

## Метод измерения энергетических параметров интенсивного лазерного излучения трехрешетчатым тонкопроволочным болометром

В. М. Кузьмичев

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,  
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4*

*Статья поступила в редакцию 19 июля 2000 г.*

Обоснован метод измерения энергетических параметров интенсивного и широкоапертурного линейнополяризованного лазерного излучения с помощью трех идентичных тонкопроволочных болометрических решеток. По сигналам решеток и измеренному направлению поляризации излучения определяется оптическая мощность с исключением систематической погрешности за счет нелинейности характеристики преобразования болометра. Установлена зависимость случайной погрешности измеряемой мощности излучения от случайных погрешностей регистрируемых сигналов решеток и параметров излучения.

Обґрунтовано метод вимірювання енергетичних параметрів інтенсивного та широкоапертурного лінійнополяризованого лазерного випромінювання з використанням трьох ідентичних тонкодротових болометричних ґраток. За сигналами ґраток та вимірюванням куту напрямку поляризації випромінювання визначається оптична потужність з виключенням систематичної похибки за рахунок нелінійності характеристики перетворення болометра. Встановлено залежність випадкової похибки вимірювання потужності випромінювання від випадкових похибок сигналів ґраток, що реєструються, та параметрів випромінювання.

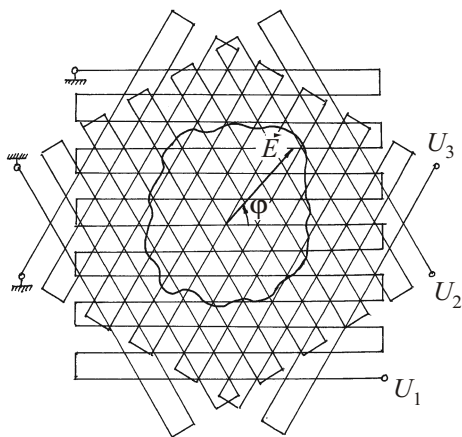
Тонкопроволочные решетчатые болометры используются для измерения непрерывной мощности и энергии [1, 2], состояния поляризации [3] и других параметров интенсивного и широкоапертурного лазерного излучения. Они обладают высокой оптической стойкостью, малоинерционны и способны работать в широком спектральном диапазоне. С увеличением интенсивности излучения, когда температура нагрева болометрических элементов существенно повышается и их основные физические параметры (температурный коэффициент сопротивления  $\alpha$ , фактор эффективности поглощения  $q$ , коэффициент теплообмена с внешней средой  $\gamma$  и удельная теплоемкость  $c$ ) изменяются, появ-

ляются нелинейность характеристики преобразования болометра, усиливающаяся неравномерностью распределения падающего излучения по площади входной апертуры измерителя, и систематические погрешности определяемых параметров излучения. При измерении энергетических параметров лазерного излучения эти погрешности могут достигать десятков процентов и являются доминирующими.

Целью настоящей работы является обоснование метода измерения энергетических параметров интенсивного и широкоапертурного лазерного излучения трехрешетчатым тонкопроволочным болометром с исключением систематических погрешностей, появляющихся

за счет нелинейности характеристики преобразования болометра.

Первичный болометрический преобразователь измерителя (рис. 1) состоит из трех идентичных тонкопроволочных решеток с постоянным периодом. Решетки располагаются в близких сечениях оптического пучка и повернуты вокруг оси оптического луча друг относительно друга на угол  $\pi/3$ . Болометрические элементы каждой решетки соединены последовательно и при воздействии оптического излучения выходные сигналы решеток регистрируются индивидуально. На рис. 1 показаны контур сечения оптического пучка и направление вектора поля излучения  $\vec{E}$ , составляющего угол  $\varphi$  с направлением болометрических элементов первой решетки. Период решеток выбирается таким, чтобы погрешность пространственного интегрирования болометрическими элементами возможных распределений интенсивности излучения была меньше 1 %.



**Рис. 1.** Трехрешетчатый тонкопроволочный болометрический преобразователь энергетических параметров лазерного излучения

В нелинейном режиме работы болометров при измерении непрерывной мощности лазерного излучения выходные сигналы каждой решетки можно записать в виде:

$$U_i = \eta_0 F(\delta \bar{P} k_i) \bar{P} k_i, \quad i=1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\eta_0$  – коэффициент преобразования решетки в линейном режиме работы для линейной поляризации излучения, направление которой параллельно осям болометрических элементов;  $\bar{P}$  – средняя погонная мощность излучения, падающего на болометры;  $k_i$  – поляризационные коэффициенты взаимодействия болометров  $i$ -ой решетки с линейно поляризованным излучением

$$k_i = \cos^2(\varphi - \psi_i) + K_D \sin^2(\varphi - \psi_i). \quad (2)$$

Здесь  $\psi_i$  – угол, характеризующий направление болометрических элементов  $i$ -ой решетки относительно первой;  $K_D$  – коэффициент дихроизма болометров, равный отношению факторов эффективности поглощения для перпендикулярного и параллельного направлений линейной поляризации излучения относительно оси болометров;  $\delta = 1 + \sigma_0^2$  – коэффициент неравномерности распределения интенсивности падающего излучения по площади входной апертуры решетки, определяемый относительной дисперсией данного распределения  $\sigma_0^2$ ;

$F(\delta \bar{P} k_i)$  – нормированный на  $\eta_0$  коэффициент преобразования  $i$ -й решетки в нелинейном режиме работы болометров, зависящий как от основных физических параметров последних, так и от произведения параметров излучения  $\delta \bar{P} k_i$ .

В линейном режиме работы болометров, когда нормированные коэффициенты преобразования решеток  $F(\delta \bar{P} k_i) = 1$ , сумма сигналов трех решеток не зависит от состояния поляризации излучения и прямо пропорциональна средней погонной мощности падающего излучения  $\bar{P}$ , а коэффициент преобразования

$$\eta = \frac{3(1 + K_D)}{2} \eta_0. \quad (3)$$

В нелинейном режиме работы болометров сумма сигналов трех решеток очень слабо зависит от состояния поляризации излучения и ее можно записать в виде:

$$U = \sum_{i=1}^3 U_i = \eta F(\delta\bar{P}) \bar{P}, \quad (4)$$

где

$$F(\delta\bar{P}) = \frac{2}{3(K_D + 1)} \sum_{i=1}^3 F(\delta\bar{P}k_i)k_i - \quad (5)$$

нормированный коэффициент преобразования трехрешетчатого болометра.

Учитывая соотношения (3)-(5), уравнение для мощности лазерного излучения можно записать в виде

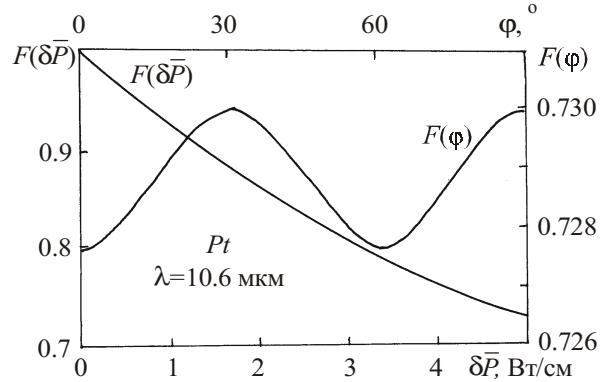
$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^3 U_i}{\eta_0 \sum_{i=1}^3 F(\delta\bar{P}k_i)k_i}. \quad (6)$$

В соответствии с [1] нормированные коэффициенты преобразования решеток можно представить в виде полинома второй степени:

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

Для платиновых болометров и излучения с длиной волны 10.6 мкм  $a_p = -5.236 \cdot 10^{-2} \text{ см/Вт}$  и  $b_p = 2.185 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{Вт}^2$  для диапазона эффективной мощности  $\delta\bar{P} = 0 \div 5 \text{ Вт/см}$ .

На рис. 2 приведена зависимость  $F(\delta\bar{P})$ , из которой видно, что систематическая погрешность измерения мощности может достигать 27 % при  $\delta\bar{P} = 5 \text{ Вт/см}$ . Там же показана зависимость нормированного коэффициента преобразования болометра от угла  $\varphi$  между



**Рис. 2.** Зависимость нормированного коэффициента преобразования болометра от эффективной мощности и поляризационная зависимость для  $\delta\bar{P} = 5 \text{ Вт/см}$

направлением линейной поляризации излучения и направлением болометрических элементов решетки при максимальной эффективной мощности  $\delta\bar{P} = 5 \text{ Вт/см}$ , которая показывает, что максимальное отклонение от среднего значения составляет 0.14 %. При уменьшении  $\delta\bar{P}$  величина отклонения будет также уменьшаться.

Доминирующую систематическую погрешность, обусловленную нелинейностью характеристики преобразования болометра, можно определить и исключить из результата измерения мощности лазера при регистрации выходных сигналов каждой решетки, если известен угол  $\varphi$ . Этот угол можно найти по сигналам решеток [4]. Искомая погрешность полностью определяется зависимостями  $F(\delta\bar{P}k_i)$  и соотношением (5). В выражении (6) обозначим величину  $a_p \delta\bar{P}$  через  $x$ , а  $b_p (\delta\bar{P})^2$  – через  $y$ .

Будем искать эти неизвестные по регистрируемым выходным сигналам решеток. Отношения сигналов  $i$ -й и  $j$ -й решеток ( $i, j = 1, 2, 3; i \neq j$ )

$$U_{i,j} = \frac{U_i}{U_j} = \frac{F(\delta\bar{P}k_i)k_i}{F(\delta\bar{P}k_j)k_j} = \frac{(1 + k_i x + k_i^2 y)k_i}{(1 + k_j x + k_j^2 y)k_j}. \quad (8)$$

Отсюда следуют линейные уравнения с двумя неизвестными

$$(U_{i,j}k_j^2 - k_i^2)x + (U_{i,j}k_j^3 - k_i^3)y = k_i - U_{i,j}k_j. \quad (9)$$

Уравнения (9) независимы только в том случае, если все выходные сигналы решеток различны, когда углы направлений болометрических элементов решеток располагаются несимметрично относительно угла направления линейной поляризации излучения. Систему трех независимых уравнений можно записать в общем виде:

$$\begin{cases} a_{11}x + a_{12}y = l_1, \\ a_{21}x + a_{22}y = l_2, \\ a_{31}x + a_{32}y = l_3, \end{cases} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= U_{12}k_2^2 - k_1^2; & a_{12} &= U_{12}k_2^3 - k_1^3; \\ a_{21} &= U_{13}k_3^2 - k_1^2; & a_{22} &= U_{13}k_3^3 - k_1^3; \\ a_{31} &= U_{23}k_3^2 - k_2^2; & a_{32} &= U_{23}k_3^3 - k_2^3; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} l_1 &= k_1 - U_{12}k_2; \\ l_2 &= k_1 - U_{13}k_3; \\ l_3 &= k_2 - U_{23}k_3. \end{aligned}$$

Применяя метод наименьших квадратов для нахождения неизвестных в уравнениях (10), получаем два нормальных линейных уравнения с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} x \sum_{m=1}^3 a_{m1}^2 + y \sum_{m=1}^3 a_{m1}a_{m2} = \sum_{m=1}^3 a_{m1}l_m, \\ x \sum_{m=1}^3 a_{m1}a_{m2} + y \sum_{m=1}^3 a_{m2}^2 = \sum_{m=1}^3 a_{m2}l_m. \end{cases} \quad (12)$$

Отсюда

$$x = \Delta_x / \Delta \quad \text{и} \quad y = \Delta_y / \Delta, \quad (13)$$

где  $\Delta$  – определитель системы,  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  – определители неизвестных.

Численный эксперимент выполнялся для значений эффективной мощности  $\delta P = 0.5; 1; 2; 3; 4; 5$  Вт/см. Коэффициент преобразования болометра  $\eta_0$  определяется выражением

$$\eta_0 = \frac{\alpha_0 q_0}{\gamma_0}, \quad (14)$$

в котором для платиновых элементов и излучения с длиной волны 10.6 мкм входящие параметры при комнатной температуре имеют следующие значения:  $\alpha_0 = 3.98 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  – температурный коэффициент сопротивления;  $q_0 = 3.8 \cdot 10^{-2}$  – фактор эффективности поглощения;  $\gamma_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  – погонный коэффициент теплообмена с внешней средой. Для углов  $\varphi = 0.01; 0.1; 1.0; 5.0; 10.0$  и  $15.0$  вычислялись поляризационные коэффициенты взаимодействия  $k_i$  и в соответствии с выражениями (8) и (1) – значения выходных сигналов болометрических решеток  $U_i$ . Решения нормальных уравнений (12) дали значения величин  $x$  и  $y$ . Найденные по известным  $x$ ,  $y$  и  $\delta P$  значения коэффициентов  $a_p$  и  $b_p$  совпали с их значениями, полученными при решении прямой задачи. Совпадение объясняется высокой относительной точностью (до  $10^{-15}$ ) решения задачи на ЭВМ. Сигналы решеток  $U_i$  и поляризационные коэффициенты взаимодействия  $k_i$  измеряются со значительно большей относительной погрешностью. Поэтому возникает вопрос о величине случайной погрешности определения  $x$  и  $y$ .

Относительные средние квадратические отклонения (СКО) регистрируемых сигналов решеток можно считать одинаковыми и равными  $\sigma$ , так как они отличаются друг от друга меньше, чем в два раза. Согласно [4] абсолютные СКО измеряемых углов  $\varphi$ , выраженные

в радианах, близки к относительным СКО регистрируемых сигналов решеток  $\sigma$ . Если переобозначить  $U_{12} = V_1$ ,  $U_{13} = V_2$  и  $U_{23} = V_3$ , то для относительных СКО найденных величин  $\sigma_{x,y}$  можно записать связь с относительными СКО  $\sigma$  следующим образом:

$$\sigma_{x,y}^2 = (A_{x,y}^2 + B_{x,y}^2) \sigma^2 = C_{x,y}^2 \sigma^2, \quad (15)$$

где

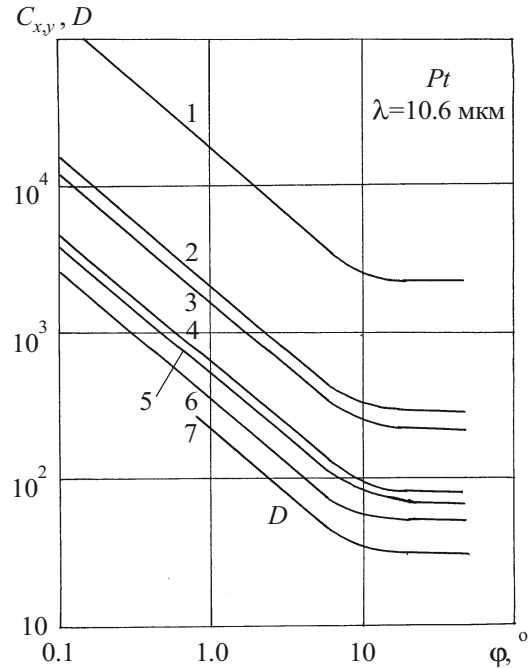
$$A_{x,y} = \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{V_i}{\Delta_{x,y}} \frac{\partial \Delta_{x,y}}{\partial V_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^3 \left( \frac{V_i}{\Delta} \frac{\partial \Delta}{\partial V_i} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (16)$$

$$B_{x,y} = \left[ \sum_{i=1}^3 \left( \frac{K_D - 1}{\Delta_{x,y}} \sin 2(\varphi - \psi_i) \frac{\partial \Delta_{x,y}}{\partial k_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^3 \left( \frac{K_D - 1}{\Delta} \sin 2(\varphi - \psi_i) \frac{\partial \Delta}{\partial k_i} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (17)$$

$A_{x,y}$  – коэффициенты влияния регистрируемых сигналов решеток на относительные СКО найденных величин  $x$  и  $y$ , а  $B_{x,y}$  – коэффициенты влияния измеренных поляризационных коэффициентов взаимодействия  $k_i$  на относительные СКО тех же найденных величин.

Зависимости коэффициентов  $C_{x,y}$  от угла  $\varphi$  и эффективной мощности  $\delta \bar{P}$  приведены на рис. 3. Вклад коэффициентов  $A_{x,y}$  и  $B_{x,y}$  в  $C_{x,y}$  примерно одинаков. Величины  $C_{x,y}$  линейно уменьшаются с ростом  $\varphi$  от 0 до  $5^\circ$ , затем их производные увеличиваются до нуля и при  $\varphi = 10 \div 15^\circ$  они практически остаются постоянными. С увеличением эффективной мощности  $\delta \bar{P}$  коэффициенты  $C_{x,y}$  довольно быстро уменьшаются.

Полученные значения величин  $x$  и  $y$  позволяют определить нормированные коэффи-



**Рис. 3.** Зависимости коэффициентов  $C_{xy}$  и  $D$  для платиновых болометров и длины волны излучения 10.6 мкм от угла  $\varphi$  при различных значениях эффективной мощности  $\delta P$ :

1, 3, 5 – зависимости  $C_y$  и 2, 4, 6 – зависимости  $C_x$  для  $\delta P = 1, 3, 5$  Вт/см соответственно; 7 – зависимость  $D$  для  $\delta P = 1$  Вт/см

циенты преобразования болометров  $F(\delta \bar{P} k_i)$  и по соотношению (7) – значение измеряемой погонной мощности падающего излучения  $\bar{P}$ , исключая систематическую погрешность, обусловленную нелинейностью характеристики преобразования болометра. По диаметру элементов тонкопроволочного болометра  $d$  и площади входной апертуры решеток  $S$  определяется полная мощность излучения лазера  $P$ , связанная с величиной  $\bar{P}$  соотношением

$$P = \bar{P} S / d. \quad (18)$$

Случайная погрешность измеряемой средней погонной мощности  $\bar{P}$  падающего излучения может быть оценена по выражению (7), известному значению  $\sigma$  и найденным значениям  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ . Относительное СКО измеряе-

мой величины  $\sigma_{\bar{P}}$  связано с относительными СКО  $\sigma$ ,  $\sigma_{k_i}$ ,  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  следующим соотношением:

$$\sigma_{\bar{P}}^2 = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{V_i}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial V_i} \right)^2 \sigma^2 + \sum_{i=1}^3 \left( \frac{k_i}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial k_i} \right)^2 \sigma_{k_i}^2 + \left( \frac{x}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{y}{\bar{P}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2. \quad (19)$$

Вычисляя производные, входящие в выражение (19), и определяя по выражению (2), относительные СКО  $\sigma_{k_i}$  через абсолютные СКО угла  $\phi$   $\sigma_{\phi}$ , которые близки к  $\sigma$ , а также принимая во внимание соотношение (15), получаем выражение для относительного СКО измеряемой величины  $\bar{P}$ :

$$\sigma_{\bar{P}}^2 = \left\{ \sum_{i=1}^3 \frac{V_i^2}{\left( \sum_{k=1}^3 V_k \right)^2} + \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{(K_D - 1) \sin 2(\phi - \psi_i) (1 + 2xk_i + 3yk_i^2)}{\sum_{i=1}^3 F_i k_i} \right]^2 + x^2 \left( \frac{\sum k_i^2}{\sum F_i k_i} \right)^2 C_x^2 + y^2 \left( \frac{\sum k_i^3}{\sum F_i k_i} \right)^2 C_y^2 \right\} \sigma^2 = D^2 \sigma^2, \quad (20)$$

где  $D^2$  есть выражение в фигурных скобках. Коэффициент  $D$  связывает относительные СКО  $\sigma_{\bar{P}}$  и  $\sigma$ . Зависимость коэффициента  $D$  от  $\phi$  при эффективной мощности  $\delta \bar{P} = 1$  Вт/см приведена на рис. 3.  $D$  линейно уменьшается с ростом  $\phi$  от 0 до  $10^\circ$ , а потом остается практически постоянным до  $\phi = 15^\circ$ . Доминирующий вклад в значение коэффициента  $D$  вносят предпоследнее и последнее слагаемые в фигурных скобках выражения (20). С увеличением эффективной мощности  $\delta \bar{P}$  значение коэффициента  $D$  почти не изменяется, так как произведения величин  $x C_x$  и  $y C_y$ , входящие в выражение (20), остаются практически неизменными.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие рекомендации по использованию рассмотренного метода измерения мощности лазерного излучения с линейной поляризацией:

1. Если относительные СКО отношений регистрируемых сигналов решеток  $\sigma \leq 10^{-2}$  и значения эффективной мощности излучения  $\delta \bar{P} < 0.5$  Вт/см, то болометр работает практически в линейном режиме. Максимальное значение систематической погрешности за счет нелинейности характеристики преобразования болометра при этих условиях не превышает  $-0.04$ . Производится корректировка среднего значения систематической погрешности (домножением на 1.02) и остается неисключенный остаток систематической погрешности  $\theta = 0.02$ . В этом случае суммарное относительное СКО  $\sigma_{\Sigma}$  измерения погонной мощности  $\bar{P}$  падающего излучения не будет превышать значения

2. Если относительное СКО  $\sigma \approx 10^{-3}$  и значения  $\delta \bar{P} > 1$  Вт/см, то измерения погонной мощности  $\bar{P}$  следует проводить по рассмотренной методике с определением величин  $x$  и  $y$  и исключением систематической погрешности за счет нелинейности характеристики преобразования болометра. В интервалах изменения  $\phi$  от  $10^\circ + n \cdot 30^\circ$  до  $20^\circ + n \cdot 30^\circ$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$  относительное СКО  $\sigma_{\bar{P}} \approx 3 \cdot 10^{-2}$ .

$$\sigma_{\Sigma} = (\sigma^2 + \theta^2 / 3)^{1/2} = 1.6 \cdot 10^{-2}.$$

3. Если относительное СКО  $\sigma \approx 10^{-4}$  и значения  $\delta \bar{P} > 1$  Вт/см, то измерения величины  $\bar{P}$  следует проводить по рассмотренной методике для углов  $\phi$ , изменяющихся в

пределах от  $1^\circ + n \cdot 30^\circ$  до  $29^\circ + n \cdot 30^\circ$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ), при этом относительное СКО  $\sigma_{\bar{P}}$  не будет превышать значения  $2.3 \cdot 10^{-2}$ .

Данный метод может быть использован для измерения энергии однократных импульсов лазерного излучения. С переходом от линейной поляризации излучения к эллиптической случайная погрешность будет увеличиваться, а для поляризации близкой к круговой данный метод не применим.

Таким образом, обоснован метод измерения энергетических параметров интенсивного и широкоапертурного линейнополяризованного лазерного излучения с использованием трех идентичных тонкопроволочных болометрических решеток, расположенных в близких сечениях оптического луча и повернутых друг относительно друга на угол  $\pi/3$ . По зарегистрированным сигналам решеток и измеренному углу  $\Phi$  определяется мощность лазерного излучения с исключением систематической погрешности, обусловленной нелинейностью характеристики преобразования болометров. Установлена зависимость случайной погрешности измеряемой мощности излучения от случайных погрешностей регистрируемых сигналов решеток и параметров излучения.

## Литература

1. В. М. Кузьмичев, А. В. Золотайкин. Измерительная техника. 1990, №12, с. 20-21.
2. В. М. Кузьмичев, С. Н. Похилько. Український метрологічний журнал. 1997, №4, с. 33-35.
3. В. М. Кузьмичев, Е. В. Кузьмичева. Измерительная техника. 1998, №6, с. 19-22.
4. В. М. Кузьмичев, Е. В. Кузьмичева. Український метрологічний журнал. 1998, вып.1, с. 48-51.

## Measurement of Energy Parameters of Intensive Laser Radiation by Three-Grating Thin-Wire Bolometer

V. M. Kuzmichov

The method of measurement of energy parameters of an intensive and wide-aperture linear-polarized laser radiation with usage of three identical thin-wire bolometric gratings is based. The optical power is determined by grating signals and measured angle of polarization with excluding the systematic error of the bolometer transformation characteristics non-linearity. The dependence of random error of a gauged radiation power upon random error of registered grating signals and radiation parameters is found.