

Анализ влияния ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния при контроле поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня профилей оптических деталей

Д. Г. Денисов

Для достижения высоких технологических показателей качества различных оптических деталей нового поколения, необходим не только современный подход к методам и средствам обработки деталей, но и реализация перспективных высокоточных бесконтактных методов диагностики. Особое внимание в единой технологической цепочке занимают стадии глубокой полировки, когда высотные статистические параметры профилей достигают нано- и субнанометровых уровней. Для диагностики высотных статистических параметров субнанометрового уровня на сегодняшний день применяются различные классы оптико-электронных приборов и систем. Наибольший интерес в задачах высокоточного аттестационного контроля представляют такие перспективные приборы и системы, как: динамические интерферометры, а также приборы, позволяющие оценивать среднеквадратическое значение поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня по данным анализа индикатрисы рассеянного лазерного излучения. В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения, классифицируются на [1–7]: методы полного интегрального рассеяния (TIS – Total Integrated Scattering), методы определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS – Angle-Resolved Scattering). Анализ влияния ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния позволяет определить его систематическую погрешность и повысить точность измерения.

Ключевые слова: оптический контроль, метод дифференциального рассеяния, индикатриса рассеяния, коэффициент отражения по двум угловым координатам, поверхностные неоднородности.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-89-96

1. Теоретический анализ процесса светорассеяния при взаимодействии лазерного излучения с поверхностными неоднородностями оптических изделий

Оптико-электронные приборы (ОЭП) метода ARS (рис. 1), имеют ряд преимуществ

по отношению к существующим динамическим интерферометрам, таких как отсутствие дорогостоящей эталонной (опорной) оптической поверхности, определяющей точностные ограничения и диапазон измерений.

Так же стоит отметить, высокую чувствительность метода и простоту схемотехнической реализации. Так, например, чувствительность метода позволяет измерять рассеяние (относительную интенсивность рассеянного лазерного излучения) до 10^{-8} [7] (рис. 2), что для кварцевой подложки, имеющей френелевский коэффициент отражения порядка 4 % соответствует эффективному СКЗ высотного статистического показателя качества $\sigma_{\text{эф}} \approx 0,1$ ангстрем [1–5].

Денисов Дмитрий Геннадьевич, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov_dg@mail.ru

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

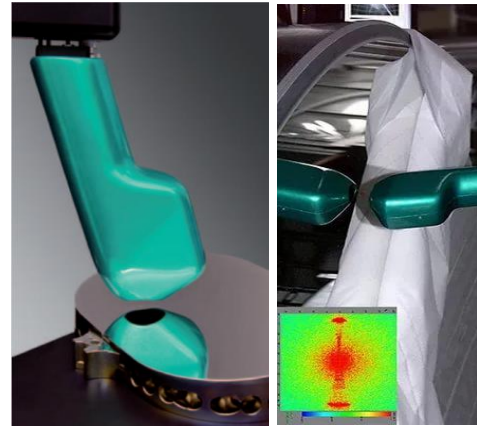
Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2022 г.

© Денисов Д. Г., 2022



а) стационарный оптико-электронный прибор типа «Мерлин»



б) мобильная оптико-электронный прибор типа «Хорос»

Рис. 1. Современные варианты реализации метода дифференциального рассеяния лазерного излучения для контроля качества локальных поверхностных неоднородностей

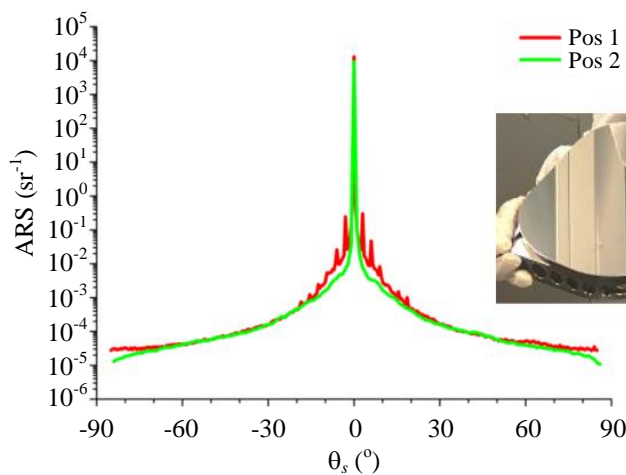


Рис. 2. Результат измерения относительной интенсивности рассеянного лазерного излучения прибором типа «Horos» [7]

Однако, как можно видеть из экспериментально полученных результатов (рис. 2), наряду с приведёнными достоинствами, следует отметить, ряд особенностей метода, в частности, чувствительность функциональных схем ОЭП к шумам электронного тракта аппаратуры, рассеянию лазерного излучения на молекулах (рассеянию Рэлея), а также к ограничению по углам подсвета и контроля (аппаратные ограничения). В частности, последний фактор, определяющий угловые ограничения, достаточно существенно ограничивает пространственные частоты при диагностике поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня. Таким образом, точностной анализ метода дифференциального рассеяния является важной и актуальной задачей при проектировании высокоточных приборов метрологического обеспечения. Реализация данной задачи, решается путём изучения и исследования следующих проблем:

1) анализа возможности применения приближений малых возмущений (МВ) при исследовании статистических показателей качества профилей оптических поверхностей методом ARS;

2) разработки единой математической модели метода дифференциального рассеяния при диагностике высотных статистических показателей профилей оптических поверхностей субнанометрового уровня;

3) исследованием влияния аппаратных ограничений по углу рассеяния, а так же влияние шумов электронного тракта и рассеяния Рэлея на точностные возможности метода ARS.

Для расчета индикатрисы рассеяния на шероховатой оптической поверхности обычно применяют модель, основанную на векторной теории, использующей криволинейное преобразование координат [1–5]. Такой подход позволяет пользоваться методом теории малых возмущений. Статистические свойства шеро-

ховатой поверхности описываются в этом случае спектральной плотностью корреляционной функции: одномерной (СПКФ1) или двумерной (СПКФ2). При этом обычно ограничиваются гауссовой или экспоненциальной статистикой для описания шероховатости. Метод МВ 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 $\sigma_h/\lambda \ll 1$ и $\sigma_h/l_k \ll 1$ (где σ_h , l_k – среднеквадратическое значение высотных параметров и длина корреляции поверхностных неоднородностей соответственно). Решение задачи рассеяния света на шероховатости диэлектрической поверхности проводится в рамках классической электромагнитной теории с использованием уравнений Максвелла (рис. 3) [1–5].

Исходной постановкой задачи является рассеяние плоской электромагнитной волны на шероховатой поверхности с заданными характеристиками. Геометрия углов, используемых в решении задачи рассеяния представлена на рис. 3.

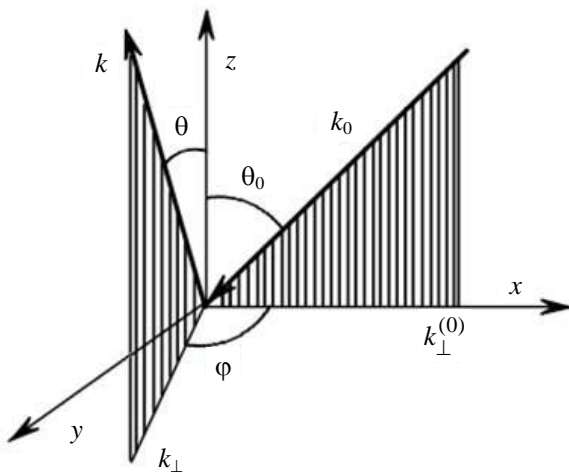


Рис. 3. Геометрия углов, используемых в решении задачи рассеяния

Идеология метода сводится к решению волнового уравнения с граничными условиями на заданной поверхности. Последующее решение задачи дифракции света с помощью функций Грина приводит к выражению для рассеянного поля, дифференцируя которое по единичному телесному углу и нормируя на интенсивность падающего излучения, полу-

чаем итоговую зависимость для индикатрисы дифференциального рассеяния:

$$\frac{1}{I_0} \frac{dI_i}{d\Omega} = \frac{\omega^4 (\epsilon - 1)^2}{\pi^2 c^4} \cos \theta_0 \cos^2 \theta \times \times g(k_{\perp} - k_{\perp}^0) \times \left[|F_{si}|^2 + |F_{pi}|^2 \right], \quad (1)$$

где F_{ji} – угловые функции для различных типов поляризаций:

$$F_{ss} = \frac{\cos^2 \varphi}{\left(\cos \theta_0 + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_0} \right)^2 \left(\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta} \right)^2}$$

$$F_{sp} = \frac{\sin^2 \varphi (\epsilon - \sin^2 \theta_0)}{\left(\epsilon \cos \theta_0 + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_0} \right)^2 \left(\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta} \right)^2},$$

$$F_{ps} = \frac{\sin^2 \varphi (\epsilon - \sin^2 \theta_0)}{\left(\cos \theta_0 + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_0} \right)^2 \left(\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta} \right)^2}$$

$$F_{pp} = \frac{\left(\cos \varphi \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_0} \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta} - \epsilon \sin \theta \sin \theta_0 \right)^2}{\left(\epsilon \cos \theta_0 + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_0} \right)^2 \left(\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta} \right)^2} \quad (2)$$

$g(k_{\perp} - k_{\perp}^0)$ – спектральная плотность корреляционной функции (PSD) шероховатости поверхности.

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

$$k_{\perp}^0 = (k_x^{(0)}, 0, 0) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_0, 0, 0) \text{ – составляющие волновых векторов, перпендикулярные нормали поверхности рассеянной и падающей волн соответственно.}$$

Для гауссовой функции корреляции шероховатости:

Для экспоненциальной функции корреляции:

$$g_r(\vec{k}_0 - \vec{k}) = \pi \sigma^2 l^2 \exp \left[- \left| \vec{k} - \vec{k}_0 \right| \frac{l^2}{4} \right]. \quad (3)$$

Для экспоненциальной функции корреляции:

$$g_s(\vec{k}_0 - \vec{k}) = \frac{\pi \sigma^2 l^2}{\left[1 + \left(\left| \vec{k} - \vec{k}_0 \right| l \right)^2 \right]^{3/2}}, \quad (4)$$

где σ – среднеквадратическая шероховатость рельефа поверхности; l – длина корреляции; $\left| \vec{k} - \vec{k}_0 \right|^2 = k_0^2 + k^2 - 2kk_0 \cos \varphi$.

Рассмотрим общий случай для комплексной диэлектрической проницаемости ϵ_1 и PSD-функции, представленных в виде суммы гауссовой и экспоненциальной статистик:

$$g(\vec{k}_0 - \vec{k}) = g_r(\vec{k}_0 - \vec{k}) + g_s(\vec{k}_0 - \vec{k}). \quad (5)$$

Для расчета параметров шероховатости оптических поверхностей при $l_k \ll \lambda$ можно с достаточной точностью использовать векторную теорию рассеяния, которая не учитывает влияние флуктуаций наклона шероховатостей. Погрешность, вызванная пренебрежением флуктуациями наклона шероховатости, в этом случае очень мала.

2. Математическое моделирование процесса светорассеяния

Для полученного выражения индикатрисы (1) проведем математическое моделирова-

ние процесса рассеяния лазерного излучения с учётом аппаратных ограничений по углам подсвета и рассеяния, шумов электронного тракта и рассеяния Рэлея.

Для апробации предложенного алгоритма внесем численные значения параметров и будем проводить его анализ на основании данных, приведенных в [2]. В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Рассеяние измерялось в плоскости падения ($\varphi = 0$) в диапазоне углов рассеяния $5^\circ - 85^\circ$ при угле падения 10° (в работе также приведено моделирование для угла падения 50°). Заданные характеристики образцов приведены в табл. 1. Было проанализировано восстановление эффективной величины СКО высотных параметров исследуемых профилей полированных кварцевых подложек ($\epsilon = 2,12$) при экспоненциальной статистике распределения.

Таблица 1

Заданные параметры образцов по литературному источнику

№ образца	Параметр	$\theta_0, ^\circ$	$\sigma_{\text{исход}}, \text{нм}$	$l_k, \text{мкм}$	$\lambda, \text{мкм}$	Статистика
Образец 1		10	1,1	0,7	0,6328	экспоненциальная
Образец 2		50	0,8	0,6	0,6328	экспоненциальная

Проанализируем восстановление эффективного среднеквадратичного отклонения профиля шероховатости выбранных поверхностей с учетом аппаратного ограничения

прибора. Графики индикатрисы дифференциального рассеяния и функции спектральной плотности мощности (СПКФ) для указанных случаев приведены на рис. 4.

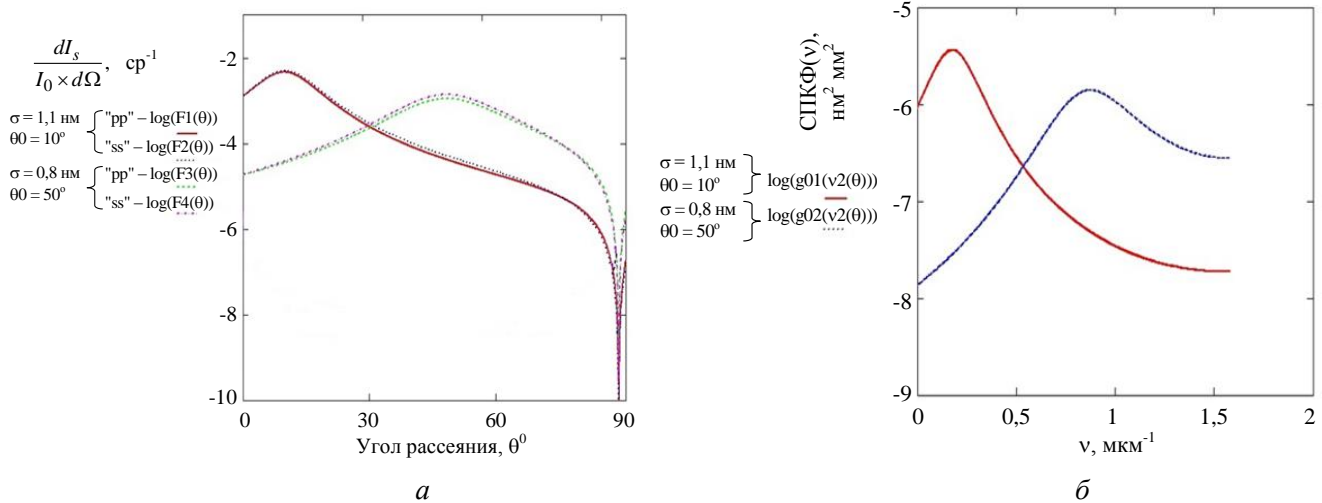


Рис. 4. Графическое представление: а – индикатрисы рассеянного лазерного излучения; б – СПКФ1

Проанализируем восстановление эффективного среднеквадратичного отклонения профиля шероховатости выбранных поверхностей с учетом аппаратного ограничения прибора (рис. 5). Следует отметить, что данное ограничение является недостатком схемы ARS, однако все же позволяет проводить из-

мерения с некоторой погрешностью. За аппаратные ограничения в данном литературном источнике принят диапазон углов рассеяния 5° – 85° . Этот интервал соответствует диапазону пространственных частот, в пределах которого ведется интегрирование и восстановление $\sigma_{эфф}$.

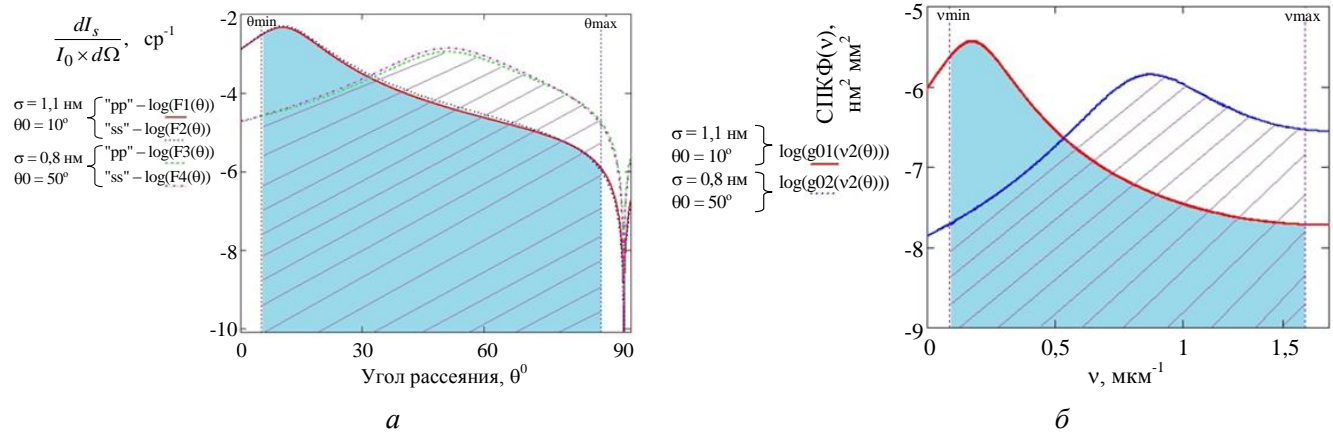


Рис. 5. Графическое представление исследуемых функций с учётом аппаратных ограничений: а – индикатрисы рассеянного лазерного излучения; б – СПКФ1

Применив указанное ограничение, получаем следующие значения эффективной среднеквадратичной шероховатости:

Первый случай: $\sigma_{апп} = 1,74 \text{ нм}$ ($\sigma_{исход} = 1,1 \text{ нм}$, $l_k = 0,7 \text{ мкм}$).

Второй случай: $\sigma_{апп} = 2,19 \text{ нм}$ ($\sigma_{исход} = 0,8 \text{ нм}$, $l_k = 0,6 \text{ мкм}$).

Необходимо обратить внимание на то, что в рассматриваемом литературном источнике не учитывается влияние такого фактора, как шум, который также вносит определенную погрешность при измерении индикатрисы. Для выявления этой погрешности учтем шум электронного тракта (N) и рассеяние Рэлея (RP, RS) [1–3], наиболее влияющие на результат восстановления $\sigma_{эфф}$.

За уровень электронного шума примем значение одного из распространенных детек-

торов ФЭУ (фотоэлектронный умножитель). Он составляет 10^{-10} ср^{-1} . Уровень рассеяния Рэлея определяем для р- и s-типа поляризации регистрируемого излучения.

Шумовой фактор также вносит ограничения при восстановлении эффективного среднеквадратического отклонения профиля шероховатости, но, как видно по результатам моделирования данное влияние проявляется в меньшей степени по сравнению с аппаратными ограничениями. На рис. 6 представлены графики индикатрис и спектральной плотности корреляционной функции для двух состояний поляризации лазерного излучения, с учетом влияния шума. Заштрихованная область для каждого из случаев представляет собой диапазон измеряемых углов (частот) с учетом данного фактора.

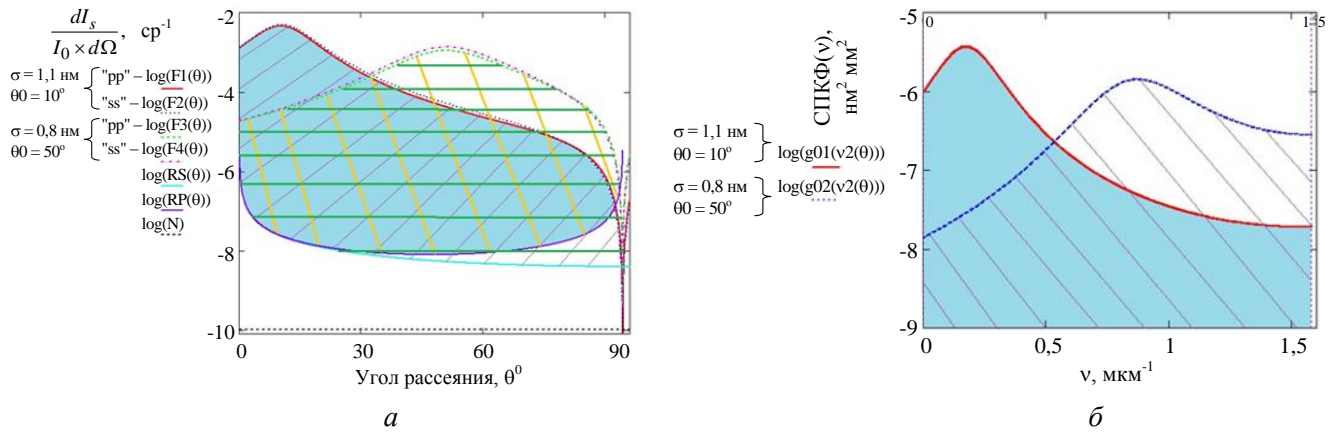


Рис. 6. Графическое представление исследуемых функций с учётом шумового влияния: а – индикаторы рассеянного лазерного излучения; б – СПКФ1

Применив указанное ограничение, получаем следующие значения $\sigma_{эфф}$:

Первый случай: $\sigma_{ш} = 1,21 \text{ нм}$ ($\sigma_{исход} = 1,1 \text{ нм}, l_k = 0,7 \text{ мкм}$).

Второй случай: $\sigma_{ш} = 2,12 \text{ нм}$ ($\sigma_{исход} = 0,8 \text{ нм}, l_k = 0,6 \text{ мкм}$).

Также следует отметить, что при восстановлении эффективной среднеквадратической шероховатости профиля необходимо учитывать влияние зеркальной компоненты индикатрисы рассеянного лазерного излучения [1–5] в силу того, что она обладает достаточно высокой интенсивностью и тем самым усложняет процесс регистрации сигнала приёмным каналом прибора. Учёт влияния зеркальной

компоненты позволяет расширить спектр возможных приемных устройств. Проанализируем погрешность, вносимую данным фактором.

Исходя из проведенных исследований, было выявлено, что аппаратные ограничения оказывают наибольшее влияние на восстановление $\sigma_{эфф}$ и являются неотъемлемой частью систематической погрешности при измерении. По этой причине моделирование для двух из последних случаев проводилось как с учетом влияния зеркальной компоненты, так и с учетом аппаратных ограничений одновременно. Результаты для «р» и «s» компоненты, вектора электрической напряжённости, представлены на рис. 7.

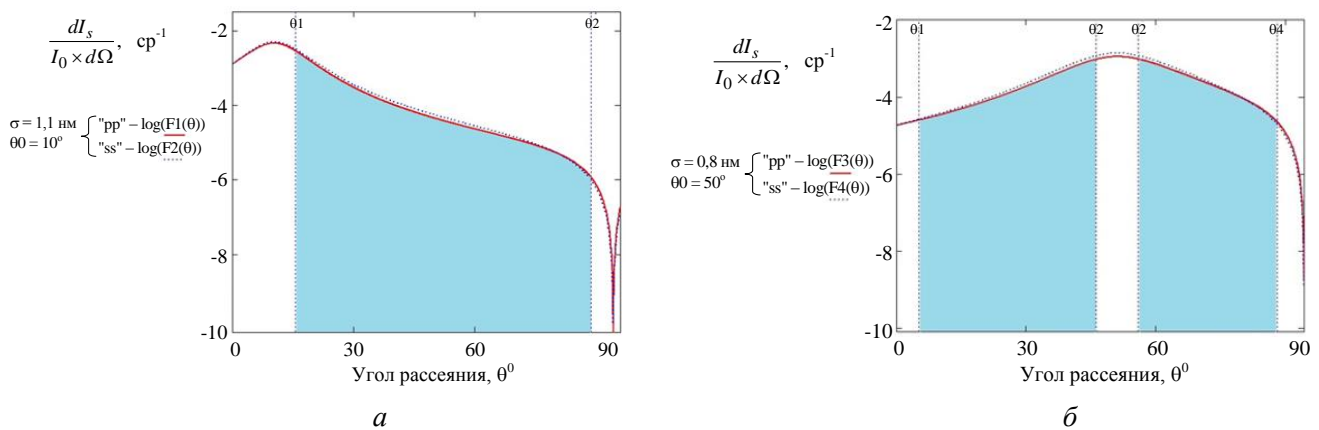


Рис. 7. Графическое представление исследуемых функций с учётом анализа влияния зеркальной компоненты: а – «р» компонента вектора электрической напряжённости рассеянного лазерного излучения; б – «s» компонента вектора электрической напряжённости рассеянного лазерного излучения

Применив указанные ограничения, получаем следующие значения $\sigma_{эфф}$:

Первый случай: $\sigma_{апп+зерк} = 1,11 \text{ нм}$ ($\sigma_{исход} = 1,1 \text{ нм}, l_k = 0,7 \text{ мкм}$).

Второй случай: $\sigma_{апп+зерк} = 0,801 \text{ нм}$ ($\sigma_{исход} = 0,8 \text{ нм}, l_k = 0,6 \text{ мкм}$).

Для наглядности сведём все полученные данные в табл. 2. Погрешность измерений

рассчитывается для исходного значения и значения, полученного при наибольшем влиянии одного из факторов. В обоих случаях таковым является аппаратное ограничение. Стоит отметить, что во многих случаях существенно влияние рассеяния лазерного излучения на молекулах (рассеяния Рэлея).

тегральную погрешность метода дифференциального рассеяния путём их оперативного вычитания на всех стадиях метрологического контроля поверхностных неоднородностей нано- и субнанометрового уровня оптических деталей.

Таблица 2

Полученные результаты по данным литературного источника

№ образца	$\sigma_{\text{исход, нм}}$	$\sigma_{\text{апп, нм}}$	$\sigma_{\text{ш, нм}}$	$\sigma_{\text{апп+зерк, нм}}$	$\Delta\sigma_{\text{max, нм}}$
1	1,1	1,74	1,21	1,11	1,348
2	0,8	2,19	2,12	0,801	2,039

Заключение

Проведенный теоретический анализ показал (см. табл. 2), что предельная относительная среднеквадратическая погрешность метода дифференциального рассеяния для поверхностей кварцевых подложек составила величину порядка 13,5 %. Учёт проанализированных систематических погрешностей позволяет минимизировать результирующую ин-

ЛИТЕРАТУРА

1. Азарова В. В., Дмитриев В. Г., Лохов Ю. Н., Малицкий К. Н. // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 2. С. 71.
2. Азарова В. В., Дмитриев В. Г., Лохов Ю. Н., Малицкий К. Н. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 4. С. 360.
3. Лысенко С. И., Снопко Б. А., Стерлигов В. А., Ширинов Ю. М. // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 91. № 5. С. 852.
4. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1978.
5. Топорец А. С. Оптика шероховатой поверхности. – Л.: Машиностроение, 1988.
6. Elson J. M. // Phys. Rev. B. 1984. Vol. 30. № 10. P. 5460.
7. Электронный ресурс: <https://www.iof.fraunhofer.de/en/competences/coating-and-surface-functionalization.html> (дата обращения: 11.02.2022).

PACS: 03.65.Nk

The analysis of the influence of limiting factors in the method of differential scattering in the control of surface inhomogeneities of the subnanometer level of the profiles of optical parts

D. G. Denisov

Bauman Moscow Technical University
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia
E-mail: denisov_dg@mail.ru

Received February 11, 2022

To achieve high technological quality indicators of various optical parts of a new generation, not only a modern approach to the methods and means of processing parts is necessary, but also the implementation of promising high-precision non-contact diagnostic methods. Particular attention in a single technological chain is occupied by the stages of deep polishing, when the height statistical parameters of the profiles reach nano- and sub-nanometer levels. To diagnose high-altitude statistical parameters of the subnanometer level, various classes of optoelectronic devices and systems are currently used. Of greatest interest in the problems of high-precision certification control are such promising devices and systems as: dynamic interferometers, as

well as devices that allow estimating the root-mean-square value of surface inhomogeneities of the subnanometer level according to the analysis of the scattered laser radiation indicatrix. In world practice, methods based on the analysis of the indicatrices of scattered laser radiation are classified into [1–7]: methods of total integral scattering (TIS–Total Integrated Scattering), methods for determining the distribution function of the reflection coefficient in two angular coordinates (method for determining the characteristic BRDF - Bidirectional Reflectance Distribution Function), differential scattering methods (ARS–Angle-Resolved Scattering). Analysis of the influence of limiting factors in the differential scattering method makes it possible to determine its systematic error by increasing the measurement accuracy.

Keywords: optical control, differential scattering method, scattering indicatrix, scattering coefficient in two angular coordinates, surface irregularities.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-89-96

REFERENCES

1. V. V. Azarova, V. G. Dmitriev, Yu. N. Lokhov, and K. N. Malitsky, *Optical journal* **69** (2), 71 (2002).
2. V. V. Azarova, V. G. Dmitriev, Yu. N. Lokhov, and K. N. Malitsky, *Quantum Electronics* **30** (4), 360 (2000).
3. S. I. Lysenko, B. A. Snopok, V. A. Sterligov, and Yu. M. Shirshov, *Optics and Spectroscopy* **91** (5), 852 (2001).
4. S. M. Rytov, Yu. A. Kravtsov, and V. I. Tatarsky, *Introduction to statistical radiophysics*. Part 2. Random fields: textbook. 2nd ed., revised. and additional (Nauka, Moscow, 1978).
5. A. S. Toporets, *Optics of a rough surface*. (Mechanical engineering, Leningrad, 1988).
6. J. M. Elson, *Phys. Rev. B.* **30** (10), 5460 (1984).
7. Electronic resource: <https://www.iof.fraunhofer.de/en/competences/coating-and-surface-functionalization.html> (accessed 11.02.2022)