



УДК 535:621.373.826; 536.5

## КАЛИБРОВКА ТОНКОПРОВОЛОЧНОГО БОЛОМЕТРА ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСА ЛАЗЕРА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,06 МКМ

С.В. Погорелов, кандидат физико-математических наук, доцент Национального фармацевтического университета, г. Харьков



зованного излучения.

*The calibration constant of platinum fine-ware barretter of laser pulse energy with a wave-length of 1.06 microns is detected and calibration of barretter with a diameter more than wave-length of E-polarized radiation is carried out.*

Тонкопроволочные болометры находят использование при измерении параметров интенсивного и широкоапертурного лазерного излучения. Преобразование платиновым болометром энергии импульса лазера с длиной волны 10,6 мкм рассмотрено в работе [1]. Температурные зависимости основных физических параметров болометра совместно с неравномерностью распределения интенсивности излучения по площади входной апертуры преобразователя приводят к нелинейности характеристики преобразования болометра и систематическим погрешностям измеряемых параметров излучения.

Данная работа определяет коэффициент преобразования платиновым тонкопроволочным болометром энергии импульса лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. Считаем, что болометр работает в режиме, когда его тепловая постоянная времени намного больше длительности импульса излучения и выходной сигнал пропорционален поглощенной энергии.

Уравнение измерения энергии импульса E-поляризованного лазерного излучения тонкопроволочным болометром имеет вид

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \eta \left( \frac{\delta \bar{E}}{m} \right) \frac{\bar{E}}{m}, \quad (1)$$

где  $R_0$  – начальное сопротивление болометра;  $\Delta R$  – его максимальное приращение под действием излучения лазера;  $\eta(\delta \bar{E}/m)$  – коэффициент преобра-

зования болометра, зависящий от средней погонной падающей энергии  $\bar{E}$ , погонной массы  $m$  и коэффициента неравномерности падающей энергии излучения по площади входной апертуры измерителя  $\delta$ . Коэффициент преобразования болометра можно записать

$$\eta \left( \frac{\delta \bar{E}}{m} \right) = \eta'_0 \left[ 1 + a_E \frac{\delta \bar{E}}{m} + b_E \left( \frac{\delta \bar{E}}{m} \right)^2 \right],$$

где  $\eta'_0 = \alpha'_0 q'_0 / c'_0$  – коэффициент преобразования болометра в линейном режиме его работы, когда уровни падающей энергии малы;  $\alpha'_0$ ,  $q'_0$ ,  $c'_0$  – температурный коэффициент сопротивления, фактор эффективности поглощения и удельная теплоемкость болометра при температуре окружающей среды соответственно;  $a_E$  и  $b_E$  – коэффициенты, определяющие нелинейность характеристики преобразования болометра. Калибровка болометра состоит в определении величин  $\eta'_0$ ,  $a_E$ ,  $b_E$ , и их относительных средних квадратических отклонений (СКО)  $\sigma_{\eta'_0}$ ,  $\sigma_{a_E}$  и  $\sigma_{b_E}$ .

В работе [1] показано, что температурную зависимость температурного коэффициента сопротивления (ТКС) платины в диапазоне температур 0...1500 °С можно записать как

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T,$$

где  $\alpha_0$  – ТКС платины при температуре 0 °С;  $\alpha_1$  – коэффициент, определяющий линейную зависимость ТКС. Методом наименьших квадратов найдены данные коэффициенты и их относительные СКО:

$$\alpha_0 = 3,978 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}; \quad \sigma_{\alpha_0} = 9 \cdot 10^{-5};$$

$$\alpha_1 = -5,87 \cdot 10^{-7} \text{ 1/град}^2; \quad \sigma_{\alpha_1} = 5 \cdot 10^{-4}.$$

В приближении геометрической оптики фактор эффективности поглощения (ФЭП) металлического цилиндра равен его коэффициенту поглощения. Температурную зависимость коэффициента поглощения платинового болометра для E-поляризованного излучения представим в виде

$$q^E(T) = q_0^E (1 + q_1 T + q_2 T^2),$$

где относительную температурную зависимость, которая в круглых скобках, будем брать такую же, как и для длины волны 10,6 мкм, то есть

$$q_1 = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}; \quad \sigma_{q_1} = 3 \cdot 10^{-2};$$

$$q_2 = -3,8 \cdot 10^{-7} \text{ 1/град}^2; \quad \sigma_{q_2} = 6 \cdot 10^{-2}.$$

Используя результаты измерений, приведенные в [2], в которых  $q_{\text{ном}}^E = 0,262$  и значения коэффициентов  $q_1$  и  $q_2$ , получаем значение  $q_0^E = 0,255$  с  $\sigma_{q_0} = 1,6 \cdot 10^{-2}$  при температуре 0 °С. Коэффициент дихроизма болометра по результатам измерений  $K_D = 1,57$  [2] с  $\sigma_{K_D} = 2,3 \cdot 10^{-2}$ .

Температурная зависимость удельной теплоемкости платины в диапазоне 0...1500 °С аппроксимировалась методом наименьших квадратов полиномом второй степени:

$$C(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2.$$

Коэффициенты степенной функции и их относительные СКО следующие:  $c_0 = 0,1321$  Дж/г·град;  $\sigma_{c_0} = 0,0013$ ;  $c_1 = 2,76 \cdot 10^{-5}$  Дж/г·град<sup>2</sup>;  $\sigma_{c_1} = 0,017$ ;  $c_2 = -3,06 \cdot 10^{-10}$  Дж/г·град<sup>3</sup>;  $\sigma_{c_2} = 0,0082$ . Так как  $c_2$  очень мало, то считаем зависимость удельной теплоемкости платины от температуры линейной.

Уравнение теплового баланса, усредненное по всей длине болометра, будет

$$\frac{c'_0 + c_1 \delta \bar{T}}{q'_0 + q'_1 \delta \bar{T} + q_2 (\delta \bar{T})^2} d(\delta \bar{T}) = d\left(\frac{\delta \bar{T}}{m}\right), \quad (2)$$

где  $\bar{T}$  – средняя температура нагрева болометра излучением;  $c'_0 = c_0 + c_1 T_0$  – значение удельной теплоемкости болометра при температуре окружающей среды  $T_0$ ;  $q'_0 = q_0 + q_1 T_0 + q_2 T_0^2$  – начальный ФЭП болометра;  $q'_1 = q_1 + 2q_2 T_0$ . Коэффициент неравномерности распределения падающей энергии излучения  $\delta = 1 + \sigma_{E_0}^2 \geq 1$ , где  $\sigma_{E_0}^2$  – относительная дисперсия неравномерности распределения падающей энергии. Так как растекание тепла вдоль болометра к окончанию воздействия импульса очень мало и потери тепла за счет теплообмена с внешней средой также малы, то относительная дисперсия темпера-

туры нагрева вдоль болометра  $\sigma_{T_0}^2$  будет совпадать с  $\sigma_{E_0}^2$ . Обозначим  $\delta \bar{T} = T_3$  – эффективной температурой нагрева болометра,  $\delta \bar{E} / m = E_3 / m$  – эффективной удельной падающей энергией. Решение уравнения (2) с начальным условием  $E_3 / m = 0$  и  $T_3 = 0$  имеет вид

$$\frac{E_3}{m} = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \left( c'_0 - c_1 \frac{q'_1}{2q_2} \right) \ln \frac{(2q_2 T_3 + q'_1 - \sqrt{-\Delta})(q'_1 + \sqrt{-\Delta})}{(2q_2 T_3 + q'_1 + \sqrt{-\Delta})(q'_1 - \sqrt{-\Delta})} + \frac{c_1}{2q_2} \ln \frac{q'_0 + q'_1 T_3 + q_2 T_3^2}{q'_0}, \quad (3)$$

где  $\Delta = 4q_2 q'_0 - q_1'^2 < 0$ .

Вычисления зависимости  $E_3 / m$  от  $T_3$  выполнялись для температур окружающей среды  $T_0 = 0, 20, 40$  °С. Значение погонной массы бралось для платинового болометра диаметром 10 мкм. Результаты вычислений величины  $E_3 / m$  для значений эффективной температуры, указанных в столбце 1 табл. 1, приведены в столбцах 1, 3 и 5 таблицы. Видно, что величина  $E_3 / m$  нелинейна относительно величины  $T_3$ .

Относительное СКО вычисленных значений  $\sigma_{\delta \bar{E} / m}$  для  $T_0 = 20$  °С определяется относительными СКО величин, входящих в выражение (3), и оценивается по формуле

$$\sigma_{E_3 / m}^2 = \sum_{i=1}^5 \left( \frac{x_i}{E_3 / m} \frac{\partial E_3 / m}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2, \quad (4)$$

где  $x_i$  и  $\sigma_i$  – коэффициенты выражения (3) и их относительные СКО. При этом считается, что  $\sigma_{T_3} = 0$ . Вычисленные значения относительных СКО  $\sigma_{E_3 / m}$  приведены в столбце 4 табл. 1. Вклад каждого относительного СКО коэффициентов соотношения (3) виден из слагаемых выражения (4) для эквивалентной температуры  $T_3 = 800$  °С:

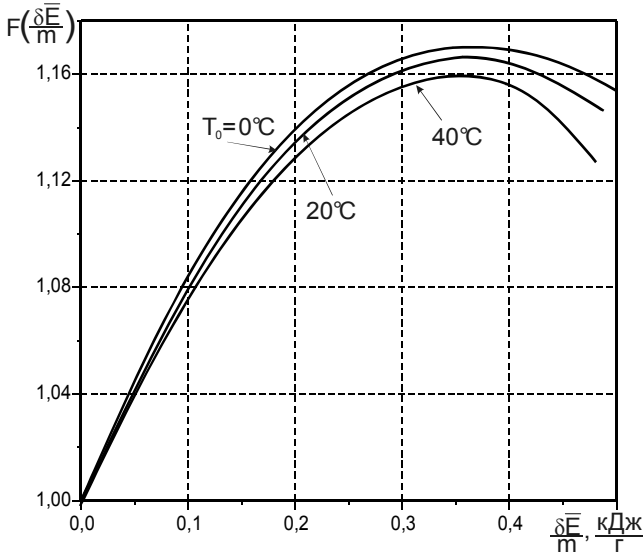
$$\sigma_{E_3 / m}^2 = \dots \sigma_{c_0}^2 + \dots \sigma_{c_1}^2 + \dots \sigma_{q_0}^2 + \dots \sigma_{q_1}^2 + \dots \sigma_{q_2}^2.$$

Таблица 1

$\delta \bar{T}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$		$T_0 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$	$F(\delta \bar{E} / m)$
	$\delta \bar{E} / m, \text{ Дж/г}$	$\delta \bar{E} / m, \text{ Дж/г}$	$\sigma_{\delta \bar{E} / m}$	$\delta \bar{E} / m, \text{ Дж/г}$	
0	0	0	0	0	1,000
100	49,1	48,0	0,015	47,0	1,040
200	93,7	91,7	0,015	89,8	1,073
300	135,0	132,2	0,015	129,6	1,100
400	173,6	170,2	0,014	166,9	1,122
500	210,4	206,2	0,014	202,3	1,140
600	245,5	240,7	0,015	236,3	1,154
700	279,4	274,0	0,015	269,0	1,163
800	312,3	306,4	0,015	300,8	1,170
900	344,4	337,9	0,016	331,8	1,173
1000	376,0	368,9	0,016	362,3	1,174
1100	407,1	399,5	0,017	392,3	1,172
1200	437,9	429,8	0,017	422,1	1,168
1300	468,6	459,9	0,018	451,7	1,161
1400	499,2	489,9	0,019	481,2	1,152
1500	529,8	520,0	0,020	510,7	1,142

Таблица 2

$T_0=0\text{ }^\circ\text{C}$	$T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$	$T_0=40\text{ }^\circ\text{C}$
$\eta'_0 = 7,68\text{ г/кДж}$	$\eta'_0 = 7,84\text{ г/кДж}$	$\eta'_0 = 7,99\text{ г/кДж}$
$a_E = 9,28 \cdot 10^{-1}\text{ г/кДж}$	$a_E = 9,24 \cdot 10^{-1}\text{ г/кДж}$	$a_E = 9,20 \cdot 10^{-1}\text{ г/кДж}$
$\sigma_{a_E} = 0,036$	$\sigma_{a_E} = 0,036$	$\sigma_{a_E} = 0,036$
$b_E = -1,24\text{ г}^2/\text{кДж}^2$	$b_E = -1,27\text{ г}^2/\text{кДж}^2$	$b_E = -1,30\text{ г}^2/\text{кДж}^2$
$\sigma_{b_E} = 0,063$	$\sigma_{b_E} = 0,063$	$\sigma_{b_E} = 0,063$

Зависимости  $F(\delta\bar{E}/m)$  для трёх температур внешней среды

Из уравнения (1) следует

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (\alpha'_0 + \alpha_1 \delta\bar{T}) \bar{T} = \frac{\alpha'_0 q'_0}{c'_0} \cdot \frac{c'_0}{q'_0} \left( 1 + \frac{\alpha_1 T_3}{\alpha'_0} \right) \frac{T_3}{E_3/m} \cdot \frac{\bar{E}}{m} = \eta'_0 F\left(\frac{E_3}{m}\right) \frac{\bar{E}}{m},$$

где  $\eta'_0$  – начальный коэффициент преобразования болометра, а

$$F\left(\frac{E_3}{m}\right) = \frac{c'_0}{q'_0} \left( 1 + \frac{\alpha_1}{\alpha'_0} \right) \frac{T_3}{E_3/m} = 1 + a_E \frac{E_3}{m} + b_E \left(\frac{E_3}{m}\right)^2 \quad (5)$$

есть нормированный коэффициент преобразования болометра и его аппроксимация полиномом второй степени. Коэффициент преобразования болометра  $\eta'_0$  определяется температурой окружающей среды  $T_0$  и равен

$$\eta'_0 = \frac{(\alpha_0 + \alpha_1 T) q_0 (1 + q_1 T_0 + q_2 T_0^2)}{c_0 + c_1 T}.$$

В диапазоне температур 0...40 °С он увеличивается линейно на 4 %. При температуре  $T_0=0\text{ }^\circ\text{C}$  значение  $\eta_0 = 7,68 \cdot 10^{-3}\text{ г/Дж}$ . Поэтому значение  $\eta'_0$

необходимо брать в соответствии с  $T_0$ . Относительное СКО  $\eta_0$  при  $T_0=0\text{ }^\circ\text{C}$  будет  $\sigma_{\eta_0} = (\sigma_{\alpha_0}^2 + \sigma_{q_0}^2 + \sigma_{c_0}^2)^{1/2} = 1,6 \cdot 10^{-2}$  и остается практически неизменным при других значениях  $T_0$ .

Значения нормированного коэффициента преобразования болометра  $F(E_3/m)$  для фиксированных температур  $T_0$  были вычислены в соответствии с выражением (5) и результатами табл. 1, полученные зависимости приведены на рисунке.

Величина  $F(E_3/m) - 1 = \Theta$  есть систематическая погрешность измерения средней удельной падающей энергии излучения лазера на болометр  $\bar{E}/m$ , вызванная нелинейностью характеристики преобразования последнего.

Аппроксимация зависимости  $F(E_3/m)$  полиномом второй степени проводилась методом наименьших квадратов с определением коэффициентов  $a_E$  и  $b_E$  и их относительных СКО  $\sigma_{a_E}$  и  $\sigma_{b_E}$ . Результаты аппроксимации и значения  $\eta'_0$  приведены в табл. 2. Для значений  $T_0$ , отличных от приведенных в табл. 2, необходимо проводить интерполяцию между приведенными значениями.

Таким образом, в уравнении (1) определены величины  $\eta'_0$ ,  $a_E$ ,  $b_E$  и их относительные СКО, то есть выполнена калибровка болометра с диаметром больше длины волны  $E$ -поляризованного излучения. Уравнение измерения является кубическим относительно удельной энергии излучения  $\bar{E}/m$ , и зависимость  $\Delta R/R_0$  от  $\bar{E}/m$  есть однозначная и непрерывная функция в рассмотренном диапазоне эффективной удельной энергии  $\delta\bar{E}/m$ .

#### Список литературы

1. Кузьмичев В.М. Преобразование платиновым тонкопроволочным болометром энергии импульса лазера / В.М.Кузьмичев, С.В. Погорелов // Украинський метрологічний журнал. – 2003. – № 2. – С. 42–47.
2. Измерение фактора эффективности поглощения тонкопроволочного болометра / В.М. Кузьмичев, И.А. Приз, Б.В. Сафронов [и др.] // Измерительная техника. – 2007. – № 7. – С. 28–30.