

Измерение параметров импульса гауссова пучка лазера тонкопроволочными болометрами

В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов¹

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

*Национальный фармацевтический университет Украины,
¹Украина, 61002, г. Харьков, ул. Пушкинская, 53,
E-mail: svpog@yahoo.co.uk*

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2003 г., после переработки 8 декабря 2003 г.

Обоснован метод измерения параметров импульса гауссова пучка тремя вертикальными и тремя горизонтальными тонкопроволочными болометрами, расположенными в одном и том же сечении пучка и за пределами его основной интенсивности. Метод позволяет определить координаты энергетического центра пучка, его средний квадратический радиус, энергию, модуль угла направления линейной поляризации. Проведен метрологический анализ измеренных параметров излучения.

Обґрунтовано метод вимірювання параметрів імпульсу пучка Гаусса трьома вертикальними та трьома горизонтальними тонкодротяними болометрами, які розташовані в одному і тому ж перетині пучка та за межами його основної інтенсивності. Метод дозволяє визначити координати енергетичного центра пучка, його середній квадратичний радіус, енергію, модуль кута напрямку лінійної поляризації. Проведено метрологічний аналіз вимірюваних параметрів випромінювання.

Во многих исследованиях и технологических применениях [1] используется гауссов пучок лазерного излучения. Измерение энергии импульса средних и больших уровней такого пучка проводится непосредственно калориметром или калориметром с использованием ответвителя излучения. Параметры широкоапертурного излучения лазера могут быть измерены профильным двухрешеточным болометром [2]. Часто используются лазерный луч с небольшим диаметром и сфокусированный луч, параметры которых необходимо контролировать. Измерение энергии и других параметров импульса лазера с диаметром пучка от миллиметра до сантиметра встречает ряд технических труд-

ностей, связанных с высокой максимальной плотностью интенсивности излучения. Для определения параметров непрерывного лазерного излучения с профильным распределением интенсивности в сечении пучка можно использовать сканирующий тонкопроволочный болометр [3]. Нерешенной задачей является измерение параметров однократного импульса лазера с указанными диаметрами пучка. Поставленную задачу можно решить для гауссова пучка с помощью тонкопроволочных болометров.

Цель работы состоит в обосновании способов измерения параметров импульса гауссова пучка лазера (координат центра распределения энергии импульса, среднего квадра-

тического радиуса (СКР) пучка, модуля направления линейной поляризации и энергии) с использованием тонкопроволочных платиновых болометров и оценки погрешностей получаемых результатов.

Для измерения указанных параметров в поперечном сечении пучка на некотором расстоянии от его центра размещают параллельно друг другу три тонкопроволочных болометра в вертикальном направлении и три болометра в горизонтальном направлении, длина каждого болометра должна быть не менее шести СКР оптического пучка. Пусть центр пучка совпадает с центром прямоугольной системы координат XOY , вертикальные болометры параллельны оси Y и имеют координаты x_1, x_2 и x_3 , а расстояния между ними известны: $x_2 - x_1 = a$ и $x_3 - x_2 = b$. Угол направления линейной поляризации излучения с вертикальной осью системы координат равен φ . Распределение плотности энергии оптического излучения $W(x, y)$ запишется в виде:

$$W(x, y) = \frac{E_0}{2\pi r^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}}, \quad (1)$$

где E_0 – полная энергия оптического пучка, r – его СКР. Профильное распределение энергии пучка для координаты x :

$$W(x) = \int_{-3r}^{3r} W(x, y) dy \approx \int_{-\infty}^{+\infty} W(x, y) dy = \frac{E_0}{r\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2r^2}}. \quad (2)$$

Замена пределов интегрирования в выражении (2) (от $-\infty$ до $+\infty$) дает систематическую погрешность $\nu_l = -0.27\%$, а если длина болометра превышает $6r$, то эта погрешность резко уменьшается.

Расположение вертикальных болометров относительно профильного распределения $W(x)$ показано на рис. 1.

Если длительность импульса излучения значительно меньше тепловой постоянной

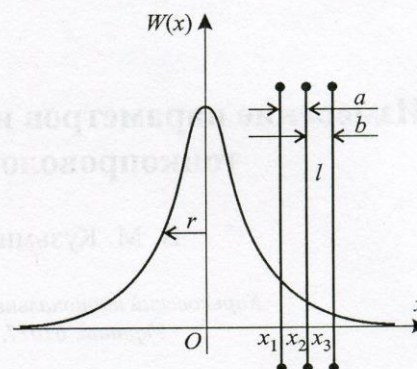


Рис. 1. Профильное распределение интенсивности лазера и расположение болометров вдоль оси x

времени болометра, то максимальное приращение его сопротивления, и соответственно выходного сигнала, в линейном режиме работы болометров будет прямо пропорционально падающей на него оптической энергии. Систематическая погрешность за счет длительности импульса τ составляет $\nu_\tau = -\frac{1}{2} \frac{\tau}{\tau_T}$, где τ_T – тепловая постоянная времени болометра. В этих условиях выходные сигналы вертикальных болометров можно записать в виде:

$$U_{xi} = \eta^E (\cos^2 \varphi + K_D \sin^2 \varphi) \frac{E_0 d}{r\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x_i^2}{2r^2}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где d – одинаковый для всех болометров диаметр; η^E – коэффициент преобразования болометра, когда линейная поляризация излучения параллельна его оси; K_D – коэффициент дихроизма болометра, равный отношению факторов эффективности поглощения для H - и E -поляризаций излучения. Значения величин η^E и K_D определяются либо опытным путем, при калибровке болометров, либо путем вычислений. Линейный режим работы болометров ограничивается нелинейностью характеристики преобразования, которая

может приводить к систематической погрешности до $v_{\eta} \approx +4\%$ при нагреве платиновых болометров излучением на 80°C . Измерения выходных сигналов можно выполнять малоинерционными амплитудно-цифровыми преобразователями. Из равенств (3) составляются три отношения сигналов U_1/U_2 , U_1/U_3 , и U_2/U_3 , а из них – три пары уравнений с неизвестными x_1 и r . Из каждой пары уравнений находятся x_{1j} и $r_{x_j}^2$ где $j = 1, 2, 3$. Значения x_{1j} имеют вид:

$$x_{11} = \frac{a^2 - b^2 \frac{\ln(U_{x_1}/U_{x_2})}{\ln(U_{x_1}/U_{x_3})}}{2 \left[b \frac{\ln(U_{x_1}/U_{x_2})}{\ln(U_{x_1}/U_{x_3})} - a \right]},$$

$$x_{12} = \frac{a^2 - (b^2 - a^2) \frac{\ln(U_{x_1}/U_{x_2})}{\ln(U_{x_2}/U_{x_3})}}{2 \left[(b - a) \frac{\ln(U_{x_1}/U_{x_2})}{\ln(U_{x_2}/U_{x_3})} - a \right]},$$

$$x_{13} = \frac{b^2 - (b^2 - a^2) \frac{\ln(U_{x_1}/U_{x_3})}{\ln(U_{x_2}/U_{x_3})}}{2 \left[(b - a) \frac{\ln(U_{x_1}/U_{x_3})}{\ln(U_{x_2}/U_{x_3})} - b \right]}.$$

Для $r_{x_j}^2$ получаем:

$$r_{x_1}^2 = \frac{(2x_1 + a)a}{2 \ln(U_{x_1}/U_{x_2})}, \quad r_{x_2}^2 = \frac{(2x_1 + b)b}{2 \ln(U_{x_1}/U_{x_3})},$$

$$r_{x_3}^2 = \frac{(2x_1 + a + b)(b - a)}{2 \ln(U_{x_2}/U_{x_3})}.$$

Наиболее точными значениями x_1 и r_x^2 будут средние значения

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 x_{1j}, \quad \bar{r}_x^2 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 r_{x_j}^2. \quad (6)$$

По сигналам горизонтальных болометров

$$U_{y_i} = \eta^E (\sin^2 \varphi + K_D \cos^2 \varphi) \frac{E_0 d}{r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y_i^2}{2r^2}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

и выражениям, аналогичным (4) и (5), в которых используются известные расстояния между болометрами, находятся значения \bar{y}_1 и \bar{r}_y^2 .

Так как СКР гауссова оптического пучка r в соответствии с выражением (1) одинаков для всех сечений пучка, то наиболее точным значением его квадрата будет среднее арифметическое значений r_x^2 и r_y^2 , т. е.

$$\bar{r}^2 = \frac{1}{2} (\bar{r}_x^2 + \bar{r}_y^2) = \frac{1}{6} \left(\sum_{j=1}^3 r_{x_j}^2 + \sum_{j=1}^3 r_{y_j}^2 \right). \quad (8)$$

Значение $\text{tg}^2 \varphi$ и модуль угла $|\varphi|$ находятся через отношение сигналов с вертикальных U_{x_1} и горизонтальных U_{y_1} болометров соответственно:

$$|\varphi| = \pm \arctg \left(\frac{e^{\frac{y_1^2 - r_0^2}{2r^2}} - K_D U_{x_1}/U_{y_2}}{U_{x_1}/U_{y_1} - K_D e^{\frac{y_1^2 - x_1^2}{2r^2}}} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в формулы (3) и (7) для значений сигналов U_{x_1} и U_{y_1} , получаем выражения для энергии импульса лазера через сигналы вертикальных болометров E_{0x} и горизонтальных болометров E_{0y} в виде:

$$E_{0x} = \frac{U_{x_1} r \sqrt{2\pi}}{\eta^E d} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + K_D \operatorname{tg}^2 \varphi} e^{\frac{x_1^2}{2r^2}}, \quad (10)$$

$$E_{0y} = \frac{U_{y_1} r \sqrt{2\pi}}{\eta^E d} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{K_D + \operatorname{tg}^2 \varphi} e^{\frac{y_1^2}{2r^2}}. \quad (11)$$

Наиболее достоверное значение энергии импульса лазерного излучения:

$$E_0 = \frac{1}{2} (E_{0x} + E_{0y}). \quad (12)$$

Таким образом, определены координаты энергетического центра оптического пучка, находящиеся на расстояниях x_1 и y_1 от первых болометров, СКР пучка r , модуль угла направления поляризации излучения $|\varphi|$ и энергия импульса лазера.

Проведем анализ случайных погрешностей измеряемых величин. Относительные средние квадратические отклонения (СКО) величин a_y и b_y составляют σ_a и σ_b соответственно. Сигналы болометров измеряем с одинаковыми относительными СКО σ . Отношения сигналов обозначим $U_1/U_2 = \gamma_{12}$, $U_1/U_3 = \gamma_{13}$ и $U_2/U_3 = \gamma_{23}$, а их относительные СКО — $\sigma_\gamma = \sigma\sqrt{2}$. Тогда для выражений (4), определяющих значение величины x_1 , квадраты относительных СКО будут иметь вид:

$$\sigma_{x_{1j}}^2 = \left(\frac{a}{x_{1j}} \frac{\partial x_{1j}}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{b}{x_{1j}} \frac{\partial x_{1j}}{\partial b} \right)^2 \sigma_b^2 + \left(\frac{\gamma_k}{x_{1j}} \frac{\partial x_{1j}}{\partial \gamma_k} \right)^2 \sigma_{\gamma_k}^2 + \left(\frac{\gamma_l}{x_{1j}} \frac{\partial x_{1j}}{\partial \gamma_l} \right)^2 \sigma_{\gamma_l}^2. \quad (13)$$

В этом выражении для значения x_{11} индексы $k = 12$ и $l = 13$, для x_{12} индексы $k = 12$ и $l = 13$ и для x_{13} индексы $k = 23$ и $l = 13$. Для оценки относительных СКО $\sigma_{x_{1j}}$ воспользуемся следующими значениями: $a = r/2$, $b = r$

и $x_{11} = 2r$. Тогда выражение (13) можно переписать в виде:

$$\sigma_{x_{11}}^2 = 156\sigma_a^2 + 182\sigma_b^2 + 100\sigma_{\gamma_{12}}^2 + 20\sigma_{\gamma_{13}}^2.$$

Если принять, что $\sigma_a = \sigma_b = \sigma_{\gamma_{12}} = \sigma_{\gamma_{13}} = 10^{-3}$, то значение $\sigma_{x_{11}} = 2.2 \cdot 10^{-2}$. Относительные СКО $\sigma_{x_{12}}$ и $\sigma_{x_{13}}$ будут близкими к $\sigma_{x_{11}}$. Тогда $\sigma_{x_1} = \sigma_{x_{11}}/\sqrt{3} = 1.3 \cdot 10^{-2}$. При тех же значениях a и b относительное СКО σ_{y_1} будет аналогичным.

Квадрат относительного СКО величины $r_{x_j}^2$ в соответствии с выражением (5) имеет вид:

$$\sigma_{r_{x_j}^2}^2 = \left(\frac{a}{r_{x_j}^2} \frac{\partial r_{x_j}^2}{\partial a} \right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{x_1}{r_{x_j}^2} \frac{\partial r_{x_j}^2}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\gamma_k}{r_{x_j}^2} \frac{\partial r_{x_j}^2}{\partial \gamma_k} \right)^2 \sigma_{\gamma_k}^2, \quad (14)$$

где для $r_{x_1}^2$ индекс $k = 12$, для $r_{x_2}^2$ индекс $k = 13$, и для $r_{x_3}^2$ индекс $k = 23$. После подстановки значений a , b и x_1 и преобразований выражение (14) примет вид:

$$\sigma_{r_{x_1}^2}^2 = 1.41\sigma_a^2 + 0.79\sigma_{x_1}^2 + 0.20\sigma_{\gamma_{12}}^2.$$

Подставляя значения σ_a , σ_{x_1} и $\sigma_{\gamma_{12}}$, получаем $\sigma_{r_{x_1}^2} = 11 \cdot 10^{-3}$. Значение $\sigma_{r_{x_1}^2} = \frac{1}{2} \sigma_{r_{x_1}^2} = 5.5 \cdot 10^{-3}$. Так как измеренных значений r будет 6 и их относительные СКО будут близки к $\sigma_{r_{x_1}^2}$, то относительное СКО \bar{r} будет $\sigma_r \approx \sigma_{r_{x_1}^2}/\sqrt{6} \approx 2.24 \cdot 10^{-3}$.

Погрешность измеренного угла направления поляризации излучения φ выражается в абсолютных величинах. Если выражение под корнем в формуле (9) обозначить через z , то квадрат абсолютного СКО угла φ будет связан с абсолютными СКО других величин выражением

$$\sigma_{\varphi a}^2 = \frac{1}{(1+z)^2} \frac{1}{4z} \left[\left(\frac{\partial z}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1 a}^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y_1} \right)^2 \sigma_{y_1 a}^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \gamma_{xy}} \right)^2 \sigma_{\gamma_{xy} a}^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial K_D} \right)^2 \sigma_{K_D a}^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial r} \right)^2 \sigma_{r a}^2 \right].$$

Для принятых значений $r = 2$ мм, $x_1 = y_2 = 4$ мм, $\sigma_{K_D a} = 10^{-3}$, $\sigma_{\gamma_{xy} a} = 10^{-3}$ и полученных σ_{x_1} , σ_{y_1} абсолютное СКО $\sigma_{\varphi a}$ составляет $4 \cdot 10^2$ радиана или 2.3 градуса во всем диапазоне измерений угла φ .

Квадрат относительного СКО измеряемой энергии импульса лазера в соответствии с формулой (10) будет выражаться через относительные СКО входящих в него величин следующим образом

$$\sigma_{E_0 a}^2 = \sigma_{E_{0x}}^2 + \sigma_{E_{0y}}^2 + \sigma_a^2 + \sigma_{\eta}^2 + \frac{(1-K_D)^2 \operatorname{tg}^4 \varphi}{(1+\operatorname{tg}^2 \varphi)^2 (1+K_D \operatorname{tg}^2 \varphi)} \sigma_{\operatorname{tg}^2 \varphi}^2 + \left(1 - \frac{x_1^2}{r^2} \right)^2 \sigma_r^2 + \left(\frac{x_1}{r} \right)^4 \sigma_{x_1}^2.$$

Составляющая суммарной погрешности, обусловленная зависимостью от угла φ , принимает максимальное значение $2 \cdot 10^{-2}$ при $\varphi = \pi/4$, а при значении φ , приближающемся к нулю или $\pi/2$, рассматриваемая погрешность стремится к нулю. Доминирующий вклад в $\sigma_{E_{0x}}$ дают погрешности σ_r и σ_{x_1} со своими коэффициентами. Чтобы уменьшить погрешность $\sigma_{E_{0x}}$, необходимо уменьшать отношение x_1/r . Для принятых значений x_1 и r относительное СКО измеренной энергии импульса лазера вертикальными болометрами будет составлять $\sigma_{E_{0x}} = 5.2 \cdot 10^{-2}$.

Близкими будут значения измеренной энергии импульса лазера E_{0y} , а также относительного СКО $\sigma_{E_{0y}}$ для горизонтальных болометров.

Квадрат относительного СКО наиболее достоверного значения энергии импульса лазера E_0 (12) определяется формулой:

$$\sigma_{E_0}^2 = \left(\frac{E_{0x}}{E_{0x} + E_{0y}} \right)^2 \sigma_{E_{0x}}^2 + \left(\frac{E_{0y}}{E_{0x} + E_{0y}} \right)^2 \sigma_{E_{0y}}^2.$$

Так как значения E_{0x} и E_{0y} , а также $\sigma_{E_{0x}}$ и $\sigma_{E_{0y}}$ близки, то относительное СКО измерения энергии импульса гауссова пучка лазерного излучения $\sigma_{E_0} \approx \sigma_{E_{0x}} / \sqrt{2} \approx 3.7 \cdot 10^{-2}$, а систематические погрешности останутся прежними, v_l , v_τ и v_η .

Таким образом, проанализирована методика измерения параметров импульса лазерного излучения с гауссовым распределением плотности энергии с помощью трех тонкопроволочных вертикальных и трех горизонтальных болометров, расположенных в одном и том же сечении оптического пучка за пределами его основной интенсивности. Рассмотренный метод позволяет измерить положение координат энергетического центра пучка, его средний квадратический радиус, энергию, модуль угла направления линейной поляризации излучения. Проведен метрологический анализ измеренных параметров излучения.

В дальнейшем необходимо исследовать возможности использования нелинейного режима работы болометров для определения параметров импульса гауссова пучка излучения лазера и учесть несоответствие распределения плотности энергии лазерного излучения теоретическому гауссову распределению.

Литература

1. Ю. А. Ананьев. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. Москва, Наука, 1979, 328 с.
2. В. М. Кузьмичев, В. А. Соловьев, А. В. Лапко. Радиофизика и радиоастрономия. 1999, 4, №3, с. 287-296.
3. В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов. Український метрологічний журнал. 1999, вип. 4, с. 27-29.

Measurement of the Laser Impulse Parameters of Gauss Beam with Thin-Wire Bolometers

V. M. Kuzmichov, S. V. Pogorelov

A method of measuring the laser impulse parameters of Gauss beam with three vertical and three horizontal thin-wire bolometers

placed on the same beam profile – being some outside the main beam intensity – is argued. The method allows determining the coordinates of a beam energy centre, its root-mean square radius, the magnitude of an angle of a linear polarization direction and the laser energy. The measured radiation parameters have been analyzed metrologically.

В статье описан метод измерения параметров импульса Гауссова пучка с помощью трех вертикальных и трех горизонтальных тонкопроволочных болометров, расположенных на одном и том же профиле пучка. Показано, что с помощью этого метода можно измерить координаты центра энергии пучка, его среднеквадратичный радиус, угол линейной поляризации и энергию. Измеренные параметры облучения проанализированы метрологически.

Литература

1. Ю. А. Афанасьев. Оптические болометры в радиофизике. М.: Наука, 1979. 138 с.
 2. В. М. Кузьмичев, В. А. Улюкин, А. В. Давыдов. Радиотехника и электроника, 1997, т. 44, № 10, с. 217-222.
 3. В. М. Кузьмичев, С. В. Погорелов. Ученые запiski Казанского университета, 1999, т. 141, к. 2, с. 24-28.

В статье описан метод измерения параметров импульса Гауссова пучка с помощью трех вертикальных и трех горизонтальных тонкопроволочных болометров, расположенных на одном и том же профиле пучка. Показано, что с помощью этого метода можно измерить координаты центра энергии пучка, его среднеквадратичный радиус, угол линейной поляризации и энергию. Измеренные параметры облучения проанализированы метрологически.

$$x_c = \frac{\int x I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy}$$

$$y_c = \frac{\int y I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy}$$

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{\int (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy}}$$

$$\alpha = \arctan \left(\frac{\int (x - x_c) I(x, y) dx dy}{\int (y - y_c) I(x, y) dx dy} \right)$$

В статье описан метод измерения параметров импульса Гауссова пучка с помощью трех вертикальных и трех горизонтальных тонкопроволочных болометров, расположенных на одном и том же профиле пучка. Показано, что с помощью этого метода можно измерить координаты центра энергии пучка, его среднеквадратичный радиус, угол линейной поляризации и энергию. Измеренные параметры облучения проанализированы метрологически.