

Научная статья

УДК 681.7.013.8

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-31-37>

Измерение диаметра пятна и расходимости пучка лазерного излучения теневым методом с использованием обобщённых параметров

Михаил Владимирович Киргетов

Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия, mkirgetov@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9875-8471>

Аннотация. Рассмотрены регламентированные действующими стандартами методы измерения расходимости пучка и диаметра эквивалентного круга в сечении пучка лазерного излучения. Показаны источники погрешности измерения распределения плотности мощности в сечении пучка лазерного излучения. Основным источником погрешности заключается в том, что при расчёте диаметра пятна распределения плотности мощности в сечении пучка лазерного излучения учитывается только часть площади распределения плотности мощности и измеряемое распределение плотности мощности не соответствует нормальному закону распределения, на котором основаны рекомендации стандарта. Предложен метод обработки результатов измерений теневым методом диаметра эквивалентного круга в распределении плотности мощности в сечении пучка лазерного излучения. Рассматриваемый метод основан на применении обобщённых параметров. Описана экспериментальная измерительная установка, которую можно использовать для контроля расходимости пучка излучения и диаметра эквивалентного круга в сечении лазерного пучка при серийном производстве лазеров. Представлены результаты обработки измерений расходимости пучка излучения серийного лазера предложенным методом. Рассчитано расхождение результатов измерений распределений плотности мощности теневым методом и методом сканирования щелью согласно рекомендациям действующего стандарта. Расхождение достигает 60 % в зависимости от формы измеряемого распределения плотности мощности. Предложенный метод обработки результатов измерений не требует сложного оборудования, имеет высокую чувствительность и пригоден для измерения распределения плотности мощности других источников излучения.

Ключевые слова: расходимость пучка излучения, диаметр пучка излучения, оптические измерения, теневой метод, граничная характеристика, обобщённые параметры, лазерное излучение

Для цитирования: Киргетов М. В. Измерение диаметра пятна и расходимости пучка лазерного излучения теневым методом с использованием обобщённых параметров // Измерительная техника. 2022. № 11. С. 31–37. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-31-37>

Measurement of spot diameter and divergence of laser beam by shadow method using generalized parameters

Mikhail V. Kirgetov

S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg, Russia, mkirgetov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9875-8471>

Abstract. The methods of measuring the divergence of a beam and the diameter of an equivalent circle in the cross section of a laser beam regulated by current standards are considered. The sources of error in measuring the power density distribution in the cross section of the laser beam are shown. The main source of error lies in taking into account only part of the distribution area in the calculation and the non-compliance of the measured distribution with the normal distribution law on which the recommendations of the standard are based. A method is proposed for calculating the diameter of an equivalent circle in the distribution of power density in the cross section of a laser beam, based on the results of shadow measurement. The method under consideration is based on the application of generalized parameters. An experimental measuring device is described that can be used to control the divergence and diameter of an equivalent circle in the cross section of laser beams in the mass production of lasers. The results of measuring the divergence of the radiation beam of a serial laser obtained by the proposed method are presented. The discrepancy between the measurement results by the shadow method and the slit scanning method according to the recommendation of the existing standard is calculated. The discrepancy reaches 60% depending on the shape of the measured distribution. The proposed method does not require complex equipment, has high sensitivity and is suitable for measuring other radiation sources.

Keywords: radiation divergence, radiation beam diameter, optical measurements, shadow method, boundary characteristic, generalized parameters, laser radiation

Введение. Существует два способа измерения расходимости пучка лазерного излучения: метод фокального пятна и метод двух сечений. Для лазерных пучков круглой формы согласно этим методам измеряют диаметр сечения пучка плоскостью, перпендикулярной направлению распространения луча [1].

В методе фокального пятна измеряют диаметр пучка в фокальной плоскости вспомогательного объектива. Прошедшее через объектив излучение лазера искажается, и форма пучка изменяется вследствие аберраций объектива. Поэтому измерение диаметра трансформированного объективом

пучка происходит с дополнительной погрешностью, зависящей от расходимости падающего на объектив пучка. В методе двух сечений согласно ГОСТ 26086-84¹ расходимость θ пучка лазера определяется по формуле

$$\theta = (d_2 - d_1)L^{-1}, \quad (1)$$

где d_1, d_2 – диаметры пучка лазера соответственно в первом и во втором выбранных сечениях; L – расстояние между сечениями.

Метод двух сечений целесообразно применять в дальней зоне, где пучок лазерного излучения окончательно сформировался. Форма распределения плотности мощности (РПМ) в сечении пучка лазерного излучения зависит от расстояния L , поэтому расчёты ведут по диаметру эквивалентного круга (ДЭК), заменяющего реальное РПМ. В ГОСТ 26086-84 нет единого критерия расчёта ДЭК пучка лазерного излучения и, следовательно, расходимости, а лишь дана рекомендация рассчитывать эти величины, руководствуясь уровнями плотности мощности относительно её максимального значения в выбранном сечении. Уровни отсчёта могут быть указаны в стандартах или технических условиях для лазеров конкретных типов.

В ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008² расходимость лазерного излучения рекомендовано измерять также методом двух сечений, при этом ДЭК пучка излучения определять методом фокального пятна, используя идеальный без-

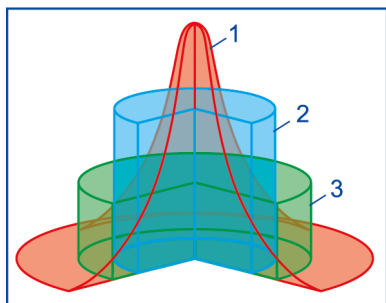


Рис. 1. Пространственная фигура (1) распределения энергетической освещённости в поперечном сечении луча лазера и два возможных эквивалентных цилиндра (2, 3), объём которых совпадает с объёмом реального распределения

Fig. 1. The spatial figure (1) of the distribution of energy illumination in the beam section and two possible equivalent cylinders (2, 3) whose volume coincides with the volume of the real distribution

абберационный объектив. Характеристики реального объектива искажают измеряемое РПМ. Если направить на такой объектив даже не очень мощное излучение импульсного наносекундного лазера, то линзы объектива будут повреждены. Чтобы не рисковать уникальным объективом лучше использовать объектив более низкого качества. Установка защитного ослабителя перед объективом дополнительно искажает получаемое РПМ. В результате метод

фокального пятна не обеспечивает правильного измерения РПМ. Рекомендации по методам прямых измерений РПМ в ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008³ тоже отсутствуют. В нём описаны только альтернативные методы измерения ДЭК, среди которых широко распространённый в других областях оптических измерений теневой метод. Предлагаемая в ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 методика измерения ДЭК в РПМ на некотором уровне от максимального значения РПМ имеет недостатки.

Цель работы – предложить метод обработки результатов измерения РПМ в сечении различных пучков лазерного и некогерентного излучения с применением теневого метода и обобщённых параметров пучка излучения.

Методы измерения ДЭК в РПМ. Нахождение ДЭК в РПМ в сечении пучка излучения предполагает решение двух задач: как измерить РПМ в сечении пучка с координатами x, y, z (рис. 1) и каким образом рассчитать ДЭК. Координаты x, y определяют положение РПМ на плоскости. По координате z в этом случае определяют уровень отсчёта от максимальной плотности мощности в сечении. РПМ можно измерить различными способами: фотоприёмной матрицей, фотографированием изображения на визуализаторе для инфракрасной области спектра или на экране для видимой области спектра, сканированием профиллографом выжженной картины на мишени.

Возникающие при этом трудности рассмотрим на примере фотоприёмной матрицы, аналогичной используемой в фотоаппаратах. Пределы изменения освещённости от реальных фотографируемых объектов не должны превышать измеряемую освещённость более чем на три порядка. Необходимый для нормальной работы матрицы фотоаппарата уровень освещённости устанавливают, изменяя полевую диафрагму в фокальной плоскости объектива и время экспозиции. Однако оба этих способа не подходят для измерения РПМ излучения в сечении пучка лазера. Требуется ослабитель, не искажающий фронт волны падающего излучения. С точки зрения измерительной техники минимальный линейный динамический диапазон матрицы составляет два порядка при освещении большей части поверхности матрицы, что обусловлено большим рассеянием света в устройстве от соседних элементов матрицы (коэффициент отражения от поверхности кремниевой матрицы составляет 30 %). Плотность мощности лазерного излучения на 6–8 порядков превышает требуемое значение для нормальной работы матрицы. Из-за узкого динамического диапазона матрицы необходима точная подгонка требуемой плотности мощности на поверхности матрицы. В видимой области спектра – это трудная задача, в инфракрасной области – почти неосуществимая из-за отсутствия подходящих ослабителей. Разработка и изготовление макетного образца оптико-электронного устройства с матрицей и написание программы обработки под конкретную матрицу предполагают

¹ ГОСТ 26086-84. Методы измерения диаметра пучка и энергетической расходимости лазерного излучения.

² ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 1. Стигматические (гомоцентрические) слабоастигматические пучки.

³ ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 3. Собственная и геометрическая классификация лазерных пучков, специфика их распространения и методики измерений.

научно-исследовательские работы в течение минимум одного года. Размер матриц, выпускаемых промышленностью разных стран, не превышает 10×10 мм. Без объектива можно измерять только в ближней зоне лазерные пучки, диаметр которых не превышает 6–8 мм, что не представляет интереса.

В связи с трудностями измерения РПМ в ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 для измерения ДЭК пучка лазерного излучения рекомендовано использовать альтернативные методы – метод регулируемой диафрагмы, теневой метод [2, 3] и метод сканирования щелью. ДЭК пучка излучения оценивается на некотором уровне от максимального значения отсчёта в РПМ и уточняется по формулам, используемым для статистической обработки результатов измерений, распределённых по нормальному закону. В реальных измерениях такие физические процессы, как остывание нагретого излучением теплового приёмника излучения и разряды конденсаторов в регистрирующих устройствах, соответствуют экспоненциальному закону с переходной характеристикой вида $h(t) = 1 - e^{-t/\tau}$, где τ – постоянная времени процесса. Предлагаемый в ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008 уровень отсчёта по координате z в одном из альтернативных методов, в частности в методе сканирования щелью, составляет 13,5 % от максимальной плотности мощности и соответствует уровням 0,05 и 0,95 экспоненциальной граничной характеристики в теневом методе, однако рекомендуются уровни 0,16 и 0,84. Это может привести к расхождению на 25–30 % результатов измерений теневым методом и методом сканирования щелью в зависимости от формы измеряемого РПМ. В теневом методе по ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 обрабатывается примерно 70 % площади РПМ в сечении пучка лазерного излучения, что приводит к дополнительной погрешности измерений. Ситуация усугубляется рекомендованным методом расчёта ДЭК, основанном на нормальном законе распределения, плохо сочетающимся с реальной ситуацией в измерениях РПМ в пучке излучения. Устранить эти недостатки позволяет применение в расчёте ДЭК обобщённых величин.

Применение обобщённых параметров. В [4] предложено понятие обобщённой площади

$$A_{об} = \left(\int_{A_{ин}} E dA \right)^2 / \int_{A_{ин}} E^2 dA,$$

где $A_{ин}$ – площадь интегрирования; E – энергетическая освещённость (функция координат точки сечения либо площади сечения пучка).

Понятие обобщённой площади пучка излучения приобретает смысл площади сечения эквивалентного пучка излучения, имеющего неизменную поверхностную плотность мощности излучения (освещённости) E в любой точке сечения и полученного из условия

$$\int_{A_{ин}} E dA = \int_{A_{ин}} E^2 dA$$

для эквивалентного и рассматриваемого пучков.

Для пучков с сечением, близким к кругу, по обобщённой площади находят обобщённый диаметр круга. Способ такого расчёта требует знания РПМ во всех точках на площади распределения. Обобщённый диаметр $d_{об}$ связан с полным потоком (мощности излучения) в РПМ и равен минимальному диаметру диафрагмы, через которую проходит весь поток излучения при равномерном РПМ в сечении пучка лазерного излучения. При вычислении $d_{об}$ используют всю площадь РПМ, не вводя уровни отсчёта относительно максимального значения плотности мощности. Это устраняет имеющиеся в ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008 ошибки вычисления ДЭК в РПМ в сечении пучка лазерного излучения. Однако трудность измерения РПМ остаётся. В таком случае применяют альтернативные методы измерений по ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 в комплексе с обобщёнными параметрами: методы регулируемой диафрагмы, сканирования щелью и теневой метод.

Метод регулируемой диафрагмы пригоден только для симметричных РПМ в пучке излучения, требует совмещения оптических осей измеряемого лазера и измерительного устройства, что является довольно трудной задачей. Метод не имеет преимуществ перед другими методами и используется для предварительной оценки параметров РПМ.

Достоинство метода сканирования щелью заключается в возможности измерения любых РПМ и отсутствие привязки к оптической оси установки. Недостаток – необходимость иметь большое количество щелей для разных РПМ.

Теневой метод измерения заключается в получении измеряемого РПМ в виде граничной функции при сдвигании границы света и тени в форме ножа с острой кромкой по плоскости РПМ. Если рассматривать эту функцию от времени движения границы свет/тень, то эта же функция будет электрической переходной характеристикой. Производная от переходной характеристики – импульсная характеристика. Аналогично производная от граничной функции – функция рассеяния линии. Найденные таким образом характеристики полностью характеризуют РПМ излучения. Преимущество теневого метода перед методом сканирования щелью состоит в большей чувствительности и возможности

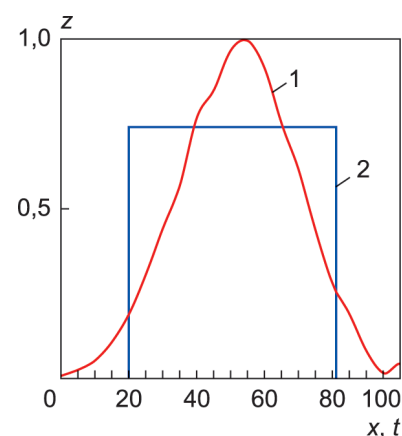


Рис. 2. Проекция реального объёмного распределения плотности мощности (1) и эквивалентного цилиндра (2) на плоскость x, z ; по оси x отложено количество интервалов снятия отсчётов в единицах перемещения или времени x, t

Fig. 2. Projection of the real volumetric distribution of the power density (1) and the equivalent cylinder (2) on the x, z plane. The number of sampling intervals in units of displacement or time is postponed along the x axis x, t

простого изменения пространственного разрешения путём изменения количества отсчётных точек. Для обработки результатов измерений этими методами используют формулы обобщённых мощности и длительности импульса излучения [5], которые подходят к РПМ в сечении пучка лазерного излучения при его сканировании щелью.

При пересечении щелью, перекрывающей всё РПМ с координатами x, y в плоскости сечения пучка вдоль координаты x , сигнал фотоприёмника, собирающего весь поток от щели, пропорционален произведению выделяемой щелью площади РПМ и среднего значения плотности мощности на выделенной площади. Плотность мощности откладывают на графике (рис. 2) вдоль координаты z , совпадающей с направлением распространения луча. График полученной функции принадлежит плоскости с координатами x, z . Этот график представляет проекцию объёмного РПМ (см. рис. 1) на плоскость с координатами x, z . Координата y как бы исчезает, но сумма значений плотности мощности вдоль этой координаты в каждой точке сканирования входит в произведение средней плотности мощности на площадь РПМ по координате z . Таким образом, прибор для измерения РПМ заменяет объёмное распределение на плоское. Под прибором подразумевается установка для получения РПМ.

Если вместо координаты сканирования x ввести время t перемещения щели, то рассматриваемый график будет представлять собой график импульса излучения. График импульса излучения можно упростить, применив обобщённые величины. В этом случае РПМ на плоском графике заменяют эквивалентным прямоугольником такой же площади, как площадь под кривой РПМ. В данном прямоугольнике координата z соответствует обобщённой мощности $P_{об}$, а на оси времени x указана обобщённая длительность импульса $t_{об}$. Таких прямоугольников может быть бесчисленное множество. Чтобы выбрать один, однозначно соответствующий

рассматриваемому РПМ, необходимо величины $P_{об}, t_{об}$ рассчитать по формулам обобщённых величин, приведенным в ГОСТ 24286-88⁴. Обобщённая мощность $P_{об}$ – мощность излучения, характеризующая импульс излучения прямоугольной формы, полученный из условий равенства интегралов от мощности по времени $\int_{t_{ин}} P(t)dt$ и от квадрата мощности по времени $\int_{t_{ин}} P^2(t)dt$ соответственно для прямоугольного и рассматриваемого импульсов:

$$P_{об} = \int_{t_{ин}} P^2(t)dt / \int_{t_{ин}} P(t)dt. \quad (2)$$

Обобщённая длительность импульса излучения определяется на основании аналогичного условия равенства интегралов от мощности по времени для прямоугольного и рассматриваемого импульсов:

$$t_{об} = \left[\int_{t_{ин}} P(t)dt \right]^2 / \int_{t_{ин}} P^2(t)dt, \quad (3)$$

где время интегрирования $t_{ин}$ соответствует времени существования импульса.

Эти величины позволяют классифицировать импульсы излучения различной формы. Так как координаты x, t принадлежат одному и тому же графику (см. рис. 2) и значения величины по оси z пропорциональны площади, выделяемой щелью в каждой точке по оси x или t на графике распределения, то рассчитанное значение обобщённой длительности импульса $t_{об}$ равно обобщённой площади $S_{об}$ в основании пространственной фигуры реального распределения.

Площадь распределения на графике, равная площади прямоугольника, равна также объёму цилиндра для распределений, форма которых похожа на круг. В общем случае РПМ пучка излучения рекомендуется пользоваться обобщённой площадью РПМ, тем более что приборы, работающие по теневому методу и методу сканирования щелью, измеряют величину, пропорциональную площади распределения. Из значений обобщённой площади вычисляют обобщённый диаметр круга распределения, который является одним из возможных вариантов ДЭК.

Фигуру 1 (см. рис. 1) можно однозначно охарактеризовать двумя обобщёнными параметрами: мощностью $P_{об}$ и площадью $S_{об}$ (обобщённого диаметра) круга в основании цилиндра, т. е. заменить эквивалентным цилиндром с таким же объёмом и $S_{об}$ в основании. При измерении обобщённой площади $S_{об}$ теневым методом необходимо измеренную граничную характеристику продифференцировать по координате сканирования и затем рассчитать обобщённые параметры.

Рассмотренный метод измерения и расчёта обобщённого диаметра можно применять для любых РПМ, имеющих форму круга или близкую к кругу, и различных источников излучения. В зависимости от характеристик конкретного лазера и поставленной задачи расходимость пучка определяют в соответствии с действующими ГОСТ 26086-84

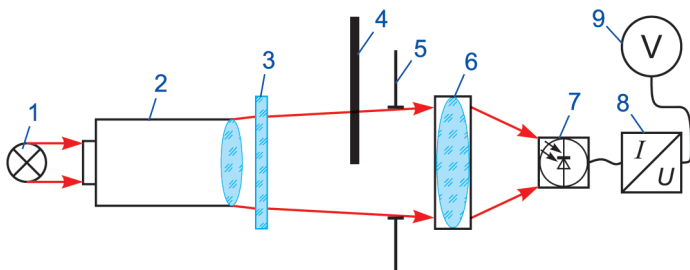


Рис. 3. Схема установки для измерения распределения плотности мощности в луче лазера теневым методом:

1 – лазер; 2 – телескопическая система; 3 – нейтральный светофильтр; 4 – подвижка с экраном; 5 – набор диафрагм; 6 – коллиматор; 7 – фотоприёмник; 8 – преобразователь ток – напряжение; 9 – вольтметр

Fig. 3. Measurement scheme for power density distribution in laser beam by shadow method:

1 – laser; 2 – telescopic arrangement; 3 – neutral filter; 4 – screen with motion arrangement; 5 – diaphragm set; 6 – collimator; 7 – photodetector; 8 – current-voltage converter; 9 – voltmeter

⁴ ГОСТ 24286-88. Импульсная фотометрия. Термины и определения.

и ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Местоположение сечения луча лазера выбирают в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008 и рекомендациями в статьях [6–8].

Для оценки возможностей предложенного метода на экспериментальной лабораторной установке автором статьи измерен обобщённый диаметр РПМ пучка излучения маломощного лазера с длиной волны излучения 1,064 мкм и мощностью излучения 600 мВт.

Установка для измерения расходимости излучения лазеров. В экспериментальной установке (рис. 3) лазер 1 наводится в центр входного окна коллиматора 6 с объективом диаметром 148 мм и фокусным расстоянием $f=1600$ мм. Телескопическая система 2 в состав штатной установки не входит, её использование уменьшает расходимость лазерного луча и позволяет сравнивать результаты измерений в сечениях пучка на разных расстояниях от источника в эксперименте. Нейтральные светофильтры 3 ослабляют мощность излучения лазера для попадания в линейный динамический диапазон фотоприёмного устройства 7. Коллиматор собирает поток на площадку фотоприёмника. Коллиматор с приёмным узлом устанавливается на тележку, которая перемещается вдоль оптической оси. Экран 4 закреплён на столике с подвижкой, которая плавно и с одинаковым шагом перекрывает пучок лазера перед входным окном коллиматора. При перемещении вдоль сечения пучка экран обеспечивает границу свет/тень. В случае работы с мощными лазерами перед коллиматором ставят ослабитель любого типа, например с отражающими пластинами [9]. Характеристики ослабителя не влияют на результат измерения. Кремниевым фотодиодом любого типа регистрируется граничная характеристика. Для упрощения наведения установки на исследуемый лазер размер фотоприёмной площадки должен быть большим. Пучок лазера не должен обрезаться оправой коллиматора, что определяется по максимуму сигнала и контролируется набором диафрагм 5. Преобразователь ток-напряжение 8 согласует сопротивление нагрузки фотодиода с вольтметром 9 типа В7-16 или ВМ 830. Общая длина установки около 2 м, высота с тележкой около 1 м.

Энергетический расчёт установки. Общая мощность излучения в РПМ в сечении пучка составляет 0,6 Вт при полном раскрытии входного зрачка коллиматора. Минимальный сигнал на три порядка меньше 0,6 Вт, при этом линейный динамический диапазон установки должен составлять не менее пяти порядков измеряемой величины. Коэффициент пропускания коллиматора равен 0,7. Чувствительность приёмника излучения, например фотодиода типа ФД7К, на длине волны 1,064 мкм составляет $0,1 \text{ А} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Для верхнего предела измерения 10^{-5} Вт фотоприёмного устройства в линейном режиме работы [10] коэффициент пропускания светофильтра 3 (см. рис. 3) $k=10^{-5}(0,6 \cdot 0,7)^{-1}=2,4 \cdot 10^{-5}$. Светофильтр состоит из двух или трёх светофильтров. Нижний предел измерения фотодиода 10^{-8} Вт обеспечивается переключением сопротивления нагрузки фотодиода в преобразователе ток-напряжение [10]. Сопротивление нагрузки фотодиода на нижнем пределе измерения вольтметра 0,01 В, что соответствует отсчёту 100 делений на его шкале:

$R_n=0,01 \text{ В}/[10^{-8} \text{ Вт} \cdot 0,1 \text{ А} \cdot \text{Вт}^{-1}]=10^7 \text{ Ом}$, что допустимо для фотодиода. На верхнем пределе измерения по шкале вольтметра 1 В сопротивление нагрузки фотодиода составит 10^6 Ом . При измерении РПМ более мощных лазеров перед коллиматором может понадобиться ослабитель, состоящий из отражающих пластин [9]. Комбинируя число пластин и число светофильтров, выходят на требуемый предел измерения РПМ в сечении пучка лазера.

Экспериментальные результаты. В состав установки входил одноименный маломощный лазер типа LCM-T-112 с длиной волны излучения 1,064 мкм и диодной накачкой, работающий в непрерывном режиме со стабилизацией выходной мощности. На первом этапе дополнительную телескопическую систему 2 (см. рис. 3) не применяли, и на установке измеряли РПМ в сечении пучка лазера. Лазер устанавливали на расстоянии половины длины используемого помещения для получения РПМ в первом сечении пучка, а во втором сечении – на расстоянии полной длины помещения. Сканирование пучка лазера теневым методом проводили при перемещении экрана слева направо и справа налево с шагом, регулируемым в зависимости от ширины распределения. При постепенном перекрытии РПМ экраном 4 получали граничную характеристику по точкам с выбранным шагом считывания. Дифференцирование граничной характеристики по координате сканирования проводили численным методом в программе Excel. Регистрируемые

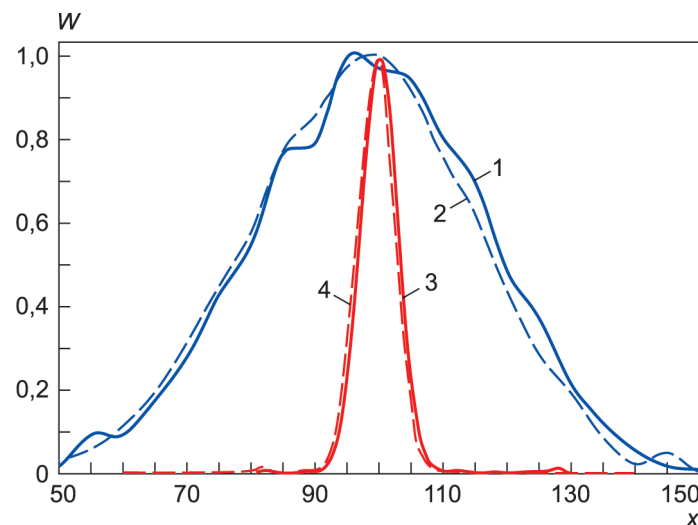


Рис. 4. Относительные распределения вдоль границы тень/свет суммарной энергетической освещённости, пересчитанной в эквивалентное распределение:

1, 2 – при сканировании щелью для лазера без телескопической системы при движении ножа (экрана) соответственно слева направо и справа налево; 3, 4 – с телескопической системой при движении ножа соответственно слева направо и справа налево; исследуемое сечение луча лазера находится на расстоянии 44 м от источника

Fig. 4. Relative distributions of the total energy illumination along the shadow-light boundary converted into an equivalent distribution by scanning with a slit for laser: without a telescopic system when the knife (screen) moves from left to right (1) and from right to left (2), with a telescopic system when the knife moves from left to right (3) and from right to left (4); the studied cross section of the laser beam is located at a distance of 44 m from the source

отсчёты напряжения записывали в программе Excel в два соседних столбца со смещением во втором столбце по строкам на один шаг взятия отсчётов, в третий столбец записывали разности значений соседних отсчётов. Полученные значения в третьем столбце соответствовали численному дифференцированию распределения в первом столбце. Распределение в третьем столбце нормировали для проведения дальнейших расчётов (рис. 4). Погрешность численного дифференцирования не превышала одного шага снятия отсчётов.

На втором этапе эксперимента с целью проверки правильности полученных результатов измерений и оценки их погрешности измеряли РПМ в сечении пучка лазера с дополнительной телескопической системой 2 (расширителем) (см. рис. 3), установленной перед лазером.

Из рис. 4 следует, что телескопическая система уменьшает ширину РПМ. Такое же распределение можно получить методом сканирования РПМ щелью. Следует помнить, что при линейном перемещении экрана по оси x значения по осям y , z изменяются случайным образом. В результате кривые на рис. 4 нельзя описать с физическим смыслом. Эти данные используются для промежуточных расчётов. Конечный итог – две интегральные величины $P_{об}$, $d_{об}$. Обобщённая мощность в дальнейших расчётах не применяется, она в рассматриваемом случае нужна только для вычисления $d_{об}$.

Сканирование пучка излучения экраном в двух встречных направлениях даёт хорошую сходимость результатов измерений. Относительная приведённая погрешность абсолютных измерений характеризует погрешность метода измерений и определяется выражением

$$\delta = [(x_1 - x_2) + (x_3 - x_4)] / (2d_{об}), \quad (4)$$

где x_1 , x_2 , x_3 , x_4 – значения в соответствующих точках по координате x на кривых на подъёме x_1 , x_2 и спаде x_3 , x_4 импульсной характеристики при движении экрана слева направо и справа налево на уровне половины максимального значения на графике.

Отклонения значений полученных распределений при сканировании в прямом и обратном направлении по формуле (4) составляют 6,7 и 2,3 % с телескопической системой и без неё соответственно. Погрешность может быть уменьшена путём увеличения количества точек считывания.

Обобщённый диаметр круга $d_{об}$ распределения находили по формулам расчёта обобщённых параметров (2), (3) в программе Excel, при этом время заменяли порядковым номером снятия отсчётных точек (шагами), интегралы в формулах заменяли суммами. Параметры рассчитывали в следующем порядке: сумму отсчётов, пропорциональную энергии электрического импульса W , отсчёты могут быть нормированы или иметь любые единицы измерения. Затем

находили квадраты каждого отсчёта и вычисляли сумму квадратов отсчётов. Вычисляли квадрат энергии W^2 ; обобщённую мощность $P_{об} = P^2/W$ рассчитывали по формуле (2); обобщённую площадь $S_{об}$ в шагах снятия отсчётов или обобщённый диаметр по формуле (3); $d_{общ} = W^2/P^2$ в частном случае плоского распределения в плоскости x , z . Обобщённый диаметр распределения в линейных единицах x_n , x_{n-1} двух соседних отсчётов в измерениях вычисляли по формуле $d_{об} = d_{общ}(x_n - x_{n-1})$.

После обработки данных измерений для частного случая получили обобщённые диаметры распределения в линейных единицах для двух сечений. Для лазера без телескопической системы во втором сечении на расстоянии 44 м обобщённый диаметр распределения $d_{об} = 63$ мм, а в первом сечении на расстоянии 24 м $d_{об} = 31$ мм. С телескопической системой на расстоянии 44 м $d_{об} = 12$ мм, а на расстоянии 24 м $d_{об} = 8$ мм.

Для расчёта расходимости в формулу (1) подставляли обобщённые диаметры двух сечений лазерного пучка, находящихся на расстоянии 20 м друг от друга. Расходимость пучка лазера без телескопической системы и с системой составили соответственно 1,56 мрад и 0,19 мрад. Полученные значения соответствуют расходимости пучка лазерного излучения в плоском угле.

Полученные данные соответствуют граничной функции и функции сканирования щелью одного и того же распределения. Поэтому можно сравнить результаты измерений, полученные методом обобщённых параметров, теневым методом и сканированием щелью с использованием формул из ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 для двух одноимённых методов (в таблице $d_{т.м}$, $d_{с.щ}$ – диаметры, полученные теневым методом и методом сканирования щелью соответственно; Э1, Э2 – этапы эксперимента с применением телескопической системы и без неё соответственно).

Из таблицы следует, что результаты измерения методами сканированием щелью и теневым методом для РПМ (не соответствующего нормальному закону) излучения лазера с телескопической системой различаются на 62,5 %. Расхождение свидетельствует о неправильно выбранных уровнях отсчёта относительно максимальной мощности и соответственно разных эквивалентных площадях сечения пучка в этих методах. Уточняющий коэффициент в рекомендации ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008, использующий моменты второго порядка для теневого метода использовать нельзя, поскольку в формулу для момента второго порядка входит длина волны лазера, которая к измерению теневым методом отношения не имеет. Теневой метод применим для любых распределений и любых источников, например, светодиода или автомобильной фары. Уменьшить погрешность данного метода можно увеличением числа отсчётных точек (вместо введения уточняющего коэффициента).

Закключение. Теневой метод оптических измерений прост в использовании, обладает высокой чувствительностью, не критичен к смещениям оптической оси, не требует большого числа приспособлений и даёт хорошую сходимость результатов измерений. Обработка результатов

Сравнение измеренных эквивалентных диаметров

Этап	$d_{т.м}$, мм	$d_{с.щ}$, мм	$d_{об}$, мм
Э1	18	17	31
Э2	8	13	8

измерений с применением обобщённых параметров пучка излучения позволяет обрабатывать всю площадь измеряемого РПМ. Рассмотренный способ измерения и расчёта универсален, его можно автоматизировать и применять не только к лазерам, но и к другим источникам излучения. Теневой метод пригоден для любой области спектра и пучков излучения любого размера в ближней и дальней зонах излучения лазера.

Список источников

1. Леонов М. Б. Особенности разработки установок для измерения характеристик качества оптических систем видимого диапазона спектра // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 5. С. 11–16. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-05-11-16>
2. Merlemis N., Kesidis A. L., Sianoudis I., *European Journal of Physics*, 2020, vol. 42, no. 1, 015304. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/abba01>
3. Hedan S., Pop O., Valle V., Cottton M., *Strain*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. e142–e147. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00594.x>
4. Грязнов М. И. Обобщённые параметры непрерывного излучения. В кн.: Импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение, 1985. Вып. 9. С. 26–29.
5. Kirgetov M. V., Kuvaldin E. V., Method of automatic measurement equivalent diameter of scattering circle and finding the plane of the best image in lens, *Asian Basic and Applied Research Journal*, 2019, no. 1(1), pp. 14–20, Article no. ABAARJ.96. URL: <https://www.globalpresshub.com/index.php/ABAARJ/article/view/741> (дата обращения: 04.10.2022).
6. Колпаков А. И., Райцин А. М., Улановский М. В. Прослеживаемость измерений энергетических параметров лазерного пучка // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 35–40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-35-40>
7. Райцин А. М., Фроловичев С. М. Условия корректных измерений характеристик лазерного пучка, основанных на определении начальных моментов пространственного распределения интенсивности // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 410–418. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_05_410
8. Райцин А. М., Улановский М. В. Методология корректных измерений пространственно-энергетических характеристик лазерных пучков // Метрология. 2021. № 2. С. 4–19.
9. Шульга А. А. Калиброванный ослабитель лазерного излучения // Сборник трудов XIII Международной конференции

«Прикладная оптика-2018». Санкт-Петербург, 19–21 декабря 2018. Т. 2. С. 34–39.

10. Кувалдин Э. В., Шульга А. А. Калибровка измерителей мощности оптического излучения в широких пределах // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 12. С. 15–20. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-12-15-20>

References

1. Leonov M. B., *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, iss. 5, pp. 268–272. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000268>
2. Merlemis N., Kesidis A. L., Sianoudis I., *European Journal of Physics*, 2020, vol. 42, no. 1, 015304. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/abba01>
3. Hedan S., Pop O., Valle V., Cottton M., *Strain*, 2011, vol. 47, no. 1, pp. e142–e147. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00594.x>
4. Grjaznov M. I., Obobshhjonnye parametry nepreryvnogo izlucheniya [Generalized parameters of continuous radiation], in book *Impul'snaja fotometrija*, Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985, vol. 9, pp. 26–29. (In Russ.)
5. Kirgetov M. V., Kuvaldin E. V., Method of automatic measurement equivalent diameter of scattering circle and finding the plane of the best image in lens, *Asian Basic and Applied Research Journal*, 2019, no. 1(1), pp. 14–20, Article no. ABAARJ.96, available at: <https://www.globalpresshub.com/index.php/ABAARJ/article/view/741> (accessed: 04.10.2022).
6. Kolpakov A. I., Raitsin A. M., Ulanovskii M. V., *Measurement Techniques*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 38–45. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02044-1>
7. Rajcin A. M., Frolovichev S. M., *Radiophys Quantum El*, 2021, vol. 64, pp. 370–377. <https://doi.org/10.1007/s11141-022-10139-62021>
8. Raitsin A. M., Ulanovskii M. V., *Measurement Techniques*, 2022, vol. 64, no. 6, pp. 433–439. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01951-z>
9. Shul'ga A. A., Kalibrovannyj oslabitel' lazernogo izlucheniya [Calibrated laser radiation attenuator], *Proceedings of the XIII International Conference "Applied Optics-2018"*, St. Peterburg, Russia, December 19–21, 2018, vol. 2, pp. 34–39. (In Russ.)
10. Kuvaldin E. V., Shulga A. A., *Journal of Optical Technology*, 2019, vol. 86, iss. 12, pp. 758–762. <https://doi.org/10.1364/jot.86.000758>

Статья поступила в редакцию 07.02.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 16.06.2022.
The article was submitted 07.02.2022; approved after 15.06.2022; accepted for publication 16.06.2022.