

УДК 535.42, 535.51  
EDN: LZHTLW

PACS: 03.65.Nk

## Исследование возможностей улучшения динамического диапазона регистрируемой интенсивности лазерного излучения в методе дифференциального рассеяния

Д. Г. Денисов

*Экспериментально и теоретически исследованы пути повышения динамического диапазона регистрируемой индикатрисы рассеянного лазерного излучения от оптической поверхности с ангстремным значением среднеквадратического отклонения (СКО) высотного параметра шероховатости.*

*Результаты исследования позволили сформулировать необходимые требования при проектировании метода и аппаратуры данного класса в лабораторных условиях для измерения среднеквадратического отклонения параметра шероховатости оптической поверхности менее 0,1 нм, а именно:*

*- конструктивное исполнение макетного образца должно быть реализовано с применением специализированного фоновподавляющего защитного кожуха;*

*- необходимо применение математической модели аппроксимации регистрируемой индикатрисы в углах дифракции от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , что соответствует анализу пространственных частот интегрируемой целевой функции – функции спектральной плотности корреляционной функции в диапазоне сверхвысоких пространственных частот от 0 до до максимального значения равно  $u_{\max} = 1040 \text{ мм}^{-1}$ .*

*Ключевые слова:* линзовая оптическая система; значение среднеквадратического отклонения шероховатости; динамический диапазон; отношение сигнал–шум; математическая аппроксимация; индикатриса рассеяния; спектральная плотность корреляционной функции.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-2-103-114

### Введение

При решении задачи определения эффективного значения СКО высотных параметров шероховатости в методе дифференциального

рассеяния в ранее опубликованных научных результатах [1–8] были рассмотрены основные научные положения метода для контроля качества оптических поверхностей. В работах [1, 3] было показано влияние ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния при контроле оптических поверхностей ангстремного уровня, среди которых наибольшее влияние оказывают аппаратные ограничения, обусловленные конструктивными особенностями прибора контроля, а также шумами электронного тракта и рассеянием Рэля на молекулах воздуха оптической среды проведения эксперимента. Количественный

---

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.  
E-mail: denisov\_dg@mail.ru  
МГТУ им. Н. Э. Баумана.  
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

*Статья поступила в редакцию 2.12.2024  
После доработки 26.01.2025  
Принята к публикации 27.02.2025  
Шифр научной специальности: 2.2.6*

© Денисов Д. Г., 2025

анализ и природа происхождения возможных ограничительных факторов позволяют провести их учёт при полученном угловом ограничении регистрируемой индикатрисы рассеянного лазерного излучения (функции ARS от англ. – Angle Resolved Scattering – распределение по углу рассеянного излучения) и соответствующем частотном ограничении спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ или PSD от англ. – Power Spectral Density) с целью расширения динамического диапазона данных функций и повышению точности (минимальной погрешности) последующих измерений эффективного значения СКО высотных параметров шероховатости ангстремного уровня в методе дифференциального рассеяния.

### Основные научные положения и принципы метода дифференциального рассеяния

Для расчета рассеяния на шероховатой оптической поверхности обычно применяют модель, основанную на векторной теории, использующей криволинейное преобразование координат. Такой подход позволяет пользоваться методом теории малых возмущений. Статистические свойства шероховатой поверхности описываются в этом случае функцией СПКФ. При этом обычно ограничиваются гауссовой или экспоненциальной статистикой, характерных для описания высотных и латеральных параметров шероховатости сверхгладких поверхностей (в частности поверхностей с ангстремным уровнем шероховатости). Метод малых возмущений используется для малых микронеровностей, обладающих малой протяжённостью по сравнению с длиной волны падающего электромагнитного излучения. В его основе лежит разложение искомого поля и граничных условий в ряды по степеням малых параметров  $h/\lambda \ll 1$  и  $\sigma_h/l_k \ll 1$ .

Решение задачи рассеяния света на шероховатости диэлектрической поверхности проводится в рамках классической электромагнитной теории с использованием уравнений Максвелла [1, 5, 6].

Микропрофиль поверхности описывается случайной функцией  $z = f(x, y)$  (ось  $z$  направлена нормально к поверхности).

Поверхность в среднем является плоской,  $z = f(x, y)$ , а среднеквадратичное отклонение высоты профиля  $\sigma_h$  мало по сравнению с длиной волны оптического излучения и длиной корреляции  $\sigma_h/\lambda \ll 1$  и  $\sigma_h/l_k \ll 1$  (см. рис. 1).

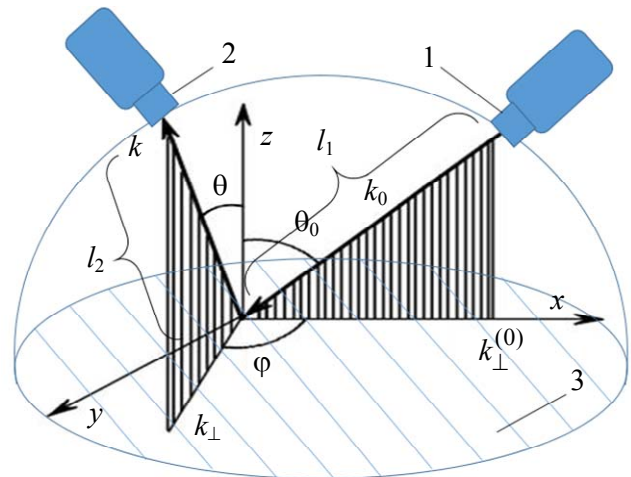


Рис. 1. К физическим принципам регистрации рассеянного лазерного излучения в методе дифференциального рассеяния: 1 – канала подсвета на основе оптической системы линзового или зеркального типа; 2 – канала фоторегистрации рассеянного лазерного излучения от исследуемой оптической поверхности; 3 – исследуемая (рассеивающая) оптическая поверхность

На рисунке 1 представлен принцип подсвета и регистрации рассеянного лазерного излучения от исследуемой оптической поверхности. Пространственно-угловые характеристики лазерного излучения, формируются каналом подсвета (поз. 1 на рис. 1) ключевым элементов которого является оптическая система, которая в свою очередь может быть линзового или зеркального типов. Регистрация рассеянного лазерного излучения реализуется при помощи приёмного канала (поз. 2 на рис. 1), основным элементов которого является модуль фотоэлектронного умножителя. С целью селекции рассеянного лазерного излучения относительно фоновой внешней засветки при реализации конкретной функциональной схемы оптико-электронного прибора для определения параметров шероховатости, в оптическом тракте предусмотрены такие функциональные элементы, как: поляризатор и анализаторы в канале подсвета и фоторегистрации, соответственно, интерференционный

светофильтр с микрообъективом, формирующим определённый телесный угол регистрации в приёмном канале, а так же принцип электронной модуляции лазерного излучения канала подсвета.

В работах [1, 3, 7, 8] было получено окончательные выражения для индикатрисы рассеянного лазерного излучения ARS в методе дифференциального рассеяния

$$\text{ARS}(\theta_d, \theta_{\Pi}, \varphi, F_{ji}) = \frac{1}{I_0} \cdot \frac{dI_i}{d\Omega} = \frac{\omega^4 \cdot (\varepsilon - 1)^2}{\pi^2 \cdot c^4} \times \cos \theta_0 \cdot \cos^2 \theta \cdot g(k_{\perp} - k_{\perp}^0) \cdot \left[ |F_{si}|^2 + |F_{pi}|^2 \right], \quad (1)$$

где  $F_{ji}$  – угловые функции (геометро-оптические факторы зависящие от состояния поляризации падающего и рассеянного (дифрагированного) лазерного излучения, б/р;  $I_i$  – интенсивность рассеянного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Omega$  – телесный угол, ср;  $\theta_d, \theta_{\Pi}$  – углы рассеяния (дифракции) и падения излучения соответственно, град.;  $\varphi = 0^0$  – азимутальный угол (угол, отсчитываемый от плоскости падения (плоскости поляризации, падающей плоской линейно-поляризованной волны).

$g(k_{\perp} - k_{\perp}^0)$  – спектральная плотность корреляционной функции (СПКФ или PSD от англ. – Power Spectral Density) шероховатости поверхности, нн<sup>2</sup>·мм<sup>2</sup>

$c$  – скорость света, м/с

$$k_{\perp} = (k_x, k_y, 0) = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot (\sin \theta \cdot \cos \varphi, \sin \theta \cdot \sin \varphi, 0),$$

$$k_{\perp}^0(k_x, 0, 0) = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} (\sin \theta_0, 0, 0) \text{ – составляющие}$$

волновых векторов, перпендикулярные нормали поверхности, рассеянной и падающей волн соответственно.

### Результаты теоретических и экспериментальных возможностей минимизации ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния

Рассмотрим возможный вариант минимизации влияния ограничительных аппаратных и шумовых факторов на регистрируемую инди-

катрису рассеяния заключающийся в применении математической модели аппроксимационной функции, позволяющей расширить динамический диапазон регистрируемой индикатрисы рассеяния лазерного излучения (1) и соответствующей спектральной плотности с целью последующего определения эффективного значения СКО высотного параметра шероховатости с минимальной погрешностью

$$\text{PSD}(\nu) = \text{ARS}(\theta_d, \theta_{\Pi}, \varphi, F_{ji}) \times \frac{\pi^2 \cdot c^4}{\omega^4 \cdot (\varepsilon - 1)^2 \cdot \cos \theta_0 \cdot \cos^2 \theta \cdot \left[ |F_{si}|^2 + |F_{pi}|^2 \right]}. \quad (2)$$

В свою очередь связь СПКФ (2) с эффективным среднеквадратическим отклонением высотного значения параметра шероховатости профиля исследуемой оптической поверхности в диапазоне пространственных частот от  $\nu_{\min}$  до  $\nu_{\max}$  может быть представлена на основе теоремы Парсевеля [1] следующим образом

$$\sigma_{\text{эф}} = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \text{PSD}(\nu) \nu d\nu}. \quad (3)$$

Таким образом погрешность эффективного значения СКО в уравнении (3) определяется погрешностью определения функции СПКФ в заданной области пространственных частот, которая в свою очередь зависит от учёта и невелирования рассматриваемых ограничительных аппаратных шумовых факторов и внешней фоновой засветки.

С этой целью определим значение максимальной частоты  $\nu_{\max}$  по выражению

$$|\sin(\theta_{\Pi}) / \lambda - 1 / \lambda| = \nu_{\max}$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения, мкм и проведём аппроксимацию функции  $\text{ARS}(\theta_d, \theta_{\Pi}, \varphi, F_{ij})$  (1) в диапазоне углов рассеяния от  $\theta_{d\min}$  до  $90^0$  по выражению:

$$\begin{aligned} \text{ARS}_{\text{анп}}(\theta_d, \theta_{\Pi}, \varphi, F_{ij}) &= \\ &= f \left\{ \text{ARS}(\theta_{d\min}, \theta_{\Pi}, \varphi, F_{ij}), \right. \\ &\left. \text{ARS}(\theta_d, \theta_p, \varphi, F_{ij}), \text{ARS}(90^0, \theta_{\Pi}, \varphi, F_{ij}) \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $ARS_{\text{анп}}(\theta_{\text{Дmin}}, \theta_{\text{П}}, \phi, F_{\text{if}})$  – значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения для минимального угла  $\theta_{\text{Дmin}}$ , который определяется из выражения

$$|\sin(\theta_{\text{П}})/\lambda - \sin(\theta_{\text{Д}})/\lambda| = v$$

по заданной минимальной пространственной частоте анализируемых неоднородностей поверхности  $v_{\text{min}}$  следующим образом:

$$\theta_{\text{Дmin}} = \text{Arc sin}(v_{\text{min}} \lambda + \sin(\theta_{\text{П}}))$$

$ARS(\theta_{\text{Д}}^*, \theta_{\text{П}}, \phi, F_{\text{if}})$  – значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения для предельного угла  $\theta_{\text{Д}}^*$ , которые определяется по результатам измерений;

$ARS(90^\circ, \theta_{\text{П}}, \phi, F_{\text{if}}) = 0$  – минимальное значение зарегистрированной индикатрисы рассеянного излучения для максимального угла  $90^\circ$ .

В результате определим функцию спектральной плотности рассеянного излучения  $PSD_{\text{анп}}(v)$  по выражению:

$$PSD_{\text{анп}}(v) = ARS_{\text{анп}}(\theta_{\text{Д}}, \theta_{\text{П}}, \phi, F_{\text{if}}) \times \frac{\pi^2 \cdot c^4}{\omega^4 \cdot (\varepsilon - 1)^2 \cdot \cos \theta_0 \cdot \cos^2 \theta \cdot [ |F_{\text{si}}|^2 + |F_{\text{pi}}|^2 ]} \quad (5)$$

И рассчитаем эффективное значение СКО, согласно

$$\sigma = \sqrt{2 \cdot \pi \int_{v_{\text{min}}}^{v_{\text{max}}} PSD_{\text{анп}}(v) dv} \quad (6)$$

Рассмотрим пример аппроксимации индикатрисы рассеянного лазерного излучения для следующих исходных данных:

Длина волны лазерного излучения: 0,6328 мкм;

СКО параметров шероховатости кварцевой подложки: 0,1 нм;

Длина корреляции (латеральная область постоянства статистических свойств шероховатой подложки): 1,3 мкм;

Тип статистики распределения высотных параметров шероховатости – экспоненциальный;

Тип материала отражающей подложки: кварц оптический ( $\text{SiO}_2$ );

Диэлектрическая проницаемость кварцевой подложки: 2,12;

Угол падения оси лазерного излучения на шероховатую поверхность кварцевой подложки: 20 градусов;

$$R(\theta) = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot (n_b - 1)^2 \cdot d}{\lambda^4 \cdot N \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \text{– распределение}$$

интенсивности при рассеянии Рэлея на молекулах в атмосфере;

$n_b = 1,000293$  – показатель преломления воздуха, б/р;

$d = 5$  мм – диаметр пятна подсвета на поверхности контролируемой детали;

$N = 2,68 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  – концентрация молекул в воздухе;

$\phi = 0^\circ$  – азимутальный угол (угол, отсчитываемый от плоскости падения).

Используемая аппроксимационная зависимость распределения индикатрисы рассеянного лазерного излучения от углов дифракции в диапазоне от 70 градусов до 90 градусов:

$$y(x) = 465900 - 916600 \cdot x + 625600 \cdot x^2 - 147000 \cdot x^3$$

На рисунке 2 представлены результаты математического моделирования графиков функций индикатрис рассеянного лазерного излучения для исходных данных, а на рисунке 3 графики соответствующих исходным данным спектральных плотностей корреляционных функций.

На рисунке 2а представлено исходное пространственное распределение интенсивности в заданном телесном угле – индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до  $90^\circ$  (идеализированная интерпретация характера, рассеянного лазерного излучения – результат математического моделирования). На рисунке 2б показано пространственное распределение интенсивности в заданном телесном угле – индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до  $70^\circ$  (реальная интерпретация характера, рассеянного лазерного излучения – результат математического моделирования, имитирующий аппаратные ограничения и рассеяние Рэлея

на молекулах воздуха). На рисунке 2в представлено пространственное распределение интенсивности в заданном телесном угле – индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 90° (реальная интерпретация характера, рассеянного лазерного – результат математического моделирования, аппроксимационной функции, имитирующий нивелирование аппаратных ограничений, согласно выражению (4).

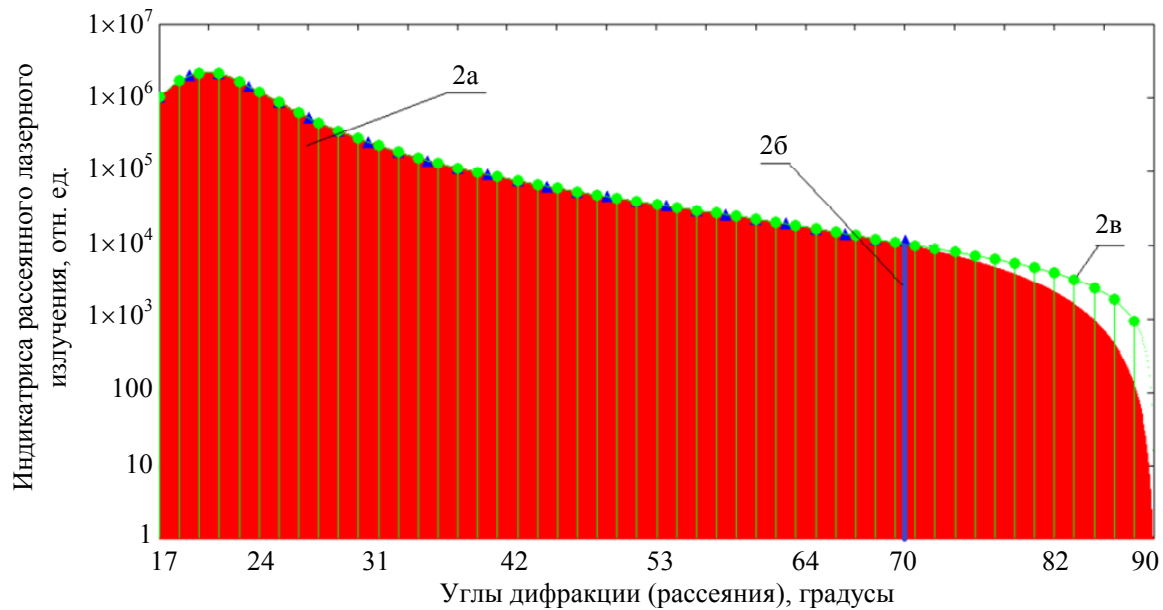
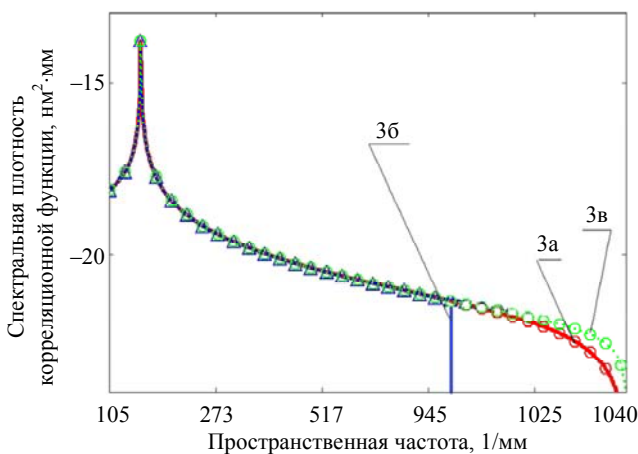


Рис. 2. Графики функций индикатрис рассеянного лазерного излучения для исходных данных: 2а) исходное пространственное распределение интенсивности в заданном телесном угле; 2б) пространственное распределение интенсивности в заданном телесном угле – индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 70°; 2в) пространственное распределение интенсивности в заданном телесном угле – индикатриса в диапазоне углов дифракции от 0 до 90°



Как можно видеть из рисунка 2 результат применения математической аппроксимации регистрируемой индикатрисы рассеяния позволяет осуществлять сканирование до угла дифракции 90° с минимальным отклонением характера распределения интенсивности, что в свою очередь обеспечивает возможность анализа высоких пространственных частот функции СПКФ (см. 3).

Рис. 3. Графики спектральных плотностей корреляционных функций, соответствующие графикам индикатрис рассеянного лазерного излучения для исходных данных: 2а) исходный график СПКФ, соответствующий диапазону пространственной частоты – от 0 и до  $\nu_{max} = 1040 \text{ мм}^{-1}$ ; 2б) график СПКФ, соответствующий диапазону пространственной частоты – от 0 и до  $\nu^* = 945 \text{ мм}^{-1}$ ; 2в) график СПКФ, соответствующий диапазону пространственной частоты – от 0 и до  $\nu_{max} = 1040 \text{ мм}^{-1}$

Из графиков функций СПКФ (см. рис. 3) можно видеть, что в результате апробации рассмотренной в работе математической модели аппроксимационной функции на основе представленных графических распределений,

диапазон пространственной частоты увеличивается с  $\nu^* = 945 \text{ мм}^{-1}$  до максимального значения равного  $\nu_{max} = 1040 \text{ мм}^{-1}$ , что позволяет провести интегрирование целевой функции  $\text{PSD}_{\text{апп}}(\nu)$  в диапазоне сверхвысоких частот,

определив с минимальной погрешностью эффективное значение СКО высотного параметра шероховатости.

Таким образом, результат численного моделирования позволил получить следующие численные результаты для возможности восстановления СКО шероховатости профиля кварцевой подложки:

Исходная СКО: 0,1 нм;

СКО, измеряемая в результате влияния аппаратных ограничений: 0,092 нм;

СКО, измеряемое в результате применения аппроксимации: 0,11 нм.

Используемая аппроксимационная зависимость распределения индикатрисы рассеянного лазерного излучения от углов дифракции в диапазоне от  $70^\circ$  до  $90^\circ$ :

$$y(x) = 465900 - 916600 \cdot x + 625600 \cdot x^2 - 147000 \cdot x^3$$

Относительная погрешность восстановления СКО, менее: 0,01 нм.

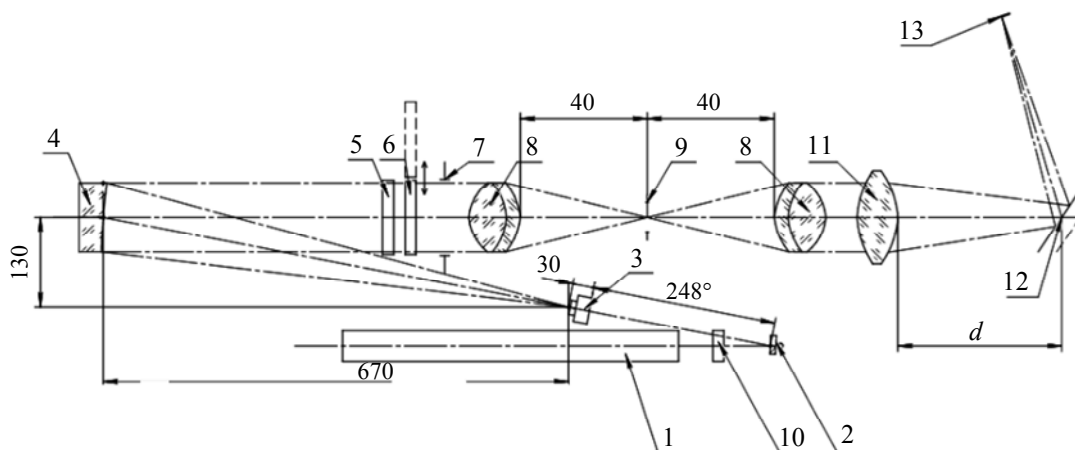
Предел частотного диапазона измерений эффективного значения СКО высотного параметра шероховатостей оптической поверхности увеличивается со значения  $\nu^* = 945 \text{ мм}^{-1}$  (эквивалентного углу дифракции  $70^\circ$ ) до значения физического предела  $\nu_{\text{max}} = 1040 \text{ мм}^{-1}$  (эквивалентного углу дифракции  $90^\circ$ ).

Рассмотрим далее возможный вариант минимизации влияния ограничительных аппаратных и шумовых факторов, а также фоновой засветки на регистрируемый малоинтенсивный сигнал – индикатрису рассеяния лазерного излучения при проектировании функцио-

нальной оптической схемы макетного образца прибора с применением специализированного защитного фоноводавляющего кожуха, разработанной, согласно представленным на рисунке 1 физическим принципам регистрации рассеянного лазерного излучения в методе дифференциального рассеяния.

Целью проектирования функционально-оптической схемы и внешнего облика макетного образца является отработка чувствительности и динамического диапазона разрабатываемых научных основ модифицированного метода дифференциального рассеяния и их экспериментальной апробации в натурном и полунатурном приближениях. Для выполнения поставленной цели к макетному образцу можно предъявить следующие функциональные требования: – возможность оперативной смены источников излучения; – возможность оперативной смены фотоприемников; – возможность оперативной смены образцов исследования – плоских оптических деталей с различными эффективными значениями СКО высотного параметра шероховатости менее одного нанометра; – возможность управлять состоянием поляризации излучения подсвета; – доступность к перенастройке схемы фоторегистрации; – возможность отладки разрабатываемого программного обеспечения.

При создании макетного образца, представленного на рисунке 4 в качестве передающего канала, была выбрана линзовая система, формирующая более приемлемые для дальнейших измерений поляризационные и когерентные свойства лазерного излучения.



**Рис. 4. Функциональная оптическая схема макетного образца оптико-электронного прибора модифицированного метода дифференциального рассеяния для контроля параметров шероховатости ангстремного уровня оптических деталей**



В качестве источника излучения 1 был взят гелий-неоновый лазер ЛГН-223-1, излучение которого, прошедшее через модулятор 10, отражаясь от зеркала 2 (предназначенное для излома оптической оси, для уменьшения габаритов макетной установки) попадает на микрообъектив 3, который увеличивает диаметр пучка излучения. С помощью зеркала 4 расходящийся пучок становится параллельным, для того, чтобы при прохождении модулятора поляризации 5 и поляризатора 6 не внести дополнительных искажений. Затем излучения, проходя через диафрагму 7 и афокальную систему 8, фокусируются с помощью линзы 11 на фотоприёмное устройство – фотоэлектронный умножитель, проходя при этом через исследуемый образец 12. Фотоприемник размещен на сканирующем устройстве, что позволяет измерять интенсивность отраженного и рассеянного излучения в диапазоне углов  $0-90^\circ$  относительно нормали к облучаемой поверхности и от минус  $90^\circ$  до плюс  $90^\circ$  относительно плоскости падения лазерного луча. Расстояния  $d$  предполагается изменять в ходе экспериментов.

На основе проведенных исследований разработанной функциональной оптической схемы была спроектирована конструкция и изготовлен макетный образец прибора. Для выполне-

ния сформулированных выше требований к конструкции макетного образца предлагается следующее конструктивное решение. Макетный образец монтируется на оптическом столе. В его конструкции используются ряд стандартных направляющих, оправ, столиков и т. д. Такой подход обеспечивает свободный доступ и гибкую перенастройку системы под различные научные задачи, решаемые при проектировании комплекса (смена лазерных источников, фотоприемных устройств, оптических элементов, спектральных фильтров, управление поляризационным состоянием излучения и т. д.). Для предварительной юстировки элементов афокальной оптической системы и положения плоскости фокусировки последующей фокусирующей насадки, конструкция макетного образца оснащена каналом юстировки на основе датчика волнового фронта, расположенного на передвижной платформе. Внешний вид изготовленного макетного образца без защитного кожуха с соответствующей расстановкой позиций ключевых конструктивных элементов и с защитным кожухом представлен на рисунках 5 и 8 соответственно. Кожух обеспечивает защиту от внешних фоновых засветок, что крайне необходимо при регистрации минимальных уровней оптических сигналов, эквивалентных регистрации.

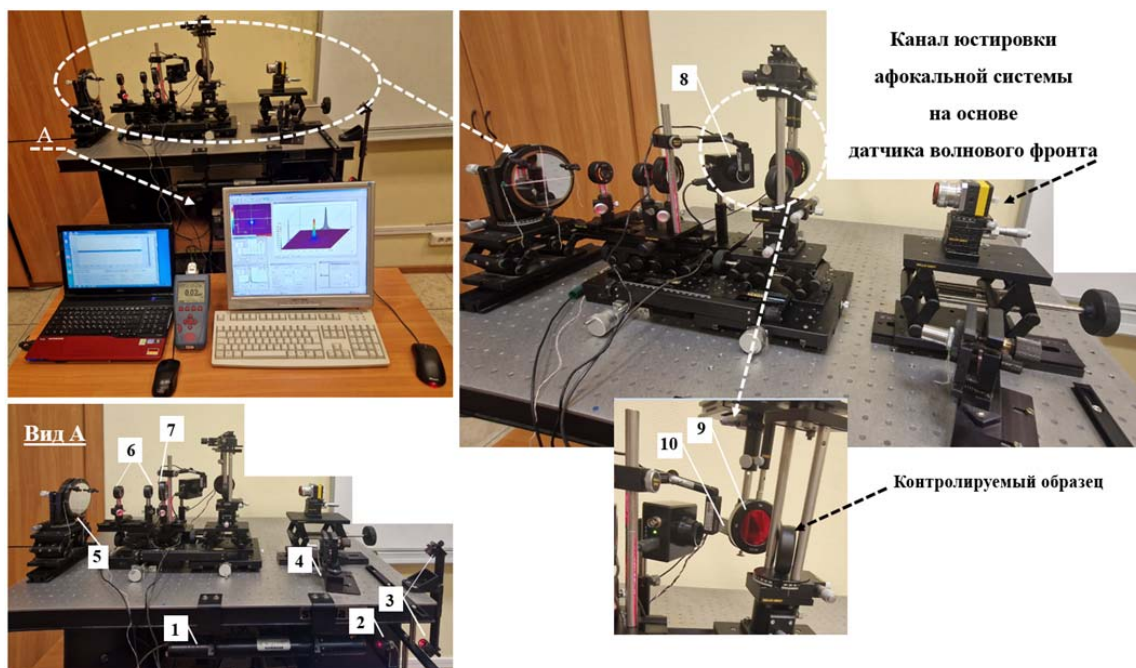


Рис. 5. Фотография макетного образца без защитного кожуха с конструктивными и функциональными узлами

Как видно из рисунка 5 излучение лазера 1 проходит через модулятор 2 и направляется на систему зеркал 3. После зеркал излучение направляется на объектив 4. Объектив фокусирует пучок излучения в переднюю фокальную плоскость параболического зеркала 5. Сформированный параллельный пучок проходит через афокальную систему 6, состоящую из двух объективов и попадает на проецирующую линзу 7. Затем излучение попадает на контрольный образец в оправе, формируя зону подсвета от 3 до 5 мм.

Для юстировки используются вертикальные, горизонтальные и угловые подвижки. Юстировка канала подсвета включает 2-х стадийную методику, основанную на:

1) сопряжении фокусных расстояний двух элементов афокальной оптической системы за счёт механических продольных и поперечных

подвижек осуществляется по регистрации, формируемого плоского волнового фронта лазерного пучка (см. рис. 6), где основным критерием является минимизация дефокусировки и угловых наклонов волнового фронта (формируемая модельная интерференционная картина в этом случае представляет собой равномерное по распределению поле средней интенсивности);

2) формирование минимального фокального пятна фокусирующей насадкой, установленной после афокальной системы по данным показания датчика волнового фронта (формируемая модельная интерференционная картина в этом случае представляет собой кольцевую структуру, определяемую преимущественно наличием дефокусировки по которой определяется экстремум значения фокального пятна (см. рис. 7)).

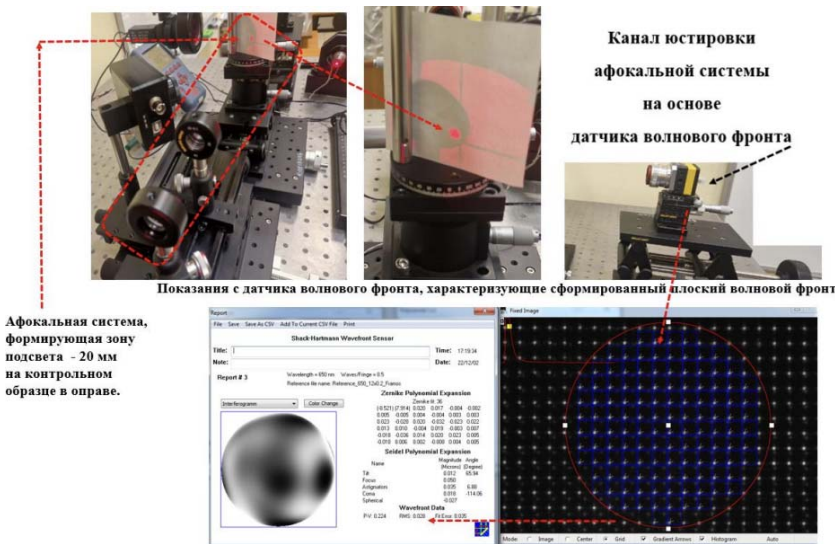


Рис. 6. Технологический этап юстировки афокальной оптической системы канала подсвета макетного образца по выходным данным датчика волнового фронта



Рис. 7. Технологический этап юстировки афокальной оптической системы с фокусирующей насадкой канала подсвета макетного образца по выходным данным датчика волнового фронта



С целью минимизации внешних фоновых засветок при регистрации малоинтенсивного рассеянного лазерного излучения макетный образец изолируется от внешних воздействий при помощи разработанного специализированного фоноводавляющего защитного кожуха.

Для измерения чувствительности фотоэлектронного умножителя канала фоторегистрации разработанного макетного образца (см. рис. 8), были выполнены следующие этапы методики проведения измерений (см. рис. 9):

– проведено определение средноквадратического значения шума фотоэлектронного умножителя при максимальном коэффициенте усиления, с этой целью необходимо было: закрыть защитную диафрагму; соединить выходной кабель приёмника излучения с многофункциональным модулем ввода – вывода и преобразования сигнала в цифровую форму с персональным компьютером; подать рабочее напряжение на модуль фоторегистрации от 4,5 до 5,5 В, оценив наличие выходного сигнала – средноквадратического распределения мощности шумового потока.

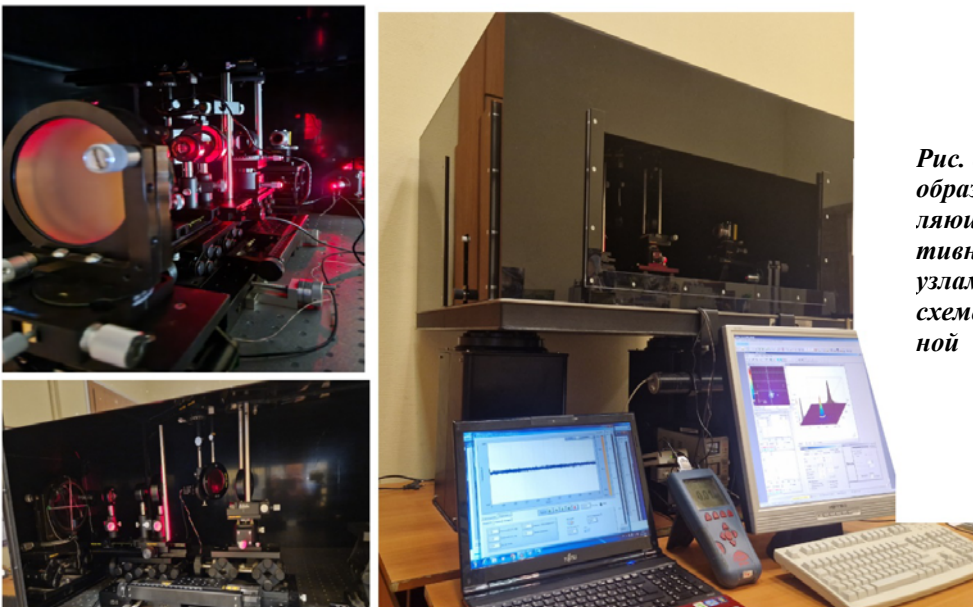


Рис. 8. Фотография макетного образца с защитным фоноводавляющим кожухом с конструктивными и функциональными узлами, согласно разработанной схеме оптической функциональной

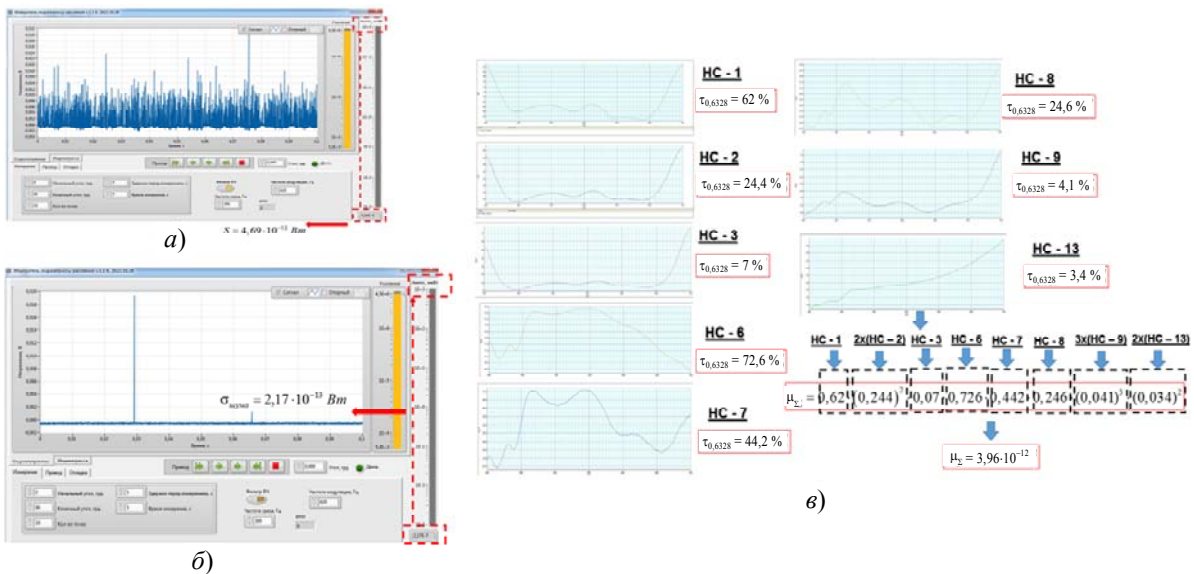


Рис. 9. Результаты этапов методики измерения чувствительности разработанного макетного образца: а) определение максимального значения сигнала фотоэлектронного умножителя; б) определение средноквадратического значения шума фотоэлектронного умножителя; в) определение коэффициента ослабления сигнала канала фоторегистрации с применением системы нейтральных светофильтров

Измеренное значение составляет –  $\sigma_{\text{шума}} = 2,17 \times 10^{-13}$  Вт.

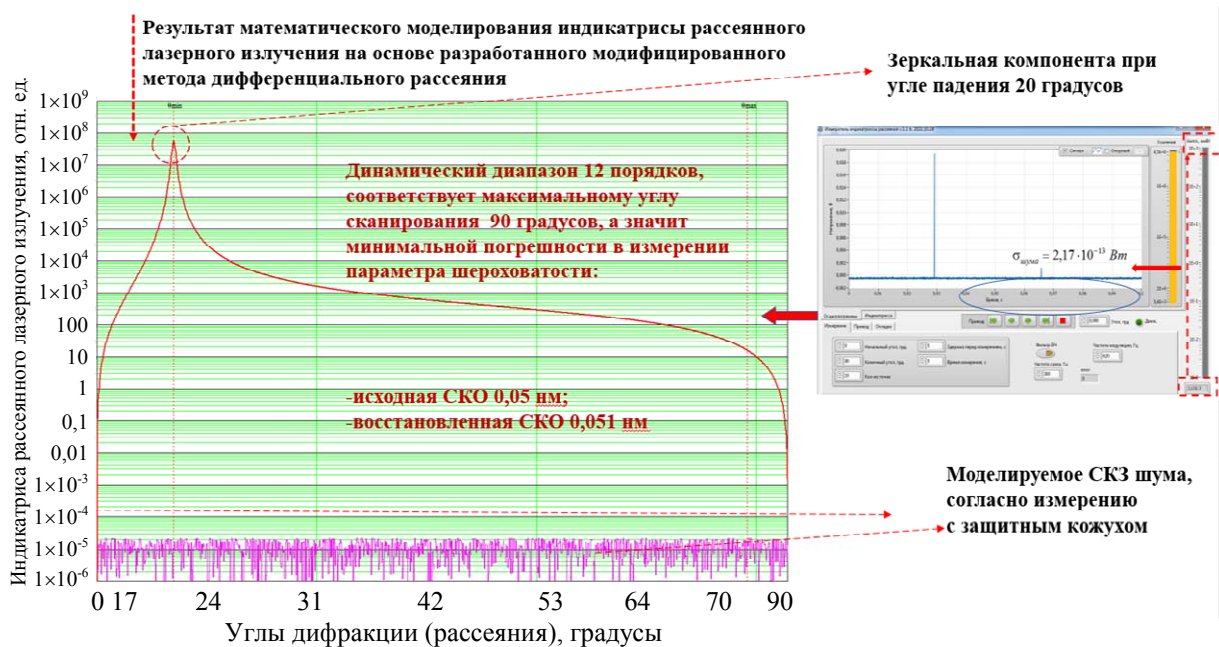
- проведено определение максимального значения сигнала фотоелектронного умножителя при максимальном коэффициенте усиления, соответствующее измерению зеркальной компоненты отражённого лазерного излучения;
- проведено определение коэффициента ослабления сигнала канала фоторегистрации от его максимального значения до минимального, определяемого отношением сигнала к шуму.

С этой целью применяется система нейтральных светофильтров следующих типов, с соответствующими спектральными характеристиками, представленными на рисун-

ке 9. Значение максимального коэффициента ослабления составило  $\mu_{\Sigma} = 3,96 \times 10^{-12}$  Вт, а величины результирующего сигнала при максимальном ослаблении  $S = 4,69 \times 10^{-12}$  Вт.

Таким образом результирующее отношение сигнал к шуму составило значение  $S/\sigma_{\text{шума}} = 21,61$ .

Полученное отношение сигнал к шуму при реализации модифицированного метода дифференциального рассеяния позволяет потенциально (на основе апробации математического моделирования полученного выражения (4)) расширить динамический диапазон регистрируемой индикатрисы рассеяния лазерного излучения до 12 порядков интенсивности (см. рис. 10).



**Рис. 10. Иллюстрация определения соответствия полученной чувствительности максимальному углу сканирования и максимальной пространственной частоте рассеянного лазерного излучения**

На рисунке 10 можно видеть результат полунатурного моделирования определения полученной чувствительности максимальному углу сканирования, а значит и максимальной пространственной частоте в полусфере объёмного рассеяния для заданного динамического диапазона макетного образца с фоновподавляющим кожухом. В качестве примера для достигнутого динамического диапазона с учётом наличия фоновподавляющего кожуха было проведено математическое моделирование процесса восстановления эффективного зна-

чения СКО высотного параметра шероховатости, согласно формулам (1–3).

Таким образом, результат численного моделирования позволил получить следующие численные результаты для возможности восстановления СКО шероховатости профиля кварцевой подложки:

Исходная СКО: 0,05 нм;

СКО, измеряемое в результате влияния аппаратных ограничений: 0,001 нм;

СКО, измеряемое в результате применения аппроксимации: 0,051 нм.

В результате проведенных исследований были получены теоретические и экспериментальные результаты повышения чувствительности и расширения динамического диапазона макетного образца оптико-электронного прибора для контроля параметров шероховатости ангстремного уровня. В качестве ключевых достигнутых результатов можно выделить:

– возможность применения математической модели аппроксимации регистрируемой индикатрисы с возможностью её регистрации в углах дифракции от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , что соответствует анализу пространственных частот интегрируемой целевой функции – функции СПКФ в диапазоне сверхвысоких пространственных частот от 0 до максимального значения равного  $\nu_{\max} = 1040 \text{ мм}^{-1}$ , определив с минимальной погрешностью эффективное значение;

– определение СКО высотного параметра шероховатости:

для исходного СКО 0,1 нм – оно составило 0,01 нм;

для исходного СКО 0,05 нм – оно составило 0,005 нм.

Полученные результаты достигнуты на макетном образце с применением специализированного фоноподавляющего кожуха.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

PACS: 03.65.Nk

## The investigation of the possibilities of improving the dynamic range of the recorded intensity of laser radiation using the differential scattering method

*D. G. Denisov*

Bauman Moscow Technical University  
5, 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005 Russia

*Received 2.12.2024; revised 26.01.2025; accepted 27.02.2025*

*The ways of increasing the dynamic range of a mock-up sample of an optoelectronic device for recording the indicatrix of scattered laser radiation from an optical surface with an extreme value of the standard deviation (RMS) of a high roughness parameter are investigated, experimentally and theoretically analyzed. The results of the study made it possible to formulate the necessary requirements when designing a method and equipment of this class in laboratory conditions for measuring the standard deviation of the optical surface roughness parameter of less than 0.1 nm, namely: – the design of the mock-up sample should be implemented using a specialized phono-canceling protective casing.; – it is necessary to apply a mathematical model of approximation of the recorded indicatrix in diffraction angles from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , which corresponds to the analysis of spatial frequencies of the integrated objective function – the spectral*

***density function of the correlation function in the range of ultrahigh spatial frequencies from 0 to a maximum value equal to  $v_{max} = 1040 \text{ mm}^{-1}$ .***

*Keywords:* lens optical system; the value of the standard deviation of roughness; dynamic range; signal-to-noise ratio; mathematical approximation; scattering indicatrix; spectral density of the correlation function.

REFERENCES

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