

PACS: 07.57. Kp, 42.60.Jf

MEASUREMENT OF ENERGY PARAMETERS OF LASER RADIATION WITH THREE-GRATINGS THINWIRE BOLOMETER

S.V. Pogorelov

*National university of pharmacy
Ukraine, Kharkov, Pushkinska str., 53
e-mail: svpog@yahoo.co.uk
Received May 6, 2014*

The measuring method of energy parameters of continuous and pulse laser radiation with three-gratings thin-wire bolometric gauge has been suggested and grounded. Dominant errors at the expense of nonlinearity of transformation characteristic of gauge have been studied and eliminated. The analysis of errors has been carried out for platinum bolometric gauge with diameter of grating elements 10 microns and laser radiation on wavelength 10.6 microns. It was shown that relative root-mean square deviation of power measurement is 0.6% and the energy one is 0.2%.

KEY WORDS: laser, bolometer, bolometric grating, pulse energy, power, polarization

ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТРЬОХГРАТЧАСТИМ ТОНКОДРОТЯНИМ БОЛОМЕТРОМ

С.В. Погорелов

*Національний фармацевтичний університет
Україна, Харків, вул. Пушкінська, 53*

У роботі запропоновано та обґрунтовано методику вимірювання енергетичних параметрів безперервного та імпульсного лазерного випромінювання трьохградчастим тонкодротним болометричним вимірювачем. У роботі розглянуті та виключені домінуючі похибки за рахунок нелінійності характеристики перетворення вимірювача. Для платиного болометричного вимірювача з діаметром елементів ґраток 10 мкм та лазерного випромінювання з довжиною хвилі 10,6 мкм проведений аналіз похибок показав, що відносні СКВ вимірювання потужності складає 0,6%, а енергія імпульсу – 0,2%.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лазер, болометр, болометрична решітка, енергія імпульсу, потужність, поляризація

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕХРЕШЕТОЧНЫМ ТОНКОПРОВОЛОЧНЫМ БОЛОМЕТРОМ

С.В. Погорелов

*Национальный фармацевтический университет
Украина, Харьков, ул. Пушкинская, 53*

В работе предложена и обоснована методика измерения энергетических параметров непрерывного и импульсного лазерного излучения трехрешеточным тонкопроволочным болометрическим измерителем. В работе рассмотрены и исключены доминирующие погрешности за счет нелинейности характеристики преобразования измерителя. Для платинового болометрического измерителя с диаметром элементов решеток 10 мкм и лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм проведенный анализ погрешностей показал, что относительное СКО измерения мощности составляет 0,6%, а энергия импульса – 0,2%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лазер, болометр, болометрическая решетка, энергия импульса, мощность, поляризация

Одним из приоритетных направлений лазеров 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 [1,2,3]. При измерении характеристик высокоэнергетических лазерных пучков возникают специфические особенности процесса регистрации, которые вызваны нелинейным характером взаимодействия мощного лазерного излучения с материалом приемника. В ближнем и дальнем инфракрасных диапазонах лазерного излучения основным типом измерительных преобразователей являются тепловые приемники [4,5].

Одними из первичных измерительных преобразователей лазерного излучения являются тонкопроволочные болометры, которые используются для измерения параметров интенсивного и широкоапертурного лазерного излучения: непрерывной мощности, энергии однократных импульсов [6], профильного распределения интенсивности излучения, состояния поляризации [7], обобщенной площади пучка [8], его диаметра [9] и других. При существенных температурах нагрева болометра излучением изменяются его основные физические параметры (температурный коэффициент сопротивления, фактор эффективности поглощения, удельная теплоемкость, коэффициент теплообмена с внешней средой), определяющие его коэффициент преобразования. Появляющаяся нелинейность характеристики преобразования болометра, усиливающаяся неравномерным распределением интенсивности излучения по площади входной апертуры измерителя, приводит к систематическим погрешностям измеряемых параметров излучения. Одним из наиболее подходящих материалов болометров является платина, имеющая высокую температуру плавления и хорошие антикоррозийные свойства.

Целью работы является обоснование методики измерения энергетических параметров мощного непрерывного и импульсного лазерного излучения, коэффициента неравномерности распределения интенсивности излучения по площади входной апертуры решеток и поляризационных коэффициентов взаимодействия болометрических элементов решеток с излучением профильными болометрическими решетками с исключением систематических погрешностей за счет нелинейности характеристики преобразования болометров.

Для измерения указанных параметров излучения используются три идентичные профильные болометрические решетки с 16 тонкопроволочными элементами в каждой. Болометрические элементы решеток имеют угловые направления $\psi_1 = 0$; $\psi_2 = +\pi/3$ и $\psi_3 = -\pi/3$. Сигналы регистрируются с каждого болометрического элемента решеток.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Вектор напряженности электрического поля с линейной поляризацией $\vec{\mathbf{e}}$ образует углы φ_i относительно i -ых решеток. За положительное направление отсчета углов ψ_i и φ_i выбрано направление против хода часовой стрелки.

Сигналы решеток при измерении непрерывной мощности можно записать

$$U_i = \sum_{j=1}^n U_{ij} = \eta_0 \bar{P} F_i(k_i \delta \bar{P}) k_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Расшифровка величин, входящих в данное выражение, дана в [6]. При измерении энергии импульса излучения в данном выражении необходимо \bar{P} заменить на среднюю погонную удельную падающую энергию \bar{E}/m .

Поляризационные коэффициенты взаимодействия для линейной поляризации излучения имеют вид

$$k_i = \cos^2(\varphi - \psi_i) + K_D \sin^2(\varphi - \psi_i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

где K_D – коэффициент дихроизма болометра, равный отношению факторов эффективности поглощения для перпендикулярной и параллельной оси болометра линейной поляризации излучения. В случае эллиптической поляризации излучения поляризационные коэффициенты решеток записываются

$$k_i = K_D - (K_D - 1) \left[\zeta_{x_i}^2 \cos^2 \psi_i + \zeta_{y_i}^2 \sin^2 \psi_i + \zeta_{x_i} \zeta_{y_i} \sin 2\psi_i \cos \alpha_i \right], \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

где ζ_{x_i} и ζ_{y_i} – относительные взаимно перпендикулярные амплитуды электрического поля относительно i -ой решетки. Эти составляющие связаны соотношением $\zeta_{x_i}^2 + \zeta_{y_i}^2 = 1$; α_i – сдвиг фаз между электрическими составляющими ζ_{x_i} и ζ_{y_i} .

Сумма поляризационных коэффициентов как для линейной поляризации по формуле (2), так и для эллиптической поляризации по формуле (3) дает одно и тоже значение

$$\sum_{i=1}^3 k_i = \frac{3}{2}(1 + K_D). \quad (4)$$

Профильные сигналы болометрических элементов решеток U_{ij} позволяют определить коэффициенты неравномерности распределения интенсивности излучения каждой решетки [8]

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{U_{ij}^2}{\bar{U}_i^2}; \quad \bar{U}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{ij}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

где \bar{U}_i – среднее значение сигналов болометрических элементов i -ой решетки. Общий коэффициент неравномерности распределения интенсивности излучения по площади входной апертуры преобразователя будет

$$\delta = (\delta_1 \delta_2 \delta_3)^{\frac{2}{3}}. \quad (6)$$

Нормированные коэффициенты преобразования решеток $F_i(k_i \delta \bar{P})$ в нелинейном режиме работы платиновых болометров хорошо аппроксимируются полиномами второй степени от $k_i \delta \bar{P}$ в виде [10]

$$F_i(k_i \delta \bar{P}) = 1 + a_p k_i \delta \bar{P} + b_p (k_i \delta \bar{P})^2 \quad (7)$$

и для длины волны излучения 10,6 мкм, диаметра болометров 10 мкм и температуры окружающей среды $T=20^\circ\text{C}$ коэффициенты данного полинома со своими относительными средними квадратичными отклонениями (СКО) составляют: $a_p = -8,0 \cdot 10^{-3} \text{ см/Vm}$; $\sigma_a = 0,05$; $b_p = -1,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{Vm}^2$; $\sigma_b = 0,06$, а коэффициент преобразования $\eta_{0,p} = 0,494 \text{ см/Vm}$, $\sigma_{\eta_0} = 0,01$. Значения соответствующих коэффициентов для средней

погонной удельной энергии \bar{E}/m будут [10]: $\eta_{0E} = 1,159 \text{ э/кДж}$, $\sigma_{\eta_{0E}} = 1,7 \times 10^{-3}$; $a_E = 1,546 \times 10^{-1} \text{ э/кДж}$, $\sigma_{a_E} = 2,7 \times 10^{-3}$; $b_E = -3,2 \times 10^{-2} \text{ э/кДж}$, $\sigma_{b_E} = 1,6 \times 10^{-3}$.

Как следует из выражений (1) и (7), сумма сигналов решеток будет давать кубическое уравнение относительно \bar{P} и оно будет являться уравнением измерения

$$M(\bar{P}) = -U_{\Sigma} + c\bar{P} + d\bar{P}^2 + f\bar{P}^3 = 0, \quad (8)$$

где $U_{\Sigma} = \frac{1}{\eta_0} \sum_{i=1}^3 U_i$; $c = \sum_{i=1}^3 U_{i0}$; $d = a\delta \sum_{i=1}^3 U_{i0}^2$; $f = a\delta^2 \sum_{i=1}^3 U_{i0}^3$.

Входящие в него коэффициенты η_0 , a и b известны, коэффициент δ в первом приближении находится по профильным сигналам и выражению (6). Коэффициенты k_i можно приближенно определить по сигналам решеток считая, что болометры работают в линейном режиме и $F_i(k_i\delta\bar{P}) = 1$, вводя нормированные сигналы решеток

$$U_{i0} = \frac{U_i}{\eta_0 \bar{P}} = \frac{3}{2} (1 + K_D) \frac{U_i}{\sum_{i=1}^3 U_i} = k_i. \quad (9)$$

Видно, что в этих условиях нормированные сигналы решеток равны поляризационным коэффициентам взаимодействия болометров с излучением.

По методике вычисления фактора эффективности поглощения (ФЭП) q^E платинового болометра диаметром 10 мкм и Е-поляризованного излучения с длиной волны 10,6 мкм, изложенной в работе [10], были вычислены значения ФЭП того же болометра для Н-поляризованного излучения q^H , приведенные в третьем столбце таблицы. Зная q^E и q^H в диапазоне температур (0...1500)°С были вычислены значения коэффициента дихроизма K_D , приведенные в четвертом столбце. Видно, что K_D очень слабо изменяется в указанном диапазоне температур и среднее значение его равно 1,381.

По значениям в первом приближении коэффициентов δ и k_i путем решения уравнения (8) находится в первом приближении значение средней погонной падающей мощности на болометрические элементы \bar{P}' . Уравнение (8) имеет одно действительное решение, определяющее \bar{P}' , и два комплексных. Определяется в первом приближении эффективная мощность $\delta\bar{P}'$. И теперь вводятся поправки на систематические погрешности найденных коэффициентов δ и k_i за счет нелинейности характеристики преобразования болометров.

Таблица.

Температурные зависимости факторов эффективности поглощения и коэффициента дихроизма

| T, °С | q^E | q^H | K_D |
|-------|--------|--------|-------|
| 0 | 0,0363 | 0,0500 | 1,377 |
| 100 | 0,0427 | 0,0588 | 1,377 |
| 200 | 0,0481 | 0,0662 | 1,376 |
| 300 | 0,0527 | 0,0727 | 1,379 |
| 400 | 0,0569 | 0,0784 | 1,379 |
| 500 | 0,0605 | 0,0836 | 1,381 |
| 600 | 0,0639 | 0,0882 | 1,380 |
| 700 | 0,0670 | 0,0925 | 1,381 |
| 800 | 0,0698 | 0,0964 | 1,381 |
| 900 | 0,0724 | 0,1000 | 1,381 |
| 1000 | 0,0748 | 0,1033 | 1,381 |
| 1100 | 0,0770 | 0,1064 | 1,382 |
| 1200 | 0,0791 | 0,1093 | 1,382 |
| 1300 | 0,0809 | 0,1120 | 1,384 |
| 1400 | 0,0827 | 0,1145 | 1,384 |
| 1500 | 0,0844 | 0,1168 | 1,384 |

Нелинейность поляризационных коэффициентов k_i можно определить исходя из выражений (1) и (4). Так в нелинейном режиме работы болометров поляризационный коэффициент первой решетки будет иметь

значение k_1' , который определяется выражением

$$k_1' = \frac{1,5(1+K_D)}{1 + \frac{F_2 k_2}{F_1 k_1} + \frac{F_3 k_3}{F_1 k_1}}, \quad (10)$$

в котором k_i есть значения коэффициентов для падающего на болометры излучения. Аналогичные выражения будут и для коэффициентов k_2' и k_3' . На рис. 1а приведены зависимости отношения k_i/k_1' в зависимости от k_1' и эффективной мощности излучения $\delta \bar{P}'$. Из полученных зависимостей видно, что при значениях k_1' меньше $0,5(1+K_D)$ будет происходить завышение k_1' по сравнению с k_i , а при значениях k_1' больше $0,5(1+K_D)$ будет происходить занижение k_1' . По найденному в первом приближении значению $\delta \bar{P}'$ находят по кривым рис. 1а поправочные множители к коэффициентам k_i' и их значения во втором приближении будут k_i'' .

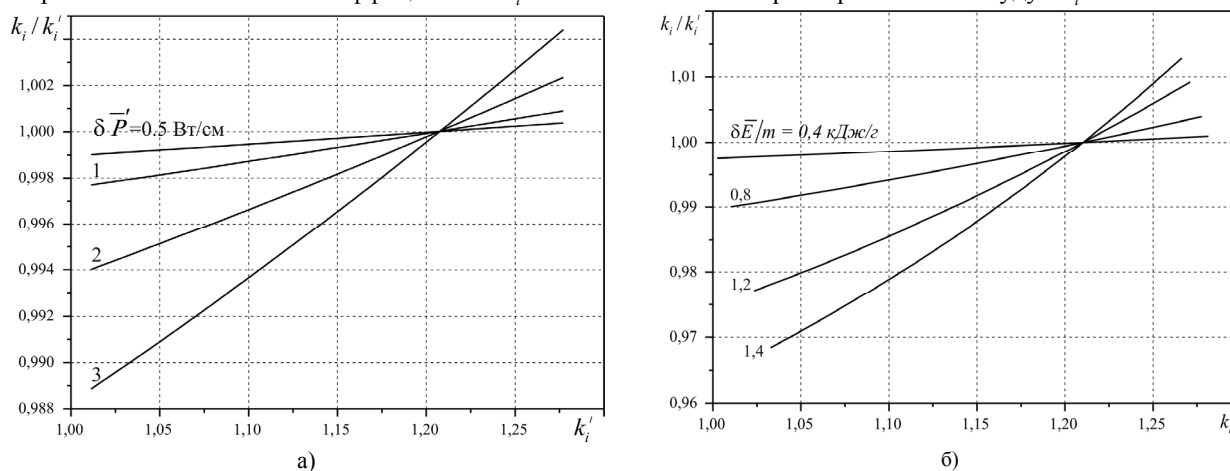


Рис. 1. Зависимости поляризационного коэффициента k_1 от измеренного значения k_1'

а) для разных значений $\delta \bar{P}'$; б) для разных значений $\delta \bar{E}'/m$

Следует отметить, что как для линейной, так и для эллиптической поляризации излучения поляризационные коэффициенты могут принимать значения от 1 до K_D . На рис. 1б приведены зависимости отношения k_i/k_1' для эффективной удельной энергии $\delta \bar{E}'/m$. В импульсном режиме нелинейность поляризационных коэффициентов k_i меньше, чем для непрерывной мощности. Это объясняется меньшим изменением нормированного коэффициента преобразования болометра $F\left(\delta \frac{\bar{E}'}{m}\right)$ и его прохождением через максимальное значение.

Нелинейность коэффициента δ определялась для гауссова пучка излучения, энергетический центр которого расположен в центре решетки и имеющего среднеквадратический радиус $\sigma = 2\chi$, где χ - период решетки, длина каждого болометрического элемента составляла $2\ell_0$.

Коэффициент δ_i каждой решетки вычислялся по выражению (5) с учетом падающей интенсивности и ее состояния поляризации на каждый болометрический элемент, определения его нормированного коэффициента преобразования и нормированного сигнала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

Вычисления проводились для средней погонной падающей мощности в интервале $\bar{P} = 0 \dots 1 \text{ Вт/см}$ и средней погонной удельной энергии в интервале $\bar{E}/m = 0 \dots 0,4 \text{ кДж/г}$. Полученные зависимости показаны на рис. 2. По оси ординат отложено отношение δ/δ_0 , где $\delta_0 = S_0/4\pi\sigma^2 = 5,093$ – коэффициент неравномерности распределения интенсивности излучения в линейном режиме работы болометров и S_0 - площадь решетки. По оси абсцисс отложены эффективная мощность $\delta \bar{P}$ и эффективная удельная энергия $\delta \bar{E}/m$. Указанные кривые не зависят от изменения угла направления линейной поляризации излучения.

Кривая для энергии импульса излучения растет, проходит через максимум и потом спадает. В указанном интервале $\delta \bar{E}/m$ коэффициент δ может увеличиваться на 6,2 %. Кривая для непрерывной мощности в указанном интервале $\delta \bar{P}$ уменьшается на 10,5 %. Аналогичные кривые получаются и для других гауссовых пучков.

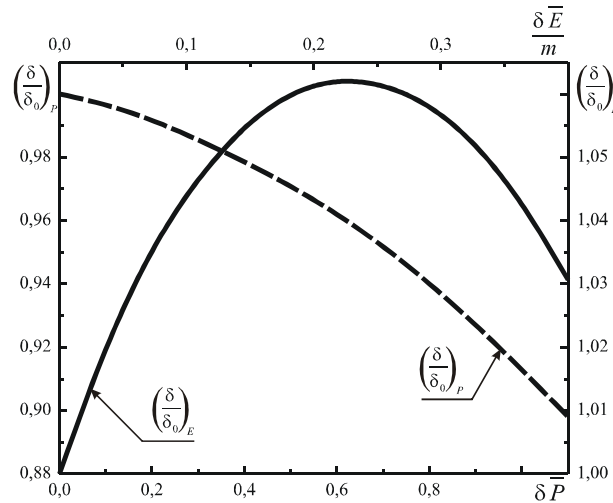


Рис.2. Зависимости относительных коэффициентов неравномерности распределения δ/δ_0 от $\delta \bar{P}$ и $\delta \bar{E}/m$.

По скорректированным значениям коэффициентов k_i и δ уточняются значения коэффициентов c , d и f .

Со скорректированными коэффициентами снова решается уравнение (8) и находится уточненное значение \bar{P}'' . Можно аналогичным образом проводить последующие уточнения величины \bar{P} . Мощность пучка лазерного излучения будет

$$P = 3 \frac{\bar{P}}{d_s} S, \tag{11}$$

где d_s – диаметр болометрических элементов; S – площадь каждой решетки.

Перейдем к оценке случайной погрешности измеренной падающей на болометр средней погонной мощности \bar{P} , вызываемой случайными погрешностями регистрации сигналов болометрических элементов. Коэффициент неравномерности распределения падающей мощности пусть будет $\delta = 4,0$, а $\bar{P} = 0,5 \text{ Bm/cm}$. Количество болометрических элементов в каждой решетке составляет n .

Абсолютное СКО измеряемых сигналов болометрических элементов $\sigma_{U_{ij}}$ определяется уровнем квантования амплитудно-цифровых преобразователей (АЦП), а относительное СКО сигналов решеток будет

$$\sigma_{\bar{U}_i,0} = \frac{\sigma_{U_i}}{U_i} = \frac{\sigma_{U_{ij}} / \sqrt{n}}{U_i} = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{\sigma_{U_{ij}}}{U_i}. \tag{12}$$

Величина $\sigma_{U_{ij}}/\sqrt{U_i}$ представляет собой среднее значение относительного СКО измеряемых сигналов болометрических элементов i -ой решетки и для современных АЦП довольно легко может быть обеспечено значением 10^{-3} . Будем считать, что эта величина не будет превышать приведенного значения. Тогда $\sigma_{\bar{U}_i,0} = 2,5 \times 10^{-4}$ и сигналы решеток будут регистрироваться точнее сигналов болометрических элементов.

Для коэффициента неравномерности распределения интенсивности излучения i -ой решетки дисперсия будет определяться

$$\sigma_{\delta_i}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{2U_{ij}}{U_i} \right)^2 \sigma_{U_{ij}}^2 + \left(-\frac{2U_{ij}^2}{U_i^3} \right)^2 \sigma_{U_i}^2 \right]. \tag{13}$$

Если учесть, что $U_{ij}/\sqrt{U_i} \approx 1$, то после несложных алгебраических преобразований получим

$$\sigma_{\delta_i} = 2 \sqrt{\frac{n+1}{n}} \sigma_{\bar{U}_i,0} = 5 \times 10^{-4}, \tag{14}$$

а относительное СКО коэффициента δ при условии, что $\delta_1 \approx \delta_2 \approx \delta_3 \approx \delta_i$, будет

$$\sigma_{\delta_0} = \frac{2\sigma_{\delta_i}}{\delta} = 2,5 \times 10^{-4}. \quad (15)$$

Относительное СКО $\sigma_{K_{i0}}$ величины k_i , которая определяется выражением (9), будет

$$\sigma_{K_{i0}}^2 = \left(\frac{K_D}{k_i} \frac{\partial k_i}{\partial K_D} \right)^2 \sigma_{K_{D0}}^2 + \sum_{i=1}^3 \left(\frac{U_i}{k_i} \frac{\partial k_i}{\partial U_i} \right)^2 \sigma_{U_{i0}}^2. \quad (16)$$

После несложных вычислений получаем значение $\sigma_{k_{i0}} = 0,37 \times 10^{-3}$. Перейдем к оценке относительного СКО $\sigma_{\bar{P}_0}$ падающей погонной средней мощности \bar{P} на болометрические элементы. Величина \bar{P} удовлетворяет уравнению (8) и $\sigma_{\bar{P}_0}$ будет определяться коэффициентами U_Σ, c, d, f и их относительными СКО. Можно записать

$$\sigma_{\bar{P}_0}^2 = \left(\frac{U_\Sigma}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial U_\Sigma} \right)^2 \sigma_{U_{\Sigma_0}}^2 + \left(\frac{c}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial c} \right)^2 \sigma_{c_0}^2 + \left(\frac{d}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial d} \right)^2 \sigma_{d_0}^2 + \left(\frac{f}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial f} \right)^2 \sigma_{f_0}^2, \quad (17)$$

где $\sigma_{U_{\Sigma_0}}, \sigma_{c_0}, \sigma_{d_0}, \sigma_{f_0}$ – относительные СКО соответствующих величин. Частные производные \bar{P} от коэффициентов будем получать в результате дифференцирования неявной функции в виде уравнения (8). Например для коэффициента c частная производная будет иметь вид:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial c} = - \frac{\partial M(\bar{P}) / \partial c}{\partial M(\bar{P}) / \partial \bar{P}} = - \frac{\bar{P}}{c + 2d\bar{P} + 3f\bar{P}^2}, \quad (18)$$

и таким образом для остальных коэффициентов. Относительные СКО коэффициентов будут определяться соответствующими выражениями в формуле (8) и их оценки будут:

$$\begin{aligned} \sigma_{U_{\Sigma_0}}^2 &\approx \sigma_{U_{i_0}}^2 + \sigma_{n_0}^2 \approx \sigma_{n_0}^2 = 10^{-4}; \\ \sigma_{c_0}^2 &= \left(\frac{K_D}{c} \frac{\partial c}{\partial K_D} \right)^2 \sigma_{K_{D_0}}^2 \approx 4 \times 10^{-8}; \\ \sigma_{d_0}^2 &= \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{\delta_0}^2 + 4\sigma_{U_{i_0}}^2 \approx 25 \times 10^{-4}; \\ \sigma_{f_0}^2 &= \sigma_{b_0}^2 + 4\sigma_{\delta_0}^2 + 9\sigma_{U_{i_0}}^2 \approx 36 \times 10^{-4}. \end{aligned}$$

Подставляя для выбранных параметров излучения значения коэффициентов, их относительных СКО и частных производных получаем относительное СКО средней падающей погонной мощности $\sigma_{\bar{P}_0} = 0,53\%$. Относительное СКО полной мощности пучка лазера, в соответствии с выражением (11), будет определяться выражением

$$\sigma_{P_0} = \left(\sigma_{\bar{P}_0}^2 + \sigma_{d\delta_0}^2 + \sigma_{S_0}^2 \right)^{1/2} \approx \sigma_{\bar{P}_0} = 0,53\%. \quad (19)$$

ВЫВОДЫ

Обоснована методика измерения непрерывной мощности и энергии импульса лазерного излучения тремя профильными болометрическими решетками с исключением доминирующей погрешности за счет нелинейности характеристики преобразования болометра. Проведен метрологический анализ погрешностей получаемых результатов измерений.

Основной вклад в относительное СКО σ_{P_0} вносит относительное СКО коэффициента преобразования σ_{n_0} . Для измерения энергии импульса лазера на основании работы [10] относительное СКО средней удельной погонной энергии $\sigma_{\frac{E_0}{m}}$ не будет превышать 0,2%. Относительное СКО полной мощности или энергии импульса лазера будут аналогичными, так как относительные СКО площади решетки, диаметра болометра и его погонной массы будут значительно меньше $\sigma_{\bar{P}_0}$ и $\sigma_{\frac{E_0}{m}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Timofeev E.P. Razrabotka i issledovanie sredstv izmerenii energeticheskikh kharakteristik lazernogo izlucheniya // Ukrains'kyi metrologichnyi zhurnal. – 2009. – No.2 – S.29-34.
2. Oleinik A.S., Fedorov A.V. Metod vizual'nogo kontrolya parametrov puchkov lazernogo izlucheniya na dlinakh voln 0,3-10,6 mkm pri pomoshchi opticheski bistabil'noi sredy Al-VO2-D (dielektrik) // Izmeritel'naya tekhnika. – 2010. – No.12. – S.20-24.
3. Raitsin A.M. Opredelenie prostranstvenno-energeticheskikh kharakteristik lazernogo izlucheniya s uchedom ogranichenogo dinamicheskogo diapazona izmeritel'nogo ustroystva // Izmeritel'naya tekhnika. – 2013. – No.8. – S.23-27.

4. Smuk S., Kochanov Yu, Petrosenko M., Solomitskii D. Infrakrasnye datchiki dlinnovolnovoogo diapazona na kvantovykh yamakh // Komponenty i tekhnologii. – 2014. – No.1. – S.152-157.
5. Esman A.K., Kuleshov V.K., Zikov G.L. Neokhlazhdaemyi vysokoeffektivnyi mikrobolometricheskii priemnik antennoogo tipa // Izmeritel'naya tekhnika. – 2012. – No.2. – S.43-45.
6. Kuz'michev V.M., Solov'ev V.A., Lapko A.V. Izmerenie energeticheskikh parametrov intensivnogo lazernogo izlucheniya profil'nym tonkoprovolochnym bolometrom // Radiofizika i radioastronomiya. – 1999. – T.4. – No.3. – S.287-295.
7. Kuz'michev V.M., Kuz'micheva E.V. Izmerenie ellipticheskoi polarizatsii intensivnogo lazernogo izlucheniya nelineinymi tonkoprovolochnymi bolometrami // Izmeritel'naya tekhnika. – 1998. – No.6. – S.19-22.
8. Kuz'michev V.M., Pokhil'ko S.N. Metodika izmereniya obobshchennoi ploshchadi lazernogo puchka // Izmeritel'naya tekhnika. – 2000. – No.3. – S.39-42.
9. Kuz'michev V.M., Safronov B.V., Pogorelov S.V., Balkashin V.P. Izmerenie mikrometrovykh diametrov sfokusirovannogo lazernogo izlucheniya tonkoprovolochnym bolometrom // Izmeritel'naya tekhnika. – 2002. – No.3. – S.28-30.
10. Kuz'michev V.M., Pogorelov S.V. Opredelenie kharakteristiki preobrazovaniya platinovogo bolometra dlya izmereniya energii impul'sa lazera // Izmeritel'naya tekhnika. – 2004. – No.5. – S.23-25.