

СТАТЬЯ

УДК 535.016

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТИ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН С ПОМОЩЬЮ РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

^{1,2}Подопригора В.Г., ²Раковская С.А.

¹Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, e-mail: podoprigora46@gmail.com

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, e-mail: srakovskaya@sfu-kras.ru

В работе предложен новый способ определения параметров шероховатостей и корреляционной функции (КФ) сверхгладких диэлектрических пластин. Способ основан на нахождении из экспериментальной индикатрисы рассеивания света коэффициентов разложения (КФ) в ряд по системе ортогональных функций с последующим вычислением среднеквадратичных отклонений высот неровностей поверхности σ и периода корреляции T . Отличительными особенностями метода являются: 1) отсутствие неоднозначности, возникающей при подгонке к экспериментальной кривой рассеяния теоретических зависимостей с разными корреляционными функциями, которые сами зависят от параметров шероховатостей; 2) возможность избежать необходимости измерять индикатрису рассеяния во всей полусфере над образцом. Данный способ определения КФ и параметров шероховатости поверхности может применяться для любого типа границ раздела при соблюдении критерия Рэлея, определяющего степень неровности поверхности отражения по отношению к длине волны падающего излучения. Поэтому объектами исследования могут быть не только поверхности с нанометровыми шероховатостями, облучаемые лазерным светом, но и, например, земные покровы при их дистанционном зондировании радиосигналами навигационных спутников. Для полированных пластин кварца получены значения параметров шероховатостей, близкие к аналогичным величинам, измеренным независимо на лазерном интерференционном профилометре другими авторами.

Ключевые слова: неровность поверхности, шероховатость, сверхгладкие пластины, корреляционная функция, индикатриса рассеяния

**DETERMINATION OF PLATES DIELECTRICAL SURFACES
CHARAKTERISTICS BY LIGHT SCATLERING**

^{1,2}Podoprigora V.G., ²Rakovskaya S.A.

¹L.A. Kyrenski Institute of Physics KSK SB RAS, Krasnoyarsk, e-mail: podoprigora46@gmail.com

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: srakovskaya@sfu-kras.ru

The paper proposes a new method for determining the roughness parameters and the correlation function (CF) of supersmooth dielectric plates. The method is based on finding the expansion coefficients (CF) from the experimental light scattering indicatrix in a series according to a system of orthogonal functions, followed by the calculation of the standard deviations of the surface irregularity heights σ and the correlation period T . Distinctive features of the method are: 1) the absence of ambiguity that arises when fitting theoretical dependences with different correlation functions, which themselves depend on the roughness parameters, to the experimental scattering curve; 2) the possibility of avoiding the need to measure the scattering indicatrix in the entire hemisphere above the sample. This method for determining the CF and surface roughness parameters can be used for any type of interface, subject to the Rayleigh criterion, which determines the degree of roughness of the reflection surface with respect to the wavelength of the incident radiation. Therefore, the objects of study can be not only surfaces with nanometer roughness irradiated by laser light, but also, for example, earth covers during their remote sensing by radio signals from navigation satellites. For polished quartz plates, the values of the surface parameters were obtained close to similar values measured independently on a laser interference profilometer by other authors.

Keywords: roughness parameters, surface, correlation function, dielectrical plates, scattering indicatrix

Количественное измерение неровностей поверхности является важной практической задачей во многих областях научно-технической деятельности: приборостроении, нано- и микроэлектронике, методах космического зондирования земных покровов и т.д. Особую роль среди способов определения шероховатости поверхности играют бесконтактные методы контроля, использующие для облучения исследуемого объекта удаленный источник электромагнитных волн (ЭМВ) и соответствующий приемник сигналов. Как правило, форма отражающей поверх-

ности нерегулярна, а высота точек поверхности $W(0,0) = \overline{h_1(x_1, y_1)h_2(x_2, y_2)} = \sigma^2$ является случайной функцией ее координат. Эту случайную поверхность характеризует корреляционная функция (КФ), которая определяется как средняя от произведения ординат двух различных пространственно разнесенных точек поверхности: $h(x, y)$, где σ – среднее квадратическое отклонение высот от среднего уровня поверхности. На практике часто бывает необходимо знание и другого параметра шероховатости – интервала (радиуса) корреляции T – характерного

расстояния, на котором КФ W поверхности существенно меняется. Величина T зависит от отношения σ к длине волны излучения λ . Электромагнитное поле, рассеянное на поверхности, также является случайной функцией пространственных координат и времени. Ансамбль реализации этой случайной функции есть совокупность ЭМВ, возникающих при дифракции на неровностях поверхности. Поэтому свойства дифференциальной функции распределения вероятностей значений амплитуд рассеянного поля в разных точках пространства аналогичны свойствам плотности распределения высот неровностей поверхности. Актуальной является следующая задача: по статистике рассеянных ЭМВ определить параметры шероховатостей и их влияние на рассеяние сигналов.

Метод, основанный на анализе индикатрис рассеянного света, является весьма эффективным для определения электрооптических и геометрических характеристик поверхностей. В большинстве случаев эти параметры поверхности измеряются в независимых экспериментах, а способ определения параметров шероховатостей с использованием разных наборов корреляционных функций не всегда отличается корректностью.

В настоящей работе предлагаются эффективный метод определения корреляционной функции (КФ) сверхгладкой поверхности с помощью описанного ранее [1] поляризационного рефлектометра, а также способ нахождения на том же приборе среднеквадратического отклонения высот неровностей σ^2 , корреляционной длины T и диэлектрической постоянной ε приповерхностных слоев.

Подход основан на выводах теории малых возмущений, применимой при малых флуктуациях параметров среды и малых интенсивностях рассеянного света по отношению к интенсивности падающего. В качестве одного из важных критериев применимости этого приближения, определяющего способ определения неровностей и степень их влияния на характеристики отражения и рассеяния, используется известный критерий $\sigma / \lambda \ll 1$.

Согласно теории рассеяния, интенсивность I диффузной составляющей отраженного от поверхности образца света с длиной волны $\lambda \gg \sigma$ пропорциональна оптическому фактору Q , зависящему от величины ε и геометрии опыта, а также спектральной плотности $\tilde{W}(k)$ КФ $W(\rho)$ [2]:

$$I_{p,s} = Q_{p,s}(\psi, \theta, \varepsilon) \tilde{W}(k) \quad (1)$$

$$\tilde{W}(k) = 1/4\pi^2 \int_0^\infty W(\rho) \exp(-ik_1 \rho) \rho d\rho, \quad (2)$$

где ρ и k – модули радиус-вектора частицы и разности волновых векторов рассеянного и падающего света, $k_1 = 2\pi / \lambda \times (\sin \theta - \sin \psi)$, индексы p и s отличают p и s – поляризацию, ψ и θ – углы падения и рассеяния. Используя выражение (1), можно получить данные о параметрах шероховатостей поверхности образца, связанные с видом КФ (множитель \tilde{W}), или диэлектрической проницаемости ε (значение Q). Рассмотрим оба случая по отдельности.

Определение КФ и параметров шероховатостей поверхности

Как известно, существуют по меньшей мере два метода нахождения КФ [2, 3] из эксперимента по рассеянию света. Первый метод состоит в подборе КФ из набора заданных аналитических выражений с последующим вычислением интеграла (2). Сравнивая затем полученную теоретическую зависимость $I(\theta)$ с экспериментальной индикатрисой рассеяния, выбирают ту КФ, которая лучше описывает эксперимент. Второй метод заключается в вычислении функции $W(\rho)$ как преобразования, обратного (2), и дальнейшей ее аппроксимации. Недостатками этих методов являются, соответственно, неоднозначность в выборе КФ, зависящей от параметров шероховатостей, и необходимость знать индикатрису рассеяния во всей полусфере, так как Фурье-преобразование предполагает интегрирование по всей области определения ρ . В большинстве экспериментов рассеянное излучение измеряется в плоскости падения, поэтому данных эксперимента не хватает для определения $W(\rho)$ из обратного Фурье-преобразования (2). Рассмотрим другое решение этой задачи.

Уравнение (2) является, по сути, однородным уравнением Фредгольма второго рода, в котором $W(\rho)$ является искомой функцией, а $[\exp(-ik_1 \rho) \rho]$ – ядром. Представим КФ $W(\rho)$ в виде ряда по системе ортогональных функций $J_j(\rho)$ j -го порядка:

$$W(\rho) = \sum_{j=0}^{\infty} B_j J_j(\rho), \quad (3)$$

где B_j – коэффициенты разложения, которые необходимо найти. Подставив уравнение (3) в (2), получим:

$$\tilde{W}(k) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty \sum_{j=0}^{\infty} B_j J_j(\rho) \exp(-ik_1 \rho) \rho d\rho, \quad (4)$$

Поменяв местами порядок суммирования и интегрирования, будем иметь:

$$\tilde{W}(k) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} B_j N_j(k), \quad (5)$$

$$N_j(k) = \int_0^{\infty} \exp(-ik_1\rho) J_j(\rho) d\rho, \quad (6)$$

есть Фурье-образы выбранных функции $J_j(\rho)$. В качестве системы данных ортогональных функций J возьмем модифицированные функции Лагерра:

$$\ln \rho = L_n(\rho) e^{-\rho/2}. \quad (7)$$

Фурье-образами (6) этих функций являются многочлены Якоби $P_n^{(0,1-n)}$, составляющие также ортогональную систему с весовой функцией $f(\rho)$:

$$f(\rho) = \rho^{-n} (1-\rho)^{n-1}. \quad (8)$$

Теперь уравнение (5) будет иметь вид:

$$\tilde{W}(k) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} B_j P_j^{(0,1-j)}. \quad (9)$$

Откуда, используя ортогональность функций Якоби, можно определить коэффициенты B_j :

$$B_j = 4\pi^2 \int_0^{\infty} \tilde{W}(k) P_j^{(0,1-j)}(k) f(k) dk. \quad (10)$$

Минимизируя по параметрам B_j разницу между экспериментальной индикатрисой

и кривой, рассчитанной с использованием \tilde{W} из (9), получим искомые коэффициенты разложения КФ. Подставляя их в уравнение (3), найдем $W(\rho)$. Данный способ определения КФ достаточно корректен и упрощает эксперимент.

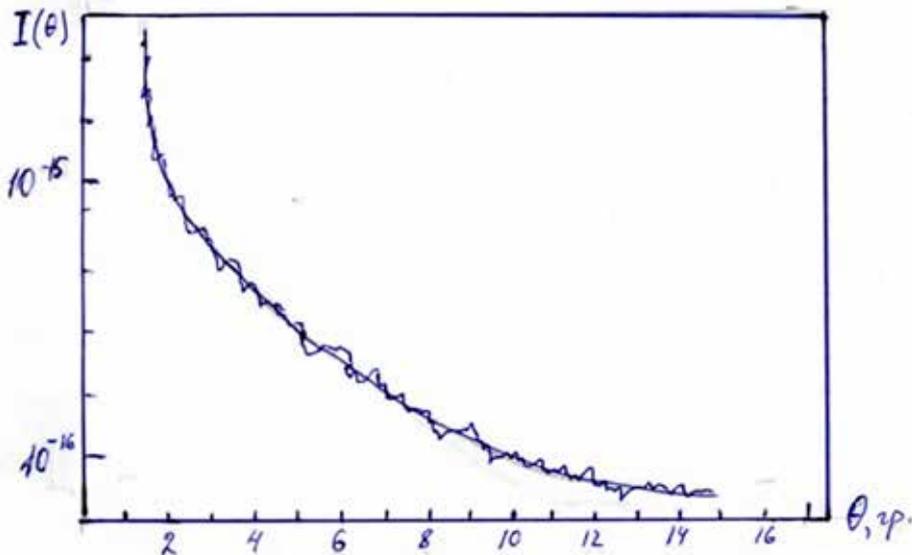
Параметры шероховатостей σ^2 и T могут быть найдены из известных условий нормировки, накладываемых на КФ:

$$\sigma^2 = W(\rho) \Big|_{\rho=0}. \quad (11)$$

$$2\pi\sigma^2 T^2 = 2\pi \int_0^{\infty} W(\rho) \rho d\rho.$$

Предлагаемый способ определения КФ и параметров шероховатостей поверхности, а также методика измерений реализованы на описанной ранее в [1] установке. Объектами исследования служили отполированные кварцевые пластины, а также стеклянные подложки (основы магнитооптических дисков для записи и считывания информации).

На рисунке показаны результаты минимизации функции $(I_{\text{эксп.}} - I_{\text{теор.}})$ для света $\lambda = 0,628 \text{ мкм}$, рассеянного полированной поверхностью кварцевой пластинки. Видна очень хорошая сходимость процесса, что позволило достаточно быстро получить значения КФ и параметров шероховатостей поверхности: $\sigma^2 = 0,0030 \text{ мкм}$, $T = 1,6 \text{ мкм}$. Близкие значения этих параметров получены независимым методом при сканировании поверхности данного образца на лазерном интерференционном профилометре [4].



Экспериментальная индикатриса рассеяния и кривая, полученная в результате минимизации функции $(I_{\text{эксп.}} - I_{\text{теор.}})$ для полированной пластинки кварца

Определение диэлектрической проницаемости поверхности

Поскольку пространственный спектр высот неровностей поверхности не зависит от условий поляризации падающего света, то, вычисляя по (1) отношения интенсивностей s - и p -рассеянного света, мы получим простую формулу для определения из эксперимента величины ε при заданных углах падения и рассеяния света:

$$J_s / J_p = Q_s(\psi, \theta, \varepsilon) / Q_p(\psi, \theta, \varepsilon), \quad (12)$$

где, как известно:

$$Q_s = (\varepsilon - 1) / \left(1 + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Psi}\right) \left(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}\right), \quad (13)$$

$$Q_p = \frac{(\varepsilon - 1) \left(\varepsilon \sin \psi \sin \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \psi} \cdot \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}\right)}{\left(\varepsilon \cos \psi + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \psi}\right) \left(\varepsilon \cos \theta - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}\right)}. \quad (14)$$

Прибор устроен таким образом, что анализируется только свет, рассеянный от передней грани прозрачного образца. Измеренные в разных точках исследуемой поверхности отношения интенсивностей I_s / I_p в пределах 10%-ной ошибки оказались примерно одинаковыми. Это позволило найти среднее по образцу значение диэлектрической постоянной приповерхностного слоя. Для отполированных пластинок кварца и стекла эти значения равны 2,33 и 1,83, что меньше значений ε в объеме (2,40 и 2,18 соответственно), определенных при той же частоте падающего света. Уменьшение величины ε на поверхности по сравнению с объемом может быть обусловлено релаксацией и реконструкцией поверхности вследствие изменения структуры и внутреннего поля, а также обработки образца [5].

Данный способ определения корреляционной функции и параметров шероховатостей поверхности с использованием экспериментальной индикатриссы рассеяния может быть использован для любого типа границ раздела при соблюдении критерия Рэлея, определяющего степень неровностей поверхности отражения. Если условие Рэлея $\sigma / \lambda < 1 / (16 \sin \psi)$ (где $\psi = \frac{\pi}{2} - \theta$ – угол скольжения) выполняется, то отражающую поверхность можно считать квазигладкой

(набег фаз на возмущениях σ чрезвычайно мал), и тогда выводы лежащей в основе метода теории малых возмущений справедливы в полной мере. Способ может применяться не только для объектов с нанометровыми шероховатостями, облучаемых светом, но и, например, в радиолокационных методах зондирования земных покровов сигналами навигационных спутников L-диапазона. Следует отметить, что отраженная электромагнитная волна формируется не в одной точке, а в пределах области, ограниченной первой зоной Френеля, где излучение когерентно. Именно в пределах этой области необходимо учитывать степень шероховатости отражающей поверхности.

Список литературы

1. Подопригра В.Г., Кабанов И.С., Сургутанов И.В. Измерение параметров шероховатости прозрачных диэлектрических пластин // Метрология. 1991. № 2. С. 191-196.
2. Elson J.M., Retchir K.H. Theory of Scattering of Electromagnetic Waves from Surfaces // Phys. Stat. Sol. B. 1974. V. 62. P. 461-468.
3. Топорев А.С. Оптика шероховатостей поверхности. Л.: Машиностроение, 1988. 429 с.
4. Гоняев В.С., Фроленко В.А., Шестаков Н.П., Шешуков А.П. Автоматизированного интерференционный профилограф // Автометрия. 1987. № 5. С. 50-56.
5. Караванов В.В., Сахновский М.Ю. Влияние качества полировки поверхности монокристаллов на их оптические константы // Журнал прикладной спектроскопии. 1996. Т. 44. № 4. С. 623-627.