

Обеспечение единства измерений пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения

А. Г. Максак¹, И. В. Козак¹, А. В. Плотников¹, А. М. Райцин², М. В. Улановский², К. Ш. Абдрахманов²

¹Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации, Мытищи, Россия, e-mail: 32gnii@mail.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: vniiofi@vniiofi.ru

Рассмотрены состав и принцип построения эталона пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения, перечислены решаемые с его помощью задачи. Приведены результаты измерений пространственно-энергетических характеристик (ширины пучка, угла расходимости, координат центроида) импульсного лазерного излучения. Оценены погрешности передачи единиц ширины и угла расходимости лазерного пучка, а также суммарная погрешность эталона.

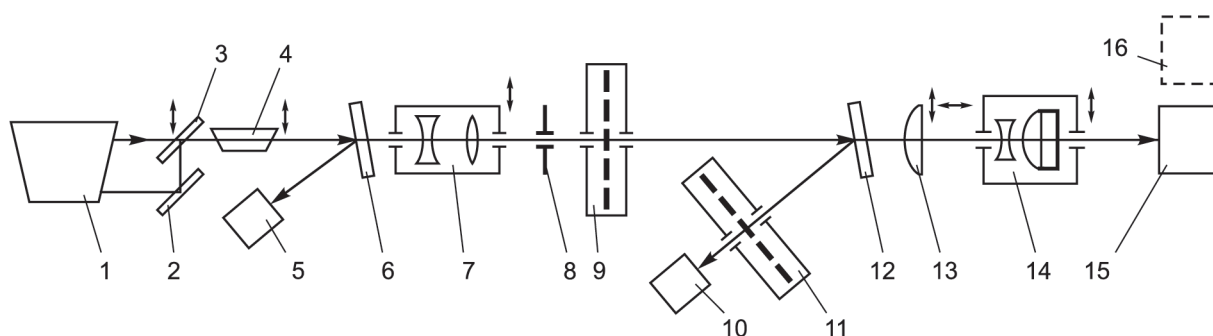
Ключевые слова: лазерное излучение, эталон, пространственно-энергетические характеристики.

В настоящее время широко распространены импульсные твёрдотельные и волоконные лазеры, а также системы на их основе. Для этих устройств необходимо количественно оценивать пространственно-энергетические характеристики импульсного лазерного излучения. Такое излучение характеризуется, в первую очередь, концентрацией интенсивности излучения в возможно меньшем телесном угле и параметрами диаграммы направленности, в том числе стабильностью её позиционирования [1, 2]. В настоящее время эталонная база не позволяет осуществлять воспроизведение, хранение и передачу единицы ширины и угла расходимости пучка импульсного лазерного излучения [3], что осложняет метрологическое обеспечение существующих и перспективных лазерных систем траекторных измерений.

Для решения указанной проблемы во ВНИИОФИ разработан и изготовлен государственный эталон пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения, предназначенный для воспроизведения, хранения и передачи единиц ширины и угла расходимости лазерного пучка вторичным и рабочим эталонам пространственно-энергетических характеристик.

Эталон состоит из стационарного и транспортируемого комплектов. Стационарный комплект обеспечивает аттестацию вторичных и рабочих эталонов на месте эксплуатации эталона и содержит наносекундный лазерный источник, по ходу излучения которого установлены: аттенуатор (для обеспечения поверки в различных точках динамического диапазона); диафрагма; имитатор угла расходимости лазерного пучка; эталонный и контрольный матричные измерительные преобразователи лазерного излучения (соответственно МЭП и МКП); светоделительная пластина; контрольное средство измерений (СИ) энергии. Аттестуемый вторичный или рабочий эталон устанавливается на место МЭП в соответствии с алгоритмом поверки. Элементы эталона связаны с компьютером. Аттестация осуществляется методом последовательных измерений ширины и угла расходимости лазерного пучка с использованием МЭП и преобразователя аттестуемого эталона, в результате чего определяются его метрологические характеристики.

Транспортируемый комплект эталона обеспечивает поверку СИ на местах эксплуатации лазерных систем с помощью МЭП и МКП.



Оптическая схема эталона пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения:

1, 4 – соответственно наносекундный и юстировочный лазеры; 2, 3 – соответственно поворотное и подвижное зеркала; 5 – контрольное СИ энергии; 6, 12 – светоделители; 7 – имитатор угла расходимости лазерного излучения; 8 – диафрагма; 9 – ослабитель; 10 – матричный контрольный преобразователь излучения; 11 – ослабитель; 13 – формирующее оптическое устройство; 14 – фотометрическое устройство; 15 – матричный эталонный измерительный преобразователь лазерного излучения; 16 –веряемое СИ

Принцип действия и оптическая схема аппаратуры измерений ширины и угла расходимости лазерного пучка лазерного излучения. Основным элементом указанной аппаратуры – МЭП. Этот преобразователь является СИ относительного распределения плотности энергии импульсов лазерного излучения на базе ПЗС-матрицы (ПЗС – прибор с зарядовой связью). На рисунке представлена оптическая схема эталона, построенная на основе МЭП.

Излучение от наносекундного лазера 1 поступает на светоделительную пластину 6 и разделяется на два канала. В основном канале излучение ослабляется и направляется на светоделитель 12, который делит излучение основного канала на два равнозначных канала. С помощью МКП 10 определяется контрольное значение ширины лазерного пучка в первом канале. Из второго канала излучение направляется на оптическую систему 13, формирующую перетяжку. С применением МЭП 15 определяется ширина пучка лазерного излучения в зоне перетяжки. Для первоначальной калибровки МЭП применяется фотометрическое устройство 14, формирующее равномерное распределение интенсивности лазерного излучения в выходном окне. С помощью имитатора угла расходимости лазерного излучения 7 обеспечивается диапазон угла расходимости 0,5–1,2 мрад. Возможное изменение энергии излучения лазера 1 от импульса к импульсу контролируется по показаниям контрольного СИ энергии 5. После определения ширины пучка МКП и МЭП вычисляется их соотношение (коэффициент α). Затем на место МЭП устанавливается поверяемое СИ. Для обеспечения работы эталона на длине волны 1,064 мкм в оптический тракт вводится подвижное зеркало 3.

Использование матричного преобразователя на базе ПЗС-матрицы позволяет добиться высокого пространственного разрешения системы и уменьшить таким образом погрешность определения моментов распределения плотности энергии и погрешность установки. Возможность измерять в течение каждого импульса повышает точность эталона. Высокое пространственное разрешение матрицы, а также значительное эквивалентное фокусное расстояние оптической системы, формирующей дальнюю зону, линейность и низкие значения коэффициентов взаимовлияния каналов современных ПЗС-матриц позволяют измерять наиболее сложный параметр (угол расходимости) в диапазоне угловых секунд.

Работа на эталоне осуществляется в два этапа: калибровка МЭП, МКП и светоделителей; проверка рабочего (вторичного) эталона или СИ пространственно-энергетических характеристик при реальном распределении излучения лазера эталона в дальней зоне излучения.

Ширина d_{01} пучка импульсного лазерного излучения в дальней зоне на входе МЭП определяется методом вторых моментов распределения Вигнера [1] с использованием полученного значения относительного распределения плотности энергии $H_g(x, y)$:

$$d_{01}^x = 2 \left[M_{20} + M_{02} + \text{sgn}(M_{20} - M_{02}) \times \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2} \right]^{1/2};$$

$$d_{01}^y = 2 \left[M_{20} + M_{02} - \text{sgn}(M_{20} - M_{02}) \times \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2} \right]^{1/2},$$

где d_{01}^x, d_{01}^y – протяжённости распределения плотности энергии в поперечном сечении пучка МЭП по осям x, y соответственно; M_{20}, M_{02} – центрированные моменты второго порядка распределения плотности энергии в поперечном сечении пучка по осям x, y соответственно; M_{11} – смешанный момент второго порядка распределения плотности энергии в поперечном сечении пучка.

Одновременно с измерением распределения $H_g(x, y)$ измеряется выходной сигнал $H_k(x, y)$ преобразователя МКП и вычисляется протяжённость d_{k1} распределения плотности энергии в поперечном сечении пучка МКП, а также отношение ширин пучка, полученных на МЭП и МКП в момент времени t_1 (коэффициент α_1) по формуле

$$\alpha_1 = d_{01}/d_{k1}.$$

Затем вместо МЭП в оптический тракт эталона устанавливается преобразователь поверяемого СИ, передаётся единица ширины пучка импульсного лазерного излучения, измеряются показания преобразователя поверяемого СИ и МКП (значения ширины d_{c1} и d_{k2}). Далее вычисляется соотношение ширин пучка, полученных на МЭП и МКП в момент времени t_2 (коэффициент α_2):

$$\alpha_2 = d_{c1}/d_{k2}.$$

Погрешность поверяемого СИ определяется как

$$\alpha_{\text{СИ}} = |\alpha_1 - \alpha_2|/\alpha_1.$$

Угол Θ_{01} расходимости лазерного пучка на входе МЭП находят с учётом измеренной ширины лазерного пучка и фокусного расстояния f оптической системы, формирующей дальнюю зону:

$$\Theta_{01} = d_{01}/f.$$

Одновременно с измерением угла Θ_{01} измеряется выходной сигнал преобразователя МКП и вычисляются значения d_{k1} и соотношение угла расходимости пучка и ширины пучка, полученных на МЭП и МКП в момент времени t_1 (коэффициент β_1):

$$\beta_1 = \Theta_{01}/d_{k1}.$$

Затем на место МЭП в оптический тракт эталона устанавливается преобразователь поверяемого СИ. Во время передачи единицы угла расходимости импульсного лазерного излучения измеряются показания поверяемого СИ Θ_{c1} , МКП d_{k2} и вычисляется соотношение угла расходимости пучка и ширины пучка, полученных на МЭП и МКП в момент времени t_2 (коэффициент β_2):

$$\beta_2 = \Theta_{c1}/d_{k2}.$$

Погрешность поверяемого СИ определяется по формуле

$$\beta_{\text{СИ}} = |\beta_1 - \beta_2| / \beta_1.$$

Использование источников лазерного излучения, МЭП, МКП, фотометрического устройства, гарантирующих работу в динамическом диапазоне измерений относительного распределения плотности энергии $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2}$ Дж/см², разработка алгоритмов воспроизведения единицы и обработки результатов наблюдений позволили получить неоднородность распределения плотности энергии в поперечном сечении лазерного пучка на уровне 0,5 %. Достичь такой низкой неоднородности удалось в результате применения описанной выше оптической системы и фотометрического устройства в виде диффузно-пропускающего линзового элемента и диффузно-отражающего цилиндра, в выходной плоскости которого формируется однородное относительное распределение плотности энергии.

Указанный динамический диапазон измерений относительного распределения плотности энергии по уровням распределения 0,1; 0,5; 0,865; 0,9 отн. ед. оптимален для передачи единиц ширины и угла расходимости.

Метрологические характеристики эталона и определение его погрешности. Суммарная погрешность эталона пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения включает погрешности преобразователей МЭП и МКП и погрешности принятого способа передачи единиц ширины и угла расходимости лазерного пучка. При поверке СИ реализуется метод непосредственного сличения [3], а в состав эталона входит средство контроля ширины пучка импульсного лазерного излучения – МКП. В процессе поверки ширина пучка импульсного излучения одновременно измеряется сначала с помощью СИ с эталонным ($d_{\text{э1}}$) и контрольным ($d_{\text{к1}}$) преобразователями, а затем одновременно с использованием поверяемого СИ ($d_{\text{СИ}}$) и МКП ($d_{\text{к2}}$).

Суммарная погрешность $S_{\text{вд}}^{\text{СТ}}$ воспроизведения единицы ширины лазерного пучка стационарного комплекта эталона рассчитывается как

$$S_{\text{вд}}^{\text{СТ}} = 1,4 \left[\left(\theta_{\text{д1}}^2 + \theta_{\text{д2}}^2 + \theta_{\text{АЦП}}^2 + \theta_{\text{вз}}^2 + \theta_{\text{нл}}^2 + \theta_{\text{нр}}^2 \right) / 3 + \sigma_{\text{д2}}^2 + \sigma_{\text{нл}}^2 + \sigma_{\text{нр}}^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\theta_{\text{д1}}$, $\theta_{\text{д2}}$, $\theta_{\text{АЦП}}$ – неисключённые составляющие погрешности (НСП), обусловленные погрешностями соответственно геометрии ПЗС-матрицы, метода определения ширины лазерного пучка, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в составе МЭП; $\theta_{\text{вз}}$, $\theta_{\text{нл}}$, $\theta_{\text{нр}}$ – НСП, связанные соответственно с взаимовлиянием измерительных каналов МЭП, нелинейностью каналов МЭП и неравномерностью относительного распределения плотности энергии на выходе фотометрического устройства; $\sigma_{\text{д2}}$, $\sigma_{\text{нл}}$, $\sigma_{\text{нр}}$ – средние квадратические отклонения (СКО) результатов измерений соответственно ширины лазерного пучка методом интегрирования, линейности каналов МЭП и неравномерности относительного распределения плотности энергии на выходе фотометрического устройства.

По результатам экспериментальных исследований получены значения (в процентах) составляющих суммарной погрешности воспроизведения единицы ширины лазерного пучка: $\theta_{\text{д1}}=0,28$; $\theta_{\text{д2}}=0,11$; $\theta_{\text{АЦП}}=0,05$; $\theta_{\text{вз}}=1,0$; $\theta_{\text{нл}}=0,45$; $\theta_{\text{нр}}=0,59$; $\sigma_{\text{д2}}=0,24$; $\sigma_{\text{нл}}=0,13$; $\sigma_{\text{нр}}=0,2$. Рассчитанная погрешность $S_{\text{вд}}^{\text{СТ}}=1,15$ %.

Погрешность $S_{\text{нд}}^{\text{СТ}}$ передачи единицы ширины лазерного пучка стационарным комплектом эталона определяется по формуле

$$S_{\text{нд}}^{\text{СТ}} = \sqrt{(\sigma_{\text{эд}}^{\text{СТ}})^2 + (\sigma_{\text{кд}}^{\text{СТ}})^2};$$

$$\sigma_{\text{э(к)д}}^{\text{СТ}} = \frac{1}{A_d} 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{A}_d - A_d^i)^2 / [n(n-1)]},$$

где $\sigma_{\text{эд}}^{\text{СТ}}$, $\sigma_{\text{кд}}^{\text{СТ}}$ – максимальные значения СКО отношения показаний МЭП и МКП, определяемые за время $t \geq 5$ мин передачи единицы ширины лазерного пучка; $n=5 \dots 7$ – число наблюдений; $\bar{A}_d = \bar{d}_k / \bar{d}_\text{э}$; $A_d^i = d_k^i / d_\text{э}^i$; $\bar{d}_k$, $\bar{d}_\text{э}$, d_k^i , $d_\text{э}^i$ – средние и i -е показания МКП и МЭП соответственно.

По результатам исследований установлено, что погрешность $S_{\text{нд}}^{\text{СТ}}$ передачи единицы ширины лазерного пучка стационарным комплектом эталона не превышает 0,27 %.

Суммарная погрешность $S_{\text{в\theta}}^{\text{СТ}}$ воспроизведения единицы угла расходимости лазерного пучка стационарного комплекта эталона рассчитывается как

$$S_{\text{в\theta}}^{\text{СТ}} = 1,4 \left[\frac{\theta_{\text{д1}}^2 + \theta_{\text{д2}}^2 + \theta_{\text{АЦП}}^2 + \theta_{\text{вз}}^2 + \theta_{\text{нл}}^2 + \theta_{\text{нр}}^2 + \theta_{\text{п}}^2 + \theta_{\text{ф}}^2}{3} + \sigma_{\text{д2}}^2 + \sigma_{\text{нл}}^2 + \sigma_{\text{нр}}^2 + \sigma_{\text{п}}^2 \right]^{1/2},$$

где $\theta_{\text{п}}$, $\theta_{\text{ф}}$ – НСП, связанные с определением расстояния до плоскости перетяжки лазерного пучка и неточностью определения фокусного расстояния формирующего оптического устройства; $\sigma_{\text{п}}$ – СКО результата измерений расстояния до плоскости перетяжки лазерного пучка.

Экспериментально получены значения (в процентах) составляющих суммарной погрешности воспроизведения единицы угла расходимости лазерного пучка: $\theta_{\text{п}}=0,16$; $\theta_{\text{ф}}=0,15$; $\sigma_{\text{п}}=0,12$. Остальные составляющие имеют те же значения, что и при вычислении суммарной погрешности воспроизведения единицы ширины лазерного пучка. Рассчитанная погрешность $S_{\text{в\theta}}^{\text{СТ}}=1,16$ %.

Погрешность $S_{\text{п\theta}}^{\text{СТ}}$ передачи единицы угла расходимости лазерного пучка стационарным комплектом эталона определяется по выражению

$$S_{\text{п\theta}}^{\text{СТ}} = \sqrt{(\sigma_{\text{э\theta}}^{\text{СТ}})^2 + (\sigma_{\text{к\theta}}^{\text{СТ}})^2};$$

$$\sigma_{\text{э(к)\theta}}^{\text{СТ}} = \frac{1}{A_\theta} 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{A}_\theta - A_\theta^i)^2 / [n(n-1)]},$$

где $\sigma_{\text{э\theta}}^{\text{СТ}}$, $\sigma_{\text{к\theta}}^{\text{СТ}}$ – максимальные значения СКО отношения показаний МЭП и МКП, определяемые за время $t \geq 5$ мин передачи единицы угла расходимости лазерного пучка; $n=5 \dots 7$ – число

наблюдений; $\bar{A}_\Theta = \bar{d}_\kappa / \bar{\Theta}_\Theta$; $A_\Theta^i = d_\kappa^i / \Theta_\Theta^i$; $\bar{\Theta}_\Theta$, Θ_Θ^i – среднее и i -е значения показаний МЭП.

По результатам исследований установлено, что погрешность S_{Θ}^{CT} передачи единицы угла расходимости лазерного пучка стационарным комплектом эталона не превышает 0,37 %.

Суммарная погрешность S_{Θ}^{TP} воспроизведения единицы ширины лазерного пучка транспортируемого комплекта эталона. Экспериментально полученные составляющие этой погрешности имеют те же значения, что и при расчёте суммарной погрешности S_{Θ}^{CT} воспроизведения единицы ширины лазерного пучка стационарного комплекта эталона, а погрешность вычисляется по формуле (1), т. е. $S_{\Theta}^{\text{TP}} = S_{\Theta}^{\text{CT}} = 1,15$ %.

Погрешность S_{Θ}^{TP} передачи единицы ширины лазерного пучка транспортируемым комплектом эталона рассчитывается как

$$S_{\Theta}^{\text{TP}} = \sqrt{(\sigma_{\Theta}^{\text{TP}})^2 + (\sigma_{\kappa}^{\text{TP}})^2};$$

$$\sigma_{\Theta(\kappa)}^{\text{TP}} = \frac{1}{A_d} 100 \sqrt{\sum_1^n (\bar{A}_d - A_d^i)^2 / [n(n-1)]},$$

где $\sigma_{\Theta}^{\text{TP}}$, $\sigma_{\kappa}^{\text{TP}}$ – максимальные значения СКО отношения показаний МЭП и МКП, определяемые за время $t \geq 5$ мин передачи единицы ширины лазерного пучка.

По результатам исследований установлено, что погрешность S_{Θ}^{TP} передачи единицы ширины лазерного пучка транспортируемым комплектом эталона не превышает 0,3 %.

Таким образом, решена задача обеспечения единства измерений пространственно-энергетических характеристик импульсного лазерного излучения при проведении испытаний, оценке характеристик СИ, аттестации рабочих эталонов и поверке СИ пространственно-энергетических характеристик.

Работа выполнена с применением оборудования Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ВНИИОФИ и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 14.595.21.0003 от 28 августа 2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Ч. 1. Стигматические (гомоцентрические) и слабоастигматические пучки.
2. ГОСТ Р ИСО 13694-2010. Оптика и оптические приборы. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений распределения плотности мощности (энергии) лазерного пучка.
3. Абдрахманов К. Ш., Улановский М. В. Установка для измерений параметров качества короткоимпульсного лазерного пучка // Измерительная техника. 2010. № 7. С. 13–16.

Дата принятия: 23.07.2018.

Ensuring the uniformity of measurements of space-energy characteristics of pulsed laser radiation

A. G. Maksak¹, I. V. Kozak¹, A. V. Plotnikov¹, A. M. Raitsin², M. V. Ulanovskii², K. Sh. Abdrakhmanov²

¹Main Scientific Metrological Center, Ministry of Defense of the Russian Federation, Mytishchi, Russia, e-mail: 32gnii@mail.ru

²The All-Russia Research Institute of Optophysical Measurements, Moscow, Russia, e-mail: vniiofi@vniiofi.ru

The composition and the principle of construction of the standard of the spatially-energy characteristics of pulsed laser radiation are considered, the problems solved with its help are listed. The results of measurements of the spatially-energy characteristics of laser pulses are presented and the components of the standard error are estimated.

Key words: laser radiation, standard, spatially-energy characteristics.