$$G_{1m}(x_0) = \frac{1}{\mu_m} \left[\cos \left(\mu_m \frac{x_0}{A} \right) + \frac{Bi_x}{\mu_m} \sin \left(\mu_m \frac{x_0}{A} \right) \right];$$

$$G_{2m,n,k} = \frac{\mu_m^2}{Bi_x(2 + Bi_x) + \mu_m^2} \frac{\mu_n^2}{Bi_y(2 + Bi_y) + \mu_n^2} \times$$

$$\times \frac{\mu_k^2}{Bi_z(2 + Bi_z) + \mu_k^2} \frac{Bi_z + \alpha h}{\mu_k^2 + (\alpha h)^2};$$

$$I_{m,n}(y_0) = \int_{y_0 - R_n}^{y_0 + R_n} \sin \left[\mu_m \frac{R_n}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{y - y_0}{R_n} \right)^2} \right] \times$$

$$\times \left[\cos \left(\mu_n \frac{y}{B} \right) + \frac{Bi_y}{\mu_n} \sin \left(\mu_n \frac{y}{B} \right) \right] dy;$$

$Bi_x = q_2 A$; $Bi_y = q_2 B$; $Bi_z = q_1 h$ — критерий Био; $\mu_{m,n,k}$ — корни трансцендентных уравнений

$$\operatorname{tg} \mu = 2\mu Bi_{x,y,z} / (\mu^2 - Bi_{x,y,z}^2),$$

полученных из условий (3) — (8);

$$F_i(\xi) = \cos \left(\mu_i \frac{\xi}{H} \right) + \frac{Bi_i}{\mu_i} \sin \left(\mu_i \frac{\xi}{H} \right)$$

при

$$i = \begin{cases} m & \xi = x, \quad H = A; \\ n & \xi = y, \quad H = B; \\ k & \xi = z, \quad H = h; \end{cases}$$

$$\omega_{m,n,k} = \kappa \left[\left(\frac{\mu_m}{A} \right)^2 + \left(\frac{\mu_n}{B} \right)^2 + \left(\frac{\mu_k}{h} \right)^2 \right].$$

В полученном решении слагаемыми, содержащими множитель $e^{-\alpha h}$, пренебрегли, так как αh достаточно велико.

Решение (10) позволяет получить пространственное распределение температуры преобразователя в любой момент времени при перемещении зондирующего пучка в любом направлении в пределах термочувствительной пленки и может быть применено для изучения температурных режимов преобразователей при их проектировании. Используя стационарную температуру ($t \rightarrow \infty$), найдем выражение для расчета зонной характеристики преобразователя. Выполняя интегрирование, находим среднее значение температуры

$$\theta_{cp}(x_0, y_0, z) = \sum_{m,n,k=1}^{\infty} \frac{G_{m,n,k}(x_0, y_0) Q_{m,n}}{\mu_m^2 \mu_n \omega_{m,n,k}} F_k(z), \quad (11)$$

где

$$Q_{m,n} = \sin\left(\frac{\mu_m a}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right) + \frac{Bi_x}{\mu_m} \sin\left(\frac{\mu_m}{2}\right) \right] \times \\ \times \sin\left(\frac{\mu_n b}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\mu_n}{2}\right) + \frac{Bi_y}{\mu_n} \sin\left(\frac{\mu_n}{2}\right) \right].$$

Нормированную зонную характеристику получаем подстановкой выражения (11) в исходную формулу (1). Здесь координату z следует рассматривать как положение плоскости, в которой расположена термочувствительная пленка. Согласно рис. 1 $z = h$, однако для простоты можно принять $z = 0$. При этом результаты вычислений существенно не изменятся, так как градиент температуры по толщине

подложки незначителен из-за малой величины h .

Зонная характеристика реального болометрического преобразователя ($A = B = 40$ мм, $a = b = 24$ мм, $h = 50$ мкм, материал — слюда, ее параметры $c = 874$ Дж/(кг · К), $\rho = 2800$ кг/м³; $\lambda = 0,42$ Вт/(м · К)), рассчитанная по формуле (1) при $R_n =$

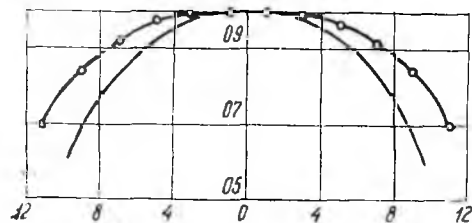


Рис. 2

$= 0,5$ мм и $\alpha h = 10$, представлена на рис. 2. Здесь же приведена зонная характеристика, полученная экспериментально: — расчетная; —○—○—экспериментальная. Максимальное их несовпадение составляет 18 %, что можно считать удовлетворительным результатом, подтверждающим адекватность полученной математической модели реальному преобразователю.

Таким образом, полученное решение в отличие от известного [2] позволяет рассчитать зонную характеристику реального преобразователя с учетом его геометрических соотношений, основных теплосфизических параметров и реальных условий теплообмена с окружающей средой.

Список литературы: 1. Обухов А. С., Ефреев З. Л., Высоковский Е. П. Болометрическая приемная головка для измерения мощности излучения ОКГ // Исследования в области квантовой радиофизики: Тр. метрол. ин-тов СССР. 1974. Вып. 112 (172). С. 71—77. 2. Калинин Ю. А. Расчет зонной характеристики модели приемного преобразователя теплового ваттметра ОКГ // Тез. докл. III Всесоюз. семинара-совещания «Метрология в радиоэлектронике». М., 1975. С. 133—134. 3. Дидык Л. А., Дидык Л. С., Тесленко А. И., Борячок Н. Ф. Болометры большой площади // Радиотехника. 1976. Вып. 37. С. 111—114. 4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел: Пер. с англ. / Под ред. А. А. Померанцева. М., 1964. 487 с.

Поступила в редколлегию 06.04.87