УДК 535.31+535.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАУССОВЫХ ПУЧКОВ ИМПУЛЬСНОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И. А. Попов

К настоящему времени предложено несколько методов определения параметров гауссовых пучков [1-3]; краткий обзор методов определения параметров приведен в предисловии к книге [4]. Однако в применении к импульсному излучению ИК диапазона в связи с трудностями регистрации профиля лазерного излучения по существу пригодными являются два способа. Параметры гауссовых пучков можно получить, используя дополнительную линзу и определяя размеры гауссова пучка в фокальной плоскости этой линзы. С другой стороны, следуя работе [3], определение параметров может быть основано на измерениях размеров пучка в двух поперечных сечениях пучка без использования дополнительных линз, что обладает некоторым преимуществом, поскольку устраняются ошибки, связанные с возможными аберрациями линз. Согласно [3], параметры пучка следовало определять по радиусу кривизны волнового фронта, для которого было получено алгебраическое уравнение четвертой степени. Благодаря сложности вычислений (а именно: решение уравнения четвертой степени) этот метод не получил распространения.

В настоящей работе мы усовершенствовали технику вычислений и получили простые аналитические выражения для параметров гауссовых пучков через поперечные размеры в двух сечениях. Кроме того, соответствующую процедуру измерений и вычислений мы обобщили на случай эллиптических гауссовых пучков, являющихся собственными модами резонаторов с астигматизмом.

В [5] приводится следующее выражение для амплитуды поля эллиптического невращающегося гауссова пучка, определяющего его пространственную структуру:

$$\varphi(x,\ y,\ z) = A\left[1+\left(\frac{z-c_1}{z_{01}}\right)^2\right]^{-1/4}\left[1+\left(\frac{z-c_2}{z_{02}}\right)^2\right]^{-1/4}\exp\left(-\frac{x^2}{d_1^2}-\frac{y^2}{d_2^2}\right), \tag{1}$$

где

$$\left.\begin{aligned} d_1^2(z) &= \frac{\lambda z_{01}}{\pi}\left[1+\left(\frac{z-c_1}{z_{01}}\right)^2\right],\\ d_2^2(z) &= \frac{\lambda z_{02}}{\pi}\left[1+\left(\frac{z-c_2}{z_{02}}\right)^2\right]. \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Здесь A — постоянная величина, x, y, z — декартовы координаты (пучок распространяется вдоль оси z); z_{01}, z_{02}, c_1, c_2 — величины, имеющие размерность длины, являются параметрами гауссова пучка; d_1, d_2 определяют размеры эллиптического пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Поперечными сечениями такого пучка являются эллипсы, деформирующиеся с изменением продольной координаты. Отметим, что из (1) следует, что амплитуда поля может быть представлена в виде произведения двух сомножителей, порознь зависящих от x и y; таким образом, изменение размеров эллиптического гауссова пучка в плоскостях (x, z), (y, z) происходит независимо. Следовательно, для определения параметров пучка достаточно знать поперечные размеры в двух его любых сечениях z_1, z_2; при этом параметры z_{01}, c_1 и z_{02}, c_2 находятся независимо друг от друга по размерам пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях $d_1(z_1)$, $d_1(z_2)$ и $d_2(z_1)$, $d_2(z_2)$. Не вдаваясь в детали вывода, приведем результаты

$$\left.\begin{aligned} z_{0i} &= \frac{z_2-z_1}{\xi_i},\\ c_i &= z_1 \pm (z_2-z_1)\frac{\sqrt{\alpha_{1i}\xi_i-1}}{\xi_i}, \quad i=1,\ 2. \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

Здесь обозначено:

$$\left.\begin{aligned} &\xi_i = \alpha_{1i}+\alpha_{2i} \pm 2\sqrt{\alpha_{1i}\alpha_{2i}-1},\\ &\alpha_{1i} = \frac{\pi d_i^2(z_1)}{\lambda(z_2-z_1)}, \quad \alpha_{2i} = \frac{\pi d_i^2(z_2)}{\lambda(z_2-z_1)}. \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

Знак в (3) зависит от расположения сечения z_1 относительно положения перетяжки $z=c_i$. Если $z_1 < c_i$, в (3) следует выбрать знак «+», если $z_1 > c_i$, следует выбрать «—». Знак в (4) определяется следующим образом: при $(z_{1i}-c_i)\ (z_{2i}-c_i) > -z_{0i}^2$ следует выбрать «—», в противном случае «+». Если оба сечения находятся по одну сторону от перетяжки, то всегда $(z_{1i}-c_i)(z_{2i}-c_i) > 0 > -z_{0i}^2$ и следует выбирать «—».

Погрешности параметров z_0 и c (индекс i в дальнейшем не существен и мы опустим его) однозначно определяется погрешностью величины ξ. Предполагая относительные погрешности d, а, следовательно, и α одинаковыми ($\Delta\alpha_1/\alpha_1 = \Delta\alpha_2/\alpha_2 = \Delta\alpha/\alpha \simeq 2\Delta d/d$), мы исследовали поведение отношения относительных погрешностей $\left(\frac{\Delta\xi}{\xi}\Big/\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right) = \chi(\alpha_1, \alpha_2)$ в зависимости от возможных значений α_1, α_2. Здесь

$$\Delta\xi = \sqrt{\left(\frac{\partial\xi}{\partial\alpha_1}\right)^2 (\Delta\alpha_1)^2 + \left(\frac{\partial\xi}{\partial\alpha_2}\right)^2 (\Delta\alpha_2)^2} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha}\sqrt{\left(\frac{\partial\xi}{\partial\alpha_1}\right)^2 \alpha_1^2 + \left(\frac{\partial\xi}{\partial\alpha_2}\right)^2 \alpha_2^2}.$$

Если оба сечения пучка находятся по одну сторону от перетяжки, в этом случае нет проблемы выбора знака в (3) и (4), функция $\chi(\alpha_1, \alpha_2)$ принимает минимальные значения вблизи линий $\alpha_2=\alpha_1+1/\alpha_1$ при $\alpha_1 < 1$, что соответствует $z_1=c$, $|z_2-c| > z_0$, и $\alpha_1=\alpha_2+1/\alpha_2$ при $\alpha_2 < 1$, что соответствует $z_2=c$, $|z_1-c| > z_0$. В практически важном диапазоне $0 < \alpha_1$, $\alpha_2 < 10$ эти значения составляют $\chi=0.8\div0.9$. Таким образом, наиболее точные измерения по предлагаемой методике будут осуществляться при расположении одного из сечений вблизи предполагаемого места перетяжки гауссова пучка, а второго — на расстоянии от перетяжки, большем предполагаемого значения z_0.

В экспериментах использовался импульсный лазер на углекислом газе с поперечным разрядом, работавший в одномодовом режиме [6]. Для источников такого типа в формировании пространственной структуры поля излучения большое значение имеют неоднородности активной среды [7]. Согласно данным этой работы, наибольшую оптическую однородность активной среды обеспечивает схема с ультрафиолетовой предионизацией и электродами, имеющими профиль Роговского. Такая конструкция и исследовалась в настоящей работе.

Поперечный профиль лазерного пучка измерялся при помощи щели [6] по методике, обобщенной очевидным образом на гауссовы пучки с эллиптическим сечением. В результате измерений мы получали значения d_1, d_2 с точностью $\sim 2-3\%$. Поскольку положение перетяжки исследовавшегося пучка совпадало с положением плоского отражателя лазерного резонатора (в качестве последнего использовалась плоская дифракционная решетка), то мы смогли расположить ближайшее к перетяжке сечение на расстоянии $0.5z_0$. Это позволило восстановить значения параметров эллиптического гауссова пучка с точностью $\sim 5-7\%$. Измерения одного и того же пучка, произведенные с различными независимыми парами сечений, давали в пределах погрешности одинаковые результаты. Таким образом, на основании этих измерений можно сделать вывод, что пространственная структура поля излучения исследованного источника достаточно хорошо может быть описана соотношением (1) и укладывается в рамки теории гауссовых пучков; выбор схемы лазера с ультрафиолетовой предионизацией и электродами, имеющими профиль Роговского, обеспечивает достаточно высокую однородность активной среды лазера.

Литература

[1] I. A. Arnaud, W. M. Hubbard, C. D. Mandeville, B. de la Claviere. Appl. Opt., *10*, 2775, 1971.
[2] Y. Susaki, A. Tachibana. Appl. Opt., *16*, 1481, 1977.
[3] I. E. Pearson, T. C. McGill, S. Kurtin, A. Yariv. J. Opt. Soc. Am., *59*, 1440, 1969.
[4] А. Джерард, Дж. М. Берч. Введение в матричную оптику. «Мир», М. 1978.
[5] А. М. Гончаренко. Гауссовы пучки света. «Наука и техника», Минск, 1977.
[6] В. В. Берцев, М. О. Буланин, И. А. Попов. Опт. и спектр., *45*, 622, 1978.
[7] M. Dufour, H. Egger, W. Seelig. Opt. Communs, *19*, 334, 1976.

Поступило в Редакцию 9 сентября 1978 г.