

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2011 г. А. В. Исаевич, канд. физ.-мат. наук; А. В. Холенков

Институт физики Национальной академии наук Беларусь, Минск, Беларусь

E-mail: isaevich@ifanbel.bas-net.by

Рассмотрены принципы измерения диаметра (ширины) пучка, углов расходимости лазерного излучения, параметра качества пучка и методики расчета неопределенностей измерения этих параметров. Дано описание принципа работы установки для определения пространственных характеристик лазерного излучения, ее технических и метрологических характеристик. Приведены значения составляющих неопределенностей измерения на установке.

Ключевые слова: пространственные характеристики, диаметр пучка, параметр качества пучка, расходимость лазерного излучения.

Коды OCIS: 140.3295

Поступила в редакцию 08.02.2011

В настоящее время пристальное внимание производителей и пользователей лазеров уделяется формированию профиля пучка и нормированию пространственно-энергетических характеристик лазерного излучения (ЛИ) [1]. Необходимость определения этих характеристик связана с повышением требований к лазерам, применяемым в системах связи, информационных системах, медицине, приборостроении, а также с широким внедрением новых типов лазеров. В связи с этим необходимо метрологическое обеспечение измерений пространственных характеристик ЛИ.

Пространственные характеристики лазерного излучения

Любой когерентный или частично когерентный лазерный пучок в сечении с координатой z может быть охарактеризован не более чем десятью независимыми параметрами, так называемыми моментами второго порядка распределения Вигнера $h(x, y, \theta_x, \theta_y, z)$ [2], описывающими пространственное распределение плотности мощности (энергии) ЛИ в точках с координатами (x, y) в направлении, задаваемом углами (θ_x, θ_y) . Знание этих параметров позволяет предсказать свойства пучка после прохождения ЛИ через любые свободные от aberrаций оптические системы.

Три пространственных момента второго порядка распределения Вигнера могут быть непосредственно рассчитаны на основе измерений распределения плотности мощности $E(x, y, z)$

$$\sigma_x^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) (x - \bar{x})^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy}, \quad (1)$$

$$\sigma_y^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) (y - \bar{y})^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy}, \quad (2)$$

$$\sigma_{xy}^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) (x - \bar{x})(y - \bar{y}) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy}, \quad (3)$$

где моменты первого порядка распределения плотности мощности ЛИ $\bar{x}(z)$ и $\bar{y}(z)$, определяющие координаты центроида в поперечном сечении лазерного пучка, рассчитываются по формулам

$$\bar{x}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x E(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy},$$

$$\bar{y}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y E(x, y, z) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) dx dy}. \quad (4)$$

Определение трех угловых и четырех смещенных моментов второго порядка распределения Вигнера осуществляют на основании измерений трех пространственных моментов в не менее чем двадцати сечениях лазерного пучка, равномерно распределенных по оси z , в области, по крайней мере, в три раза превышающей обобщенные длины Рэлея до и после местоположения обобщенной перетяжки пучка с последующей аппроксимацией пространственных моментов тремя независимыми гиперболами.

В соответствии с рекомендациями ISO 11146 [2–4] все лазерные пучки можно разделить на стигматические, пучки с простым астигматизмом и пучки с общим астигматизмом, причем большинство практически используемых лазеров, вследствие конструкции их резонаторов, образуют пучки, которые являются стигматическими или обладают простым астигматизмом. Для описания лазерных пучков, имеющих некоторую симметрию, достаточно меньшее число параметров.

Стигматизм – это свойство пучка иметь круговое распределение плотности мощности в любой плоскости при свободном распространении излучения и после прохождения излучения через цилиндрическую линзу иметь распределение плотности мощности с той же азимутальной ориентацией, что и линза [2].

Простой астигматизм – это свойство пучка, не являющегося стигматическим, сохранять постоянное значение азимутального угла при свободном распространении излучения, а также свою начальную ориентацию после прохождения излучения через цилиндрический оптический элемент, ось которого параллельна одной из главных осей пучка [2].

Для описания распространения стигматических пучков требуются сведения о трех физических величинах: местоположении перетяжки пучка z_0 , угле расходимости излучения в дальней зоне θ_σ и диаметре перетяжки $d_{\sigma 0}$. Зная эти три величины, можно рассчитать

диаметр пучка $d_\sigma(z)$ в любой плоскости вдоль оси распространения пучка z в соответствии со следующим уравнением:

$$d_\sigma^2(z) = d_{\sigma 0}^2 + (z - z_0)^2 \theta_\sigma^2. \quad (5)$$

Распространение пучка с простым астигматизмом описывается аналогичными уравнениями и параметрами, определенными независимо для осей x и y .

В общем случае обе ширины пучка вдоль главных осей рассчитываются по формулам

$$d_{\sigma x}(z) = 2\sqrt{2} \left[(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + \gamma \left[(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4(\sigma_{xy}^2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$d_{\sigma y}(z) = 2\sqrt{2} \left[(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \gamma \left[(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4(\sigma_{xy}^2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где для $\sigma_x^2 \neq \sigma_y^2$

$$\gamma = \text{sgn}(\sigma_x^2 - \sigma_y^2) = \frac{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}{|\sigma_x^2 - \sigma_y^2|}. \quad (8)$$

Ориентация главных осей распределения плотности мощности или азимутальный угол $\phi(z)$ могут быть получены из моментов второго порядка распределения плотности мощности

$$\phi(z) = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\sigma_{xy}^2(z)}{\sigma_x^2(z) - \sigma_y^2(z)}. \quad (9)$$

В случае стигматических пучков профиль распределения плотности мощности обладает круговой симметрией, и диаметр пучка определяют по формуле

$$d_\sigma(z) = 2\sqrt{2(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)}. \quad (10)$$

Угол расходимости ЛИ θ_σ – это мера увеличения диаметра пучка с увеличением расстояния от местоположения перетяжки

$$\theta_\sigma = \lim_{(z-z_0) \rightarrow \infty} [d_\sigma/(z-z_0)]. \quad (11)$$

Углы расходимости ЛИ могут быть определены методом фокального пятна с использо-

ванием свободных от aberrаций фокусирующих элементов исходя из измерений диаметра пучка $d_{\sigma f}$ на фокусном расстоянии f от задней главной плоскости фокусирующего элемента из соотношения

$$\theta_{\sigma} = d_{\sigma f} / f. \quad (12)$$

Важной характеристикой пучка лазерного излучения является параметр качества пучка M^2 , который является отношением произведения диаметра на угол расходимости исследуемого пучка к произведению аналогичных параметров совершенного гауссова пучка (TEM_{00}), расходимость которого обусловлена только дифракцией, при той же длине волны λ

$$M^2 = \frac{\pi d_{\sigma 0} \theta_{\sigma}}{4\lambda}. \quad (13)$$

Параметр качества не изменяется на всем пути распространения пучка при прохождении через свободные от aberrаций оптические элементы и отсутствии ограничивающих пучок апертур.

Для определения местоположения перетяжки пучка в случае, когда она недоступна для непосредственных измерений, необходимо определить диаметры и углы расходимости ЛИ в разных сечениях вдоль оси распространения излучения z . При этом необходимо выполнить измерения, по крайней мере, при десяти различных z , причем половина измерений должна быть выполнена на расстоянии до одной длины Рэлея и половина – на расстоянии более двух длин Рэлея от перетяжки. Затем путем гиперболической аппроксимации измеренных диаметров пучка вдоль направления распространения излучения z в соответствии с формулой (5) определяются местоположение и диаметр (ширина) перетяжки, а также рассчитывается значение M^2 .

Если перетяжка пучка недоступна для непосредственных измерений, то следует создать искусственную перетяжку пучка с использованием безабберационного фокусирующего элемента и провести измерения параметров пучка. Распространение пучка после фокусирующейся линзы описывается выражением, аналогичным (5). Так как параметр качества пучка инвариантен при прохождении через безабберационные оптические элементы, то можно рассчитать параметры пучка, зная его параметры после линзы.

Установка для определения пространственных характеристик лазерного излучения (УИЛИ)

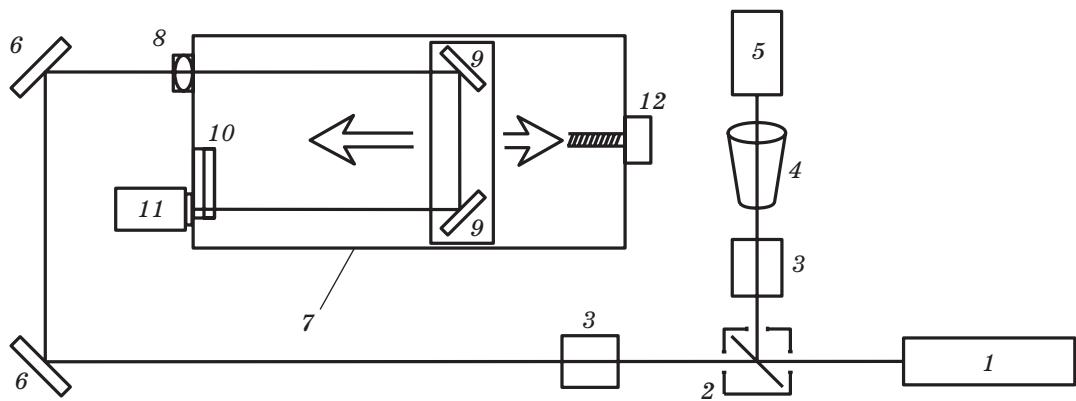
УИЛИ была создана в Институте физики НАН Белоруссии с целью обеспечения метрологического контроля лазерной техники. При ее создании учтены современные требования, установленные в международных стандартах [2–6].

УИЛИ позволяет контролировать основные параметры стигматических пучков и пучков с простым астигматизмом лазеров в спектральном диапазоне от 0,4 до 1,8 мкм и обеспечивает измерение распределения плотности мощности (энергии) в поперечном сечении лазерного пучка, определение диаметра и ширины пучка вдоль обоих осей (x и y) на основании вычислений вторых моментов функции распределения плотности мощности (энергии) ЛИ, а также с использованием трех альтернативных методов [4]: метода варьируемой диафрагмы, метода движущегося острого края, метода движущейся щели.

Кроме того, УИЛИ позволяет измерять углы расходимости ЛИ методами фокального пятна и двух сечений, определять параметр качества пучка M^2 , местоположение перетяжки и диаметр (ширина вдоль главных осей) пучка в ней, проводить измерение эллиптичности, большой и малой полуосей пучка, а также вычислять координаты энергетического центра (центроида) и максимальной интенсивности ЛИ и измерять стабильность положения центроида и пика плотности мощности (энергии) ЛИ.

Оптическая схема установки приведена на рисунке. Излучение испытуемого лазера с помощью светофильтрового кубика разделяется на два потока. Первый пучок, предварительно ослабленный с помощью нейтральных фильтров, подается на камеру, которая, перемещаясь вдоль направления распространения пучка, позволяет регистрировать пространственное распределение плотности мощности (энергии) ЛИ в поперечном сечении пучка на различных расстояниях от лазера. Для согласования размеров пучка ЛИ с размерами приемного элемента камеры может использоваться телескоп. Второй пучок после прохождения через светофильтры с помощью юстировочных зеркал направляется на вход оптической системы для измерения M^2 и далее на вторую камеру.

Полностью автоматизированная система для измерения M^2 М2-200-10-ВВ (далее – си-



Оптическая схема УИЛИ. 1 – испытуемый лазер, 2 – светоделительный кубик, 3 – нейтральные фильтры, 4 – телескоп, 5 – камера, 6 – юстировочные зеркала, 7 – система измерения M^2 , 8 – линза, 9 – подвижные зеркала, 10 – турели с нейтральными фильтрами, 11 – камера, 12 – шаговый двигатель.

стема) производства фирмы *Spiricon* (США) позволяет проводить измерения пространственных характеристик ЛИ в соответствии с ISO 11146-1 [2].

На входе системы имеется отверстие апертурой 25 мм для установки линзы с целью создания искусственной перетяжки пучка. Внутри системы находятся зеркала, которые, перемещаясь с помощью шагового двигателя, позволяют изменять в системе длину оптического пути пучка лазера в диапазоне от 355 до 1295 мм с минимальным шагом 20 мкм, тем самым позволяя как бы перемещать стационарно установленную камеру вдоль сфокусированного пучка. По мере передвижения зеркал система проводит серию измерений распределения плотности мощности ЛИ в различных точках вдоль направления распространения пучка и определяет значения ширины (диаметров) пучка в этих точках. Поскольку при передвижении зеркал интенсивность падающего на камеру излучения вследствие изменения диаметра лазерного пучка после линзы существенно изменяется, система автоматически корректирует интенсивность падающего излучения с помощью установленных внутри системы турелей с нейтральными фильтрами, а также автоматически проводит процедуру коррекции фона. Путем гиперболической аппроксимации измеренных значений ширины (диаметров) пучка в разных сечениях пучка вдоль оси распространения излучения определяются значения ширины (диаметр) искусственной перетяжки $d_{\sigma 0l}$ и углы расходимости $\theta_{\sigma l}$ после линзы, с помощью которых рассчитывается параметр качества пучка M^2 .

Диаметр перетяжки пучка $d_{\sigma 0}$ рассчитывают на основании измеренных значений угла расходимости θ_{σ} и параметра качества пучка M^2 согласно формуле (13).

В состав установки входят четыре камеры: COH7512 и SP1550M фирмы *Spiricon* (США), LaserCam IID 1/2 и EP7290 фирмы *Coherent* (США), характеристики которых представлены в табл. 1. Камеры позволяют с высоким разрешением измерять пространственное распределение интенсивности ЛИ, на основании которого программа обработки данных анализатора распространения пучка автоматически проводит расчет пространственных характеристик ЛИ. Пространственное распределение интенсивности ЛИ может быть показано в двухмерном либо трехмерном виде. Программное обеспечение позволяет выбирать размер и форму цифровой апертуры камеры, при этом для расчета характеристик ЛИ используются только данные внутри апертуры. Все данные отображаются в графическом и численном виде и могут быть сохранены для последующей обработки.

Для устранения погрешностей измерений, обусловленных вибрациями, все элементы установки располагаются на оптическом столе с системой виброзоляции 1VIS95W фирмы *Standa* (Литва).

Оценивание неопределенностей результатов измерения

Одной из важнейших метрологических характеристик любого средства измерения является неопределенность результата измерения.

Таблица 1. Характеристики камер УИЛИ

Характеристики	СОНУ7512	LaserCam ИИД 1/2	EP7290	SP1550M
Разрешение	1290×1022	736×484	632×480	640×480
Размер элемента, мкм	6,7×6,7	8,5×9,8	17,3×19,5	8,4×9,8
Размер активной области, мм	8,7×6,9	6,4×4,8	12,5×9,4	6,5×4,8
Тип и материал приемника	матрица ПЗС (кремний)	матрица ПЗС (кремний)	Видикон	матрица ПЗС (кремний с фосфорным покрытием)
Тип камеры	цифровая	цифровая	аналоговая	аналоговая
Спектральный диапазон, нм	190–1100	190–1100	400–1800	1440–1605
Сигнал/шум, дБ	56	58	44	30
Частота регистрации, Гц	12	60	1	3
Время экспозиции, с	1/12–1/10000	1/60–1/15000	—	1/60–1/100000

Возникающие при измерениях на УИЛИ неопределенности могут быть обусловлены неоднородностями оптических элементов системы, нелинейностью приемного элемента детектора лазерного излучения (камеры), неточностью измерения фокусного расстояния фокусирующих элементов и др. Суммарная стандартная неопределенность результата измерения рассчитывается как квадратный корень из суммы квадратов составляющих ее стандартных неопределенностей, оцененных по типу А (случайные) или по типу В (систематические) [7].

Для оценки неопределенности результата измерения диаметра (ширины вдоль обеих осей) пучка перед камерой нормально к направлению распространения излучения помещается калиброванная диафрагма и на основании зарегистрированного распределения плотности мощности ЛИ измеряется эффективный диаметр калиброванной диафрагмы d .

Относительную стандартную неопределенность результата среднего значения диаметра пучка оценивают по типу А на основании n измерений эффективного диаметра диафрагмы

$$u(\bar{d}) = \frac{1}{\bar{d}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (14)$$

Относительная стандартная неопределенность результата измерения диаметра пучка $u_e(d)$, обусловленная систематическим изменением свойств измерительной системы, оценивается по типу В в предположении равномерного

распределения плотности вероятности отклонений показаний измерительной установки от значений эталонных диаметров диафрагмы d_{et}

$$u(d) = \frac{1}{d_{\text{et}}} \frac{|d - d_{\text{et}}|}{\sqrt{3}}. \quad (15)$$

Измерения проводят с диафрагмами различных диаметров и в качестве неопределенности $u_e(d)$ выбирают максимальное значение неопределенности $u(d)$.

Суммарную относительную стандартную неопределенность измерений диаметра (ширины) пучка определяют по формуле

$$u_c(d) = \sqrt{u_e^2(d) + u_D^2(\bar{d}) + u_D^2(d)}, \quad (16)$$

где $u_D(d)$ – относительная стандартная неопределенность измерения диаметра калиброванной диафрагмы.

В табл. 2 представлены значения составляющих суммарной относительной стандартной неопределенности результата измерений значений ширины пучка вдоль осей, установленные в процессе метрологической аттестации УИЛИ.

Суммарную относительную стандартную неопределенность результата измерений угла расходимости определяют по формуле

$$u_c(\theta) = \sqrt{u_e^2(\bar{\theta}) + u_D^2(d) + u^2(\bar{\theta}) + u_L^2(\theta) + u_f^2(\theta)}, \quad (17)$$

где $u(\bar{\theta})$ – относительная стандартная неопределенность результата измерения среднего значения угла расходимости, рассчитанная по формуле, аналогичной (14), $u_L(\theta)$ – относитель-

Таблица 2. Суммарная относительная стандартная неопределенность результата измерения значений ширины пучка ЛИ вдоль осей x и y и ее составляющие

Тип камеры	$u_e(d_x)$, %	$u(\bar{d}_x)$, %	$u_D(d_x)$, %	$u_c(d_x)$, %
СОНУ7512	2,16	0,05	0,03	2,16
Lasercam3D	2,51	0,02	0,03	2,51
EP7290A	2,05	0,01	0,03	2,05
SP1550M	1,44	0,21	0,03	1,46
Тип камеры	$u_e(d_y)$, %	$u(\bar{d}_y)$, %	$u_D(d_y)$, %	$u_c(d_y)$, %
СОНУ7512	1,99	0,10	0,03	1,99
Lasercam3D	2,51	0,02	0,03	2,51
EP7290A	2,05	0,01	0,03	2,05
SP1550M	1,17	0,13	0,03	1,18

ная стандартная неопределенность установки детектора на фокусном расстоянии фокусирующего элемента, $u_f(\theta)$ – относительная стандартная неопределенность, обусловленная неточностью измерения фокусного расстояния фокусирующего элемента.

Установленные в процессе метрологической аттестации значения неопределенностей показаны в табл. 3.

Для оценки относительной стандартной неопределенности измерения параметра качества M^2 , обусловленной систематическим изменением свойств измерительной системы, проводится измерение параметра качества пучка эталонного лазера, работающего на mode TEM_{00} ($M_{\text{et}}^2 = 1$). Неопределенность оценивается по типу В исходя из равномерного распределения плотности вероятности отличия показаний измерительной установки от эталонного значения

$$u(M^2) = \frac{|M_i^2 - M_{\text{et}}^2|}{M_{\text{et}}^2} / \sqrt{3}. \quad (18)$$

Суммарную относительную стандартную неопределенность измерения параметра качества пучка рассчитывают по формуле

$$u_c(M^2) = \sqrt{u^2(M^2) + u^2(\bar{M}^2)}, \quad (19)$$

где $u(\bar{M}^2)$ – относительная стандартная неопределенность результата измерения среднего значения параметра качества пучка, рассчитанная по формуле, аналогичной (14).

Суммарную относительную стандартную неопределенность измерений значений ширины (диаметра) перетяжки рассчитывают по формуле

$$u_c(d_0) = \sqrt{u^2(\lambda) + u_c^2(M^2) + u_c^2(\theta)}, \quad (20)$$

где $u(\lambda)$ – относительная стандартная неопределенность, обусловленная неточностью определения длины волны ЛИ.

В табл. 4 и 5 приведены значения составляющих неопределенностей результатов измерений параметра качества пучка и значений ширины перетяжки.

В процессе проведения метрологической аттестации УИЛИ были установлены следующие метрологические характеристики:

- суммарная относительная стандартная неопределенность измерения диаметра (ширины вдоль осей) пучка ЛИ в диапазоне от 0,4 мм до 9 мм не превышает 3%,

- суммарная относительная стандартная неопределенность измерения углов расходимости ЛИ до 30 мрад не превышает 2,5%,

- суммарная относительная стандартная неопределенность измерения параметра качества пучка в диапазоне от 1 до 10 не превышает 5%.

Таблица 3. Суммарная относительная стандартная неопределенность результата измерения углов расходимости ЛИ и ее составляющие

Тип камеры	$u_e(d_x)$, %	$u_D(d_x)$, %	$u_f(\theta)$, %	$u_L(\theta)$, %	$u(\bar{\theta}_x)$	$u_c(\theta_x)$, %
СОНУ7512	2,16	0,03	0,02	0,02	0,14	2,16
EP7290A	2,05	0,03	0,02	0,02	0,01	2,05
SP1550M	1,44	0,03	0,02	0,02	0,07	1,44
Тип камеры	$u_e(d_y)$, %	$u_D(d_y)$, %	$u_f(\theta)$, %	$u_L(\theta)$, %	$u(\bar{\theta}_y)$	$u_c(\theta_y)$, %
СОНУ7512	1,99	0,03	0,02	0,02	0,09	1,99
EP7290A	2,05	0,03	0,02	0,02	0,11	2,05
SP1550M	1,17	0,03	0,02	0,02	0,06	1,17

Таблица 4. Суммарная относительная стандартная неопределенность результата измерения параметра качества пучка ЛИ и ее составляющие

Тип камеры	$u(\bar{M}_x^2)$, %	$u(M_x^2)$, %	$u_c(M_x^2)$, %
COHU7512	2,31	0,15	2,32
SP1550M	0,47	1,73	1,79
Тип камеры	$u(\bar{M}_y^2)$, %	$u(M_y^2)$, %	$u_c(M_y^2)$, %
COHU7512	2,31	0,13	2,31
SP1550M	0,61	4,04	4,09

Таблица 5. Суммарная относительная стандартная неопределенность результата измерений значений ширины перетяжки пучка ЛИ и ее составляющие

Тип камеры	$u(\lambda)$, %	$u_c(M_x^2)$, %	$u_c(\theta_x)$, %	$u_c(d_{0x})$, %
COHU7512	0,01	2,32	2,16	3,17
SP1550M	0,01	1,79	1,44	2,30
Тип камеры	$u(\lambda)$, %	$u_c(M_y^2)$, %	$u_c(\theta_y)$, %	$u_c(d_{0x})$, %
COHU7512	0,01	2,31	1,99	3,05
SP1550M	0,01	4,09	1,17	4,25

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.С., Золотаревский Ю.М., Котюк А.Ф., Либерман А.А., Саприцкий В.И., Столляревская Р.И., Улановский М.В., Чупраков В.Ф. Основы оптической радиометрии. М.: Физматлит, 2003. 544 с.
2. ISO 11146-1:2005. “Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and propagation ratios – Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams”. ISO, 2005.
3. ISO 11146-2:2005. ” Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and propagation ratios – Part 2: General astigmatic beams”. ISO, 2005.
4. ISO/TR 11146-3:2004. “Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and propagation ratios – Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and detail of test methods”. ISO, 2004.
5. ISO 13694:2000. “Optics and optical instruments – Lasers and laser related equipment – Test for laser beam power [energy] density distribution”. ISO, 2000.
6. ISO 11670:2003. “Laser and laser-related equipment – Test methods for laser beam parameters – Beam positional stability”. ISO, 2003.
7. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. СПб.: ГП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999. 134 с.