

С. В. Погорелов

Национальный фармацевтический университет

53, ул. Пушкинская, Харьков, 61002, Украина

E-mail: svpog@yahoo.co.uk

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

Одним из приоритетных направлений совершенствования квантово-оптических средств является повышение мощности лазерного излучения и улучшение его пространственно-временных параметров. При этом важными являются вопросы высокоточного измерения этих параметров в реальных условиях функционирования лазерных устройств. При измерении характеристик высокоэнергетических лазерных пучков возникают специфические особенности процесса регистрации, которые вызваны нелинейным характером взаимодействия мощного лазерного излучения с материалом приемника. Целью работы является определение функции преобразования тонкопроволочным болометром энергии импульса лазерного излучения на длине волны 1,06 мкм с учетом возникающей нелинейности и неравномерности распределения интенсивности по поверхности приемного элемента. С учетом полученных температурных зависимостей основных физических параметров болометра решено уравнение теплового баланса. Получены зависимости эффективной температуры нагрева болометра от эффективной удельной энергии лазерного излучения, падающего на болометр. Обратная функция аппроксимирована полиномом второй степени, которая является функцией преобразования. Получены числовые значения коэффициентов кубического уравнения измерения и их относительные среднеквадратические отклонения, что позволяет проводить абсолютные измерения энергетических параметров лазерного излучения на длине волны 1,06 мкм тонкопроволочными болометрами. Таким образом, обоснована методика абсолютной калибровки тонкопроволочного болометра энергии импульса лазерного излучения на длине волны 1,06 мкм. Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

Ключевые слова: лазер, болометр, лазерное излучение, мощность, энергия импульса.

Тонкопроволочные болометры находят применение 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.

Настоящая 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

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

где R_0 – начальное сопротивление болометра; ΔR – его максимальное приращение под действием излучения лазера; $\eta \left(\frac{\delta \bar{E}}{m} \right)$ – коэффициент преобразования болометра, зависящий от средней погонной падающей энергии \bar{E} , погонной массы m и коэффициента неравномерности падающей энергии излучения по площади входной апертуры

измерителя δ . Коэффициент преобразования болометра можно записать

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

где $\eta'_0 = \frac{\alpha'_0 q'_0}{c'_0}$ – коэффициент преобразования

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

В работе [1] показано, что температурную зависимость температурного коэффициента сопротивления (ТКС) платины в диапазоне температур 0...1 500 °С можно записать

$$\alpha(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T, \tag{3}$$

где α_0 – ТКС платины при температуре 0°С; α_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 металлического цилиндра равен его коэффициенту поглощения. Температурную зависимость коэффициента поглощения платинового болометра для E -поляризованного излучения представим в виде

$$q^E(T) = q_0^E (1 + q_1 T + q_2 T^2), \quad (4)$$

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

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

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

Используя результаты измерений, приведенные в [2], в которых $q_{\text{полг}}^E = 0,262$ 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 [2] $K_D = 1,57$ с $\sigma_{K_D} = 2,3 \cdot 10^{-2}$.

Температурная зависимость удельной теплоемкости платины в диапазоне 0...1 500 °С аппроксимировалась методом наименьших квадратов полиномом второй степени

$$C(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2. \quad (5)$$

Коэффициенты степенной функции и их относительные СКО получились:

$$c_0 = 0,1321 \text{ Дж/г} \cdot \text{град}; \quad \sigma_{c_0} = 0,0013;$$

$$c_1 = 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/г} \cdot \text{град}^2; \quad \sigma_{c_1} = 0,017;$$

$$c_2 = -3,06 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/г} \cdot \text{град}^3; \quad \sigma_{c_2} = 0,0082.$$

Так как c_2 очень мало, то считаем зависимость удельной теплоемкости платины от температуры линейной.

Уравнение теплового баланса, усредненное по всей длине болометра, будет

$$\frac{c'_0 + c_1 \delta \bar{T}}{q'_0 + q'_1 \delta \bar{T} + q_2 (\delta \bar{T})^2} d(\delta \bar{T}) = d\left(\frac{\delta \bar{T}}{m}\right), \quad (6)$$

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 фактор эффективности поглощения 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 сре-

дой также малы, то относительная дисперсия температуры 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 (6) с начальным условием $E_3/m = 0$ и $T_3 = 0$ имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{E_3}{m} = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}} \left(c'_0 - c_1 \frac{q'_1}{2q_2} \right) \times \\ \times \ln \left[\frac{(2q_2 T_3 + q'_1 - \sqrt{-\Delta})(q'_1 + \sqrt{-\Delta})}{(2q_2 T_3 + q'_1 + \sqrt{-\Delta})(q'_1 - \sqrt{-\Delta})} \right] + \\ + \frac{c_1}{2q_2} \ln \frac{q'_0 + q'_1 T_3 + q_2 T_3^2}{q'_0}, \end{aligned} \quad (7)$$

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 выбрали 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. Видно, что величина E_3/m нелинейна относительно величины T_3 .

Таблица 1
Зависимости E_3/m от T_3 для различных начальных температур 0, 20 и 40 °С

$\delta \bar{T}$, °С	$T_0 = 0$ °С	$T_0 = 20$ °С		$T_0 = 40$ °С	$F(\delta \bar{E}/m)$
	$\delta \bar{E}/m$, Дж/г	$\delta \bar{E}/m$, Дж/г	$\sigma_{\delta \bar{E}/m}$	$\delta \bar{E}/m$, Дж/г	
1	2	3	4	5	6
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
1 000	376,0	368,9	0,016	362,3	1,174
1 100	407,1	399,5	0,017	392,3	1,172
1 200	437,9	429,8	0,017	422,1	1,168
1 300	468,6	459,9	0,018	451,7	1,161
1 400	499,2	489,9	0,019	481,2	1,152
1 500	529,8	520,0	0,020	510,7	1,142

Относительное СКО вычисленных значений $\sigma_{\delta \bar{E}/m}$ для $T_0 = 20$ °С определяется относи-

тельными СКО величин, входящих в выражение (7), и оценивается по формуле

$$\sigma_{E_3/m}^2 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{x_i}{E_3/m} \frac{\partial E_3/m}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2, \quad (8)$$

где x_i и σ_i – коэффициенты выражения (7) 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 (7) виден из слагаемых выражения (8) для эквивалентной температуры $T_3 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\sigma_{E_3/m}^2 = \dots \sigma_{c_0}^2 + \dots \sigma_{c_1}^2 + \dots \sigma_{q_0}^2 + \dots \sigma_{q_1}^2 + \dots \sigma_{q_2}^2. \quad (9)$$

Из уравнения (1) следует

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (\alpha'_0 + \alpha_1 \delta \bar{T}) \bar{T} = \frac{\alpha'_0 q'_0}{c'_0} \frac{c'_0}{q'_0} \left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha'_0} T_3 \right) \times \quad (10)$$

$$\times \frac{T_3}{E_3/m} \frac{\bar{E}}{m} = \eta'_0 F \left(\frac{E_3}{m} \right) \frac{\bar{E}}{m},$$

где η'_0 – начальный коэффициент преобразования болометра, а

$$F \left(\frac{E_3}{m} \right) = \frac{c'_0}{q'_0} \left(1 + \frac{\alpha_1}{\alpha'_0} \right) \frac{T_3}{E_3/m} = \quad (11)$$

$$= 1 + a_E \frac{E_3}{m} + b_E \left(\frac{E_3}{m} \right)^2$$

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

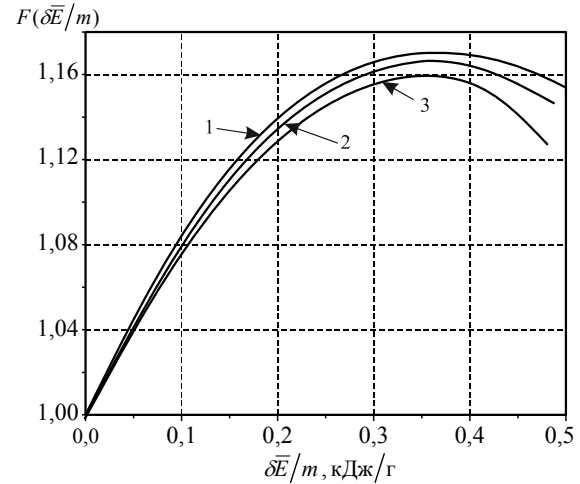
$$\eta'_0 = \frac{(\alpha_0 + \alpha_1 T) q_0 (1 + q_1 T_0 + q_2 T_0^2)}{c_0 + c_1 T}. \quad (12)$$

В диапазоне температур $0 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 η'_0 необходимо брать в соответствии с T_0 . Относительное СКО η_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 .

Значение нормированного коэффициента преобразования болометра $F(E_3/m)$ для фиксированных температур T_0 были вычислены в соответствии с выражением (11) 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 бо-

лометр \bar{E}/m , вызванная нелинейностью характеристики преобразования последнего.



Зависимости $F(\delta \bar{E}/m)$ для различных начальных температур: 1 – $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

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 σ_{a_E} и σ_{b_E} . Результаты аппроксимации и значения η'_0 приведены в табл. 2. Для значений T_0 , отличных от приведенных в табл. 2, необходимо проводить интерполяцию между приведенными значениями.

Таблица 2
Коэффициенты аппроксимации коэффициента преобразования для различных начальных температур

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

Таким образом, в уравнении (1) определены величины η'_0 , a_E , b_E и их относительные СКО, т. е. 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 $\delta\bar{E}/m$.

Библиографический список

1. Кузьмичев В. М. Преобразование платиновым тонкопроволочным болометром энергии импульса лазера / В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов // Укр. метролог. журн. – 2003. – № 2. – С. 42–47.
2. Измерение фактора эффективности поглощения тонкопроволочного болометра / В. М. Кузьмичев, И. А. Приз, Б. В. Сафронов и др. // Измерит. техн. – 2007. – № 7. – С. 28–30.

Рукопись поступила 20.05.2014.

S. V. Pogorelov

CALIBRATION OF THIN-WIRE BOLOMETER OF LASER PULSE ENERGY ON WAVELENGTH 1.06 μ

One of the priority directions of upgrading quantum-optics gauges is the increase of laser power and improvement of its spatial-time parameters. At the same time the problem of high-precision measurements of these parameters in the actual-use environment of laser gauges is important. The specific features of registration process appear at the measurements of high-energy laser pulse characteristics. They are caused by non-linearity behavior of interaction of powerful laser radiation with receiver material. The aim of the work is the determination of transfer function of thin-wire bolometer of laser pulse energy on wavelength 1.06 μ with regard to nonlinearity and non-uniformity of intense distribution along the receiver. The heat-balance equation has been solved with regard to derived temperature dependencies of basic physical parameters of the bolometer. The dependencies of

effective temperature of bolometer heating on the effective specific energy of incident laser radiation have been determined. The inverse function has been approximated with a polynomial of the second order. This function is transfer one. Numerical values of coefficients of a cubic equation of measurements have been determined with their relative root-mean-square deviations. It allows us to carry out absolute measurements of energy parameters of laser radiation on wavelength 1.06 μ with thin-wire bolometers. Thus, the method of absolute calibration of thin-wire bolometer of laser pulse energy on wavelength 1.06 μ is substantiated.

Key words: laser, bolometer, laser radiation, power, pulse energy.

С. В. Погорелов

КАЛІБРУВАННЯ ТОНКОДРОТЯНОГО БОЛОМЕТРА ЕНЕРГІЇ ІМПУЛЬСУ ЛАЗЕРА НА ДОВЖИНІ ХВИЛІ 1,06 мкм

Одним із пріоритетних напрямів удосконалення квантово-оптичних засобів є підвищення потужності лазерного випромінювання та поліпшення його просторово-часових параметрів. При цьому важливими залишаються питання високоточного вимірювання цих параметрів у реальних умовах функціонування лазерних пристроїв. При вимірюванні характеристик високоенергетичних лазерних пучків виникають специфічні особливості процесу реєстрації, які викликані нелінійним характером взаємодії потужного лазерного випромінювання з матеріалом приймача. Метою роботи є визначення функції перетворення тонкодотряним болометром енергії імпульсу лазерного випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм з урахуванням нелінійності, що виникає, та нерівномірності розподілу інтенсивності по поверхні прийомного елемента. З урахуванням отриманих температурних залежностей основних фізичних параметрів болометра розв'язане рівняння теплового балансу. Отримано залежності ефективної температури нагріву болометра від ефективної питомої енергії лазерного випромінювання, що падає на болометр. Обернена функція апроксимована поліномом другого ступеня, яка є функцією перетворення. Отримано числові значення коефіцієнтів кубічного рівняння вимірювання та їх відносні середньоквадратичні відхилення, що дозволяє проводити абсолютні вимірювання енергетичних параметрів лазерного випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм тонкодотряними болометрами. Таким чином, обґрунтовано методику абсолютного калібрування тонкодотряного болометра енергії імпульсу лазерного випромінювання на довжині хвилі 1,06 мкм.

Ключові слова: лазер, болометр, лазерне випромінювання, потужність, енергія імпульсу.