

УДК 535.42, 535.51
EDN: XDPAWH

PACS: 03.65.Nk

Экспериментальная оценка качества лазерного излучения в методе дифференциального рассеяния

© Д. Г. Денисов

*МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005 Россия
E-mail: denisov_dg@mail.ru**Статья поступила в редакцию 2.12.2024; после доработки 26.12.2024; принята к публикации 7.04.2025
Шифр научной специальности: 2.2.6*

Исследовано и экспериментально проанализировано влияние линзовой и зеркальной оптических схем канала подсвета макетного образца оптико-электронной системы для измерения параметров шероховатости ангстремного уровня оптических поверхностей на качество лазерного излучения. На основе разработанного макетного образца с применением линзовой и зеркальной оптических систем дана количественная оценка таким показателям качества лазерного излучения как M^2 -параметру и функции контраста спекл-структуры в сечении его энергетического профиля. В результате представленного сравнительного анализа влияния двух оптических систем канала подсвета макетного образца на достижимые показатели качества лазерного излучения, сделаны рекомендации о целесообразности применения линзовой оптической системы в канале подсвета с точки зрения минимальной погрешности проводимых измерений.

Ключевые слова: линзовая и зеркальная оптические системы; M^2 -параметр; контраст спекл-структуры; энергетический профиль лазерного пучка; лазерное излучения; метод дифференциального рассеяния.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-2-5-11

Введение

В ранее опубликованных научных результатах [1–4] были рассмотрены основные научные положения метода дифференциального рассеяния для контроля качества оптических поверхностей. В работах [1, 2] было показано влияние ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния при контроле оптических поверхностей ангстремного уровня. Важно отметить и необходимость в формировании качественного лазерного излучения [5] в первую очередь в плоскости контролируемой оптической поверхности, поскольку наличие дополнительных флуктуаций интенсивности в энергетическом профиле лазерного пучка может приводить к формированию спекл шума в регистри-

руемой индикатрисе рассеяния [1–8]. Таким образом, при разработке метода контроля шероховатости оптических поверхностей ангстремного уровня аспекты, связанные с качеством пятна подсвета лазерного излучения, формируемого в плоскости контролируемой детали (латеральной области) являются важными и актуальными.

Основная часть

В качестве исследуемых выходных характеристик лазерного излучения, формируемого линзовой и зеркальной оптическими системами в плоскости исследуемой оптической поверхности, были проанализированы следующие количественные показатели [1, 5] (см. табл. 1).

Таблица 1

Перечень основных анализируемых характеристик лазерного излучения, формируемого каналом подсвета на основе линзовой и зеркальной оптических систем, разработанного макетного образца

№	Наименование параметра	Наилучшие значения характеристики
1	Функция контраста спекл – структуры в сечении энергетического профиля лазерного пучка – C_s , отн. ед. $C_s = \frac{\sigma_I}{I}$, σ_I – среднеквадратическое значение флуктуаций интенсивности в видеоизображении распределения энергетического профиля лазерного пучка, I – среднее значение интенсивности в видеоизображении распределения энергетического профиля лазерного пучка	$< 0,5$
2	Параметр качества лазерного пучка, отн. ед. $M^2 = \frac{\pi \cdot \theta_{\text{реал}} \cdot D_{\text{реал}}}{4 \cdot \lambda} = \frac{\pi \cdot D_{\text{реал}}^2}{4 \cdot \lambda \cdot z_k}$ $\theta_{\text{реал}}$ – расходимость реального лазерного пучка; $D_{\text{реал}}$ – диаметр в сечении перетяжки реального лазерного пучка; z_k – параметр конфокальности (длина ближней зоны) лазерного пучка; λ – длина волны лазерного излучения	$1 \leq M^2 \leq 1,2$

С целью проведения исследований по оценке характеристик, представленных в таблице 1, формируемого оптического излучения каналом подсвета в методе дифференциального рассеяния, был разработан макетный образец с возможностью модификации канала подсвета при установке как линзовой, так и зеркальной оптической систем, предварительно рас-

считанных в системе автоматизированного проектирования «Zemax».

Разработанные функциональные схемы двух вариантов канала подсвета макетного образца на основе линзовой и зеркальной оптических систем представлены на рисунках 1 и 2, соответственно.

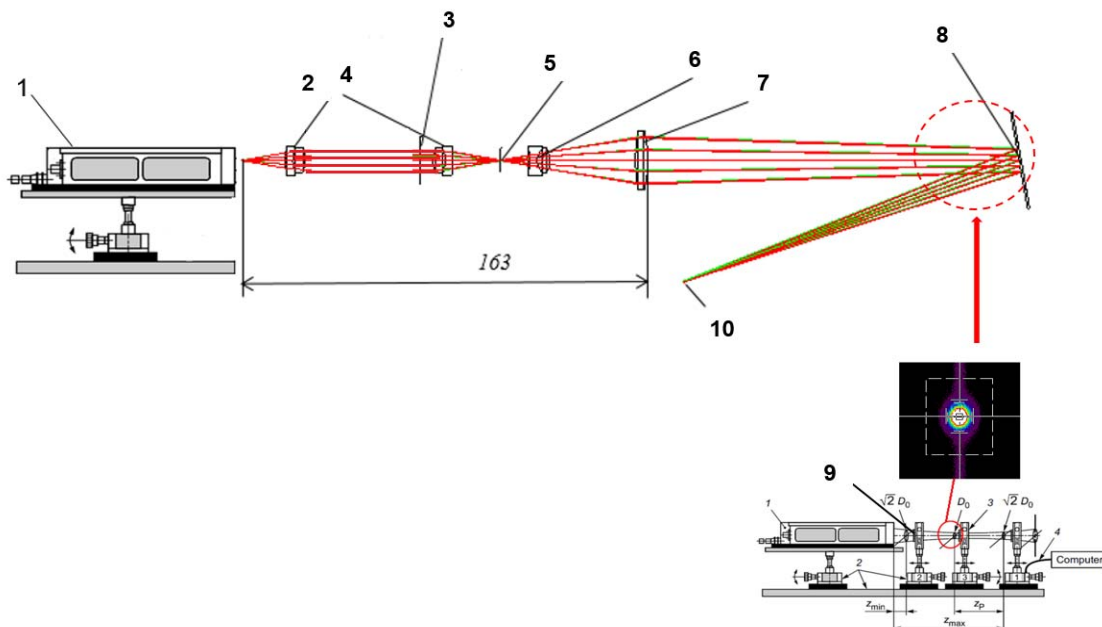


Рис. 1. Функциональная оптическая схема макетного образца оптико-электронного прибора с каналом подсвета на основе линзовой оптической системы: 1 – лазерный источник излучения; 2, 4, 6, 7 – объективы линзовой оптической системы; 3 – диафрагма; 4 – микродиафрагма; 8 – поверхность контролируемой оптической детали; 9 – M^2 -датчика с применением методики измерения параметра конфокальности; 10 – плоскость анализа рассеянного лазерного излучения (плоскость фотоприёмного устройства – фотоэлектронного умножителя)

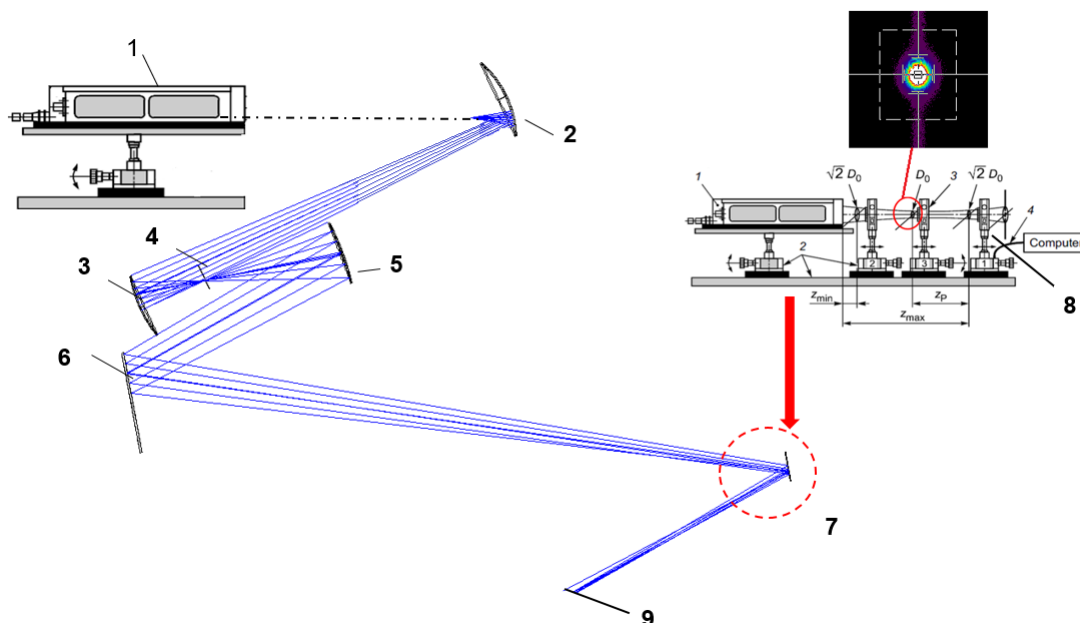


Рис. 2. Функциональная оптическая схема макетного образца опико-электронного прибора с каналом подсвета на основе зеркальной оптической системы: 1 – лазерный источник излучения; 2 ($R_3 = 40$ мм; $D_3 = 32$ мм) – сферическое зеркало; 3 ($R_3 = 50$ мм; $D_3 = 25,4$ мм) – сферическое зеркало, 4 – микродиафрагма, 5 ($R_3 = 100$; $D_3 = 25,4$) – сферическое зеркало, 6 ($R_3 = \infty$; $D_3 = 25,4$) – плоское зеркало; 7 – поверхность контролируемой оптической детали; 8 – M^2 -датчика с применением методики измерения параметра конофокальности; 9 – плоскость анализа рассеянного лазерного излучения (плоскость фотоприёмного устройства – фотоэлектронного умножителя)

При разработке макетного образца, согласно представленным на рисунках 1 и 2 функциональным оптическим схемам, в качестве источников лазерного излучения было проанализировано 5 лазеров, среди которых рассматривались газовые лазеры на основе He-Ne активной среды, основные линии генерации которых: 6328 нм, 6120 нм, 543,5 нм, 632 нм, а также твердотельный лазер на основе YAG-Nd на длине волны генерации 473 нм.

В результате сравнительного анализа состояния стабильности количественных энергетических показателей и характеристик в качестве источника излучения для проведения сравнительного анализа схем оптических был выбран лазер на длине волны генерации 473 нм, как самый стабильный с одной стороны и генерирующий на наиболее короткой длине волны с другой стороны, что немаловажно при оценке флуктуаций интенсивности в энергетическом профиле.

Изначально проводилось измерение исходного качества лазерного пучка твердотельного лазерного источника на основе активной среды и матрицы – YAG:Nd, согласно методике представленной в ранее опубликованной работе автора с применением M^2 -датчика [5].

Согласно европейскому стандарту ISO 11146-1-2005 для оценки качества лазерного излучения, сформированного устойчивым резонатором, введены такие оценочные параметры, как фактор распространения – К и M^2 -фактор. Последний характеризует отличие структуры реального лазерного пучка от идеальной модовой структуры TEM_{00} [5] и определяется, как отношение угловой расходимости реального лазерного пучка к угловой расходимости идеального (или дифракционного) лазерного пучка. Согласно представленной методике [5] было проведено измерение качества исходного лазерного пучка до оптической системы. С этой целью было проведено измерение минимального сечения пучка лазерного источника при помощи M^2 -датчика, которое, как показал эксперимент находится для заданного лазера на выходном частично-прозрачном зеркале, что свидетельствует о плоско-сферическом – устойчивом резонатора. Далее M^2 -датчик перемещался относительно зарегистрированного минимального сечения лазерного пучка на расстояние, на котором это сечение увеличивалось в $\sqrt{2}$, что соответствует положению зеркала эквивалентного конфокального резонатора [5]. Из-

меренное расстояние фиксировалось и принималось за параметр конфокальности лазерного пучка или величину характеризующую его ближнюю зону или параметр Рэля (см. рис. 3).

При анализе исходного лазерного пучка и пучков после прохождения линзовой и зеркальной оптических систем фиксировались распределения энергетического профиля лазерного пучка с характерными флуктуациями интенсивности, определяемыми статистическими значениями (см. табл. 1):

σ_I – среднеквадратическим значением флуктуаций интенсивности в видеоизображении распределения энергетического профиля лазерного пучка, Вт;

I – средним значением интенсивности в видеоизображении распределения энергетического профиля лазерного пучка, Вт;

$C_s = \frac{\sigma_I}{I}$ – функцией контраста спекл-структуры в сечении энергетического профиля лазерного пучка – C_s , отн. ед.

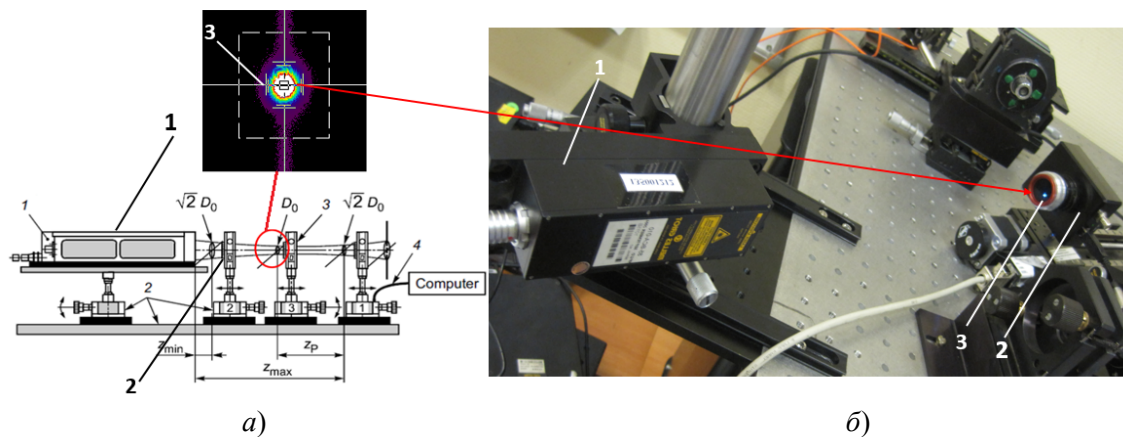


Рис. 3. К методике проведения измерения исходного распределения интенсивности в энергетическом профиле лазерного Гауссова пучка: 1 – твердотельный лазерный источник на длине волны 473 нм; 2 – M^2 -датчик; 3 – зарегистрированное распределения интенсивности в энергетическом профиле лазерного пучка. а) – последовательность итерационных измерений параметра качества лазерного Гауссова пучка; б) – фотография внешнего вида стенда для измерения исходных параметров лазерного гауссова пучка

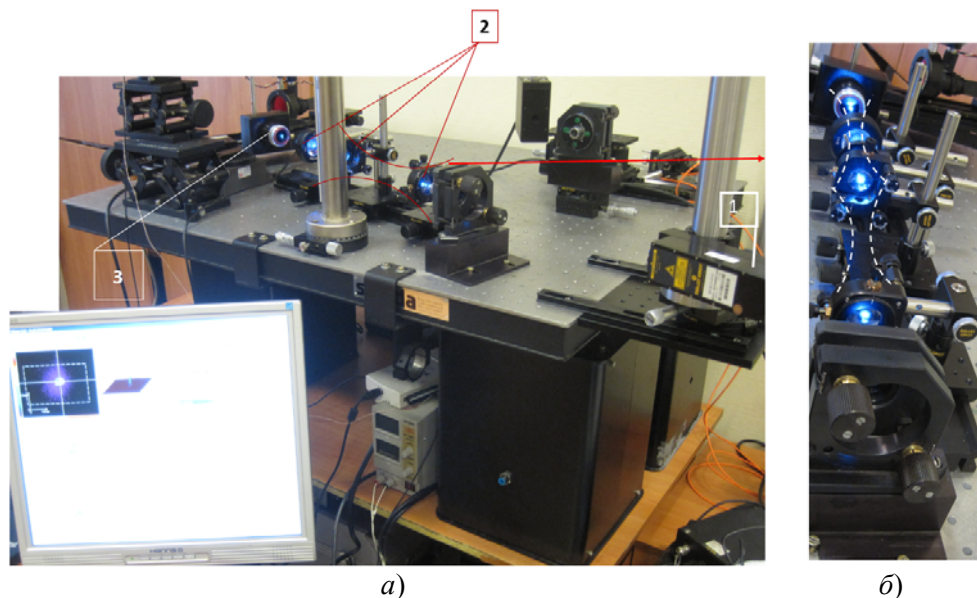


Рис. 4. Фотография внешнего вида стенда для измерения параметра качества и статистических значений флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через линзовую оптическую систему: 1 – лазерный источник излучения; 2 – объективы линзовой оптической системы; 3 – M^2 -датчика с применением методики измерения параметра конфокальности; а) – фотография вида всего измерительного стенда; б) – фотография вида линзовой оптической системы и условное преобразование лазерного пучка через её оптические элементы до M^2 -датчика

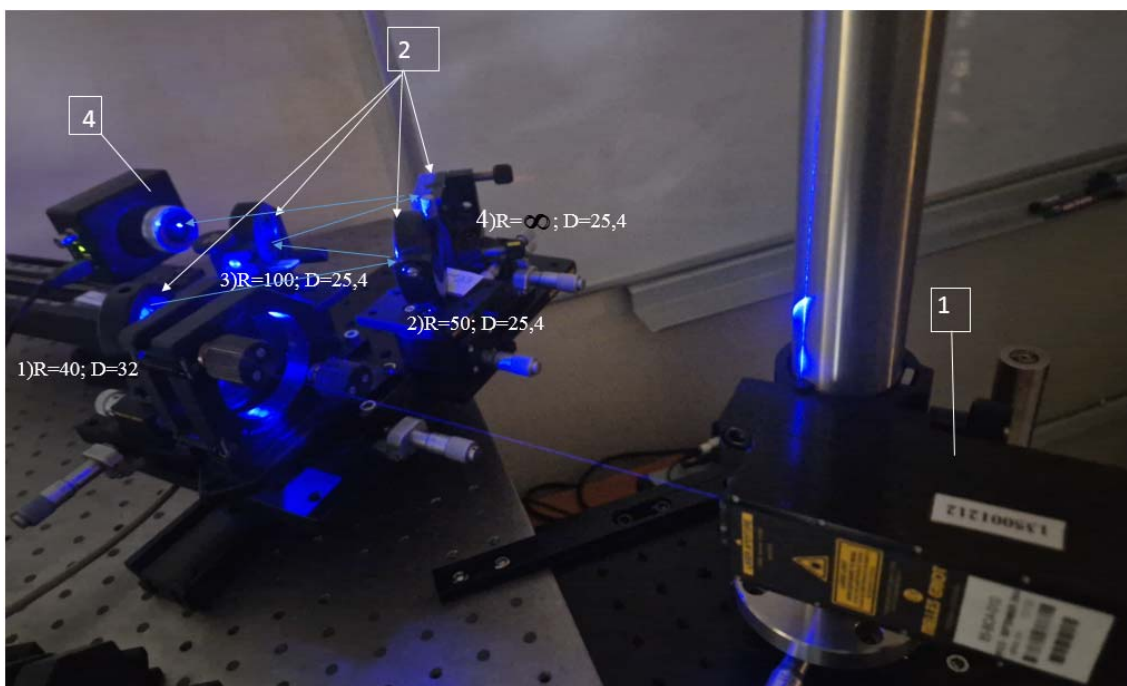


Рис. 5. Фотография внешнего вида стенда для измерения параметра качества и статистических значений флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через зеркальную оптическую систему: 1 – лазерный источник излучения; 2 – зеркала оптической системы; 3 – M^2 -датчика с применением методики измерения параметра конофокальности

На основе разработанных функциональных оптических систем макетного образца с каналом подсвета на основе линзовой (см. рис. 1) и зеркальной (см. рис. 2) оптических схем были разработаны соответствующие измерительные стенды (см. рис. 4, 5).

На рисунке 4 показан внешний вид стенда для измерения параметра качества и статистических значений флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через линзовую оптическую систему.

На рисунке 5 показан внешний вид стенда для измерения параметра качества и статистических значений флуктуаций интенсивности лазерного излучения, прошедшего через зеркальную оптическую систему.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований при прохождении оптического тракта линзовой и зеркальной оптических систем, изображенных на рисунках 4 и 5 были проведены измерения распределения интенсивности в энергетическом профиле лазерного пучка и дана оценка его качества, согласно представленным в таблице 1 параметрам. Результаты проведенных экспериментальных

исследований представлены на рисунке 6 и в таблице 2.

На основе проведенных полученных экспериментальных данных представлен сравнительный анализ характеристик лазерного излучения, прошедшего линзовую и зеркальную оптические системы (см. табл. 2).

Таким образом проведенный экспериментальный сравнительный анализ характеристик лазерного излучения, сформированного оптическими системами, представленный в таблице 2 показывает, что линзовая оптическая система является более предпочтительной с точки зрения минимального уровня контраста спекл-структуры (спекл-шума) в сечении энергетического профиля лазерного пучка. Данный аргумент является важным при взаимодействии лазерного излучения с рассеивающей оптической поверхностью, имеющей ангстремный уровень шероховатости, формирующий малоинтенсивное рассеянное информативное лазерное излучение. Вторым ключевым критерием, определяющим целесообразность применения линзовой оптической системы, служит параметр качества лазерного пучка, обеспечивающий необходимый геометрический размер латеральной области (области подсветки) контролируемой оптической детали и заданную энергетику в пятне подсвета.

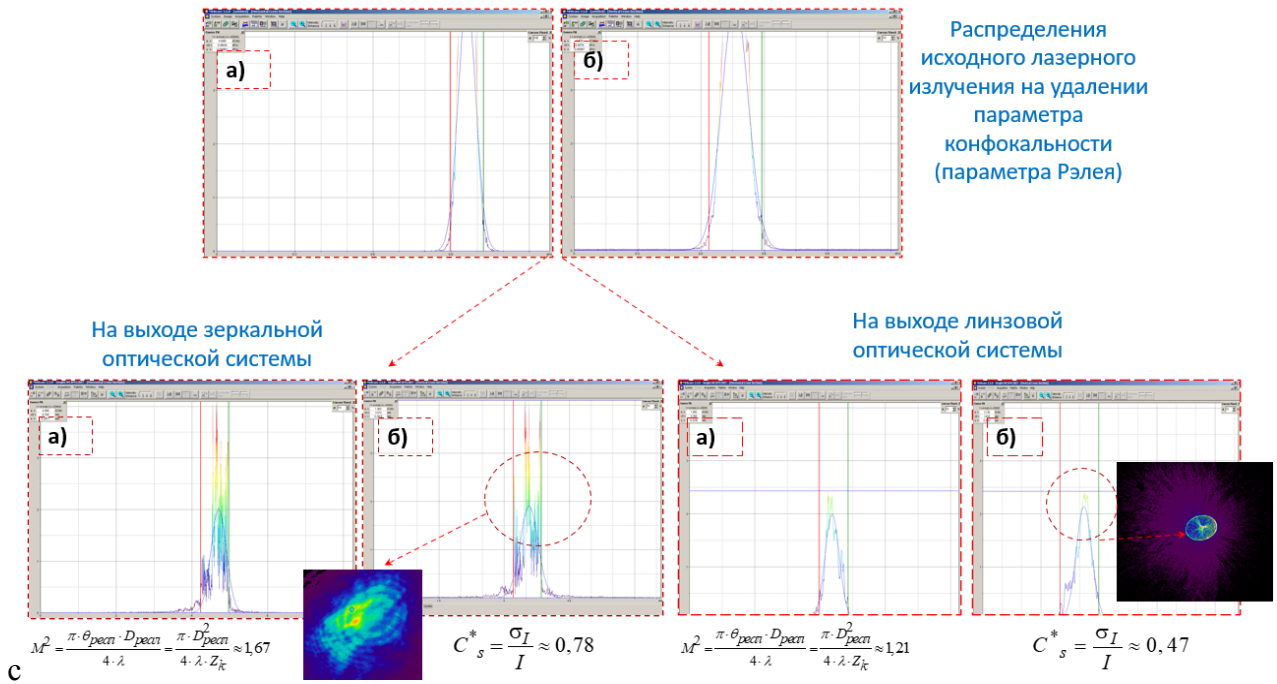


Рис. 6. К определению и исследованию параметра качества лазерного пучка и контраста спекл-структуры, формируемых в плоскости контролируемой оптической детали для зеркальной и линзовой оптических системы: а) – сечение профиля Гауссова пучка вдоль оси x; б) – сечение профиля Гауссова пучка вдоль оси y

Таблица 2

Сравнение основных характеристик лазерного излучения, прошедшего через линзовую и зеркальную оптические системы

№	Наименование параметра	Значения характеристики (идеальный случай)	Значения характеристики после линзовой оптической системы	Значения характеристики после зеркальной оптической системы
1*	Функция контраста спекл-структуры в сечении энергетического профиля лазерного пучка – C_s , отн. ед. $C_s = \frac{\sigma_I}{I}$, σ_I – среднеквадратическое значение флуктуаций интенсивности в видеоизображении распределения энергетического профиля лазерного пучка, I – среднее значение интенсивности в видеоизображении распределения энергетического профиля лазерного пучка	$< 0,5$	0,47	0,78
2	Параметр качества лазерного пучка, отн. ед. $M^2 = \frac{\pi \cdot \theta_{\text{реал}} \cdot D_{\text{реал}}}{4 \cdot \lambda} = \frac{\pi \cdot D_{\text{реал}}^2}{4 \cdot \lambda \cdot Z_k}$ $\theta_{\text{реал}}$ – расходимость реального лазерного пучка; $D_{\text{реал}}$ – диаметр в сечении перетяжки реального лазерного пучка; Z_k – параметр конфокальности (длина ближней зоны) лазерного пучка; λ – длина волны лазерного излучения	$1 \leq M^2 \leq 1,2$	1,21	1,67

* – при расчёте проводилась фильтрация аномальных выбросов, формируемых в результате нестабильности флуктуаций интенсивности лазерного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов Д. Г. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 89–96.
2. Денисов Д. Г., Карасик В. Е. / Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 2 (83). С. 36–47.
3. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля. – М.: Наука, 1966.
4. Beckmann P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surface. – Norwood: Pergamon Press, ARTECH HOUSE, 1987.
5. Denisov D. G., Karasik V. E. / Measurement Techniques. 2009. Vol. 52. № 3. P. 260–265.
6. Goodman J. W. Speckle phenomena in optics: theory and applications. – Colorado: Roberts and Company, 2006.
7. Франсон М. Оптика спеклов. – М.: МИР, 1980.
8. Гудмен Дж. Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988.

PACS: 03.65.Nk

Experimental evaluation of the quality of laser radiation in the differential scattering method

D. G. Denisov

Bauman Moscow Technical University, Moscow, 105005 Russia
E-mail: denisov_dg@mail.ru

Received 2.12.2024; revised 26.12.2024; accepted 7.04.2025

The influence of lens and mirror optical schemes of the illumination channel of a mock-up sample of an optoelectronic system for measuring the roughness parameters of the angstrom level of optical surfaces on the quality of laser radiation has been investigated and experimentally analyzed. Based on the developed mock-up sample using lens and crystal optical systems, a quantitative assessment of such indicators of the quality of laser radiation as the M^2 parameter and the contrast function of the speckle structure in the cross section of its energy profile is given. As a result of the presented comparative analysis of the effect of two optical systems of the illumination channel of the mock-up sample on the achievable laser radiation quality indicators, recommendations are made on the expediency of using a lens optical system in the illumination channel from the point of view of minimal error in the measurements.

Keywords: lens and mirror optical systems; M^2 parameter; contrast of the speckle structure; energy profile of the laser beam; laser radiation; differential scattering method.

REFERENCES

1. Denisov D. G., Applied Physics, № 1, 89–96 (2022) [in Russian].
2. Denisov D. G. and Karasik V. E., Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering series, № 2 (83), 36–47 (2011).
3. Rytov S. M. Introduction to statistical radiophysics. Part II. Random Fields. Moscow, Nauka Publ., 1966.
4. Beckman P. and Spitzikino A. Scattering of electromagnetic waves on a rough surface. Norwood, Pergamon Press, ARTEK HOUSE, 1987.
5. Denisov D. G. and Karasik V. E., Measurement methods **52** (3), 260–265 (2009).
6. Goodman J. W. Speckle phenomena in optics: theory and applications. Colorado, Roberts and Company, 2006.
7. Franson M. Literature review. Moscow, MIR, 1980.
8. Goodman J. Statistical characteristics. Moscow, Mir Publ., 1988.

Об авторе

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н., МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5). E-mail: denisov_dg@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 8152-8378, Author ID 798946