АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им.Л.В.КИРЕНСКОГО

Препринт № 456Ф

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ СВЕРХГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ РАССЕЯНИЯ СВЕТА

И.С.Кабанов, В.Г.Подопригора, И.В.Сургутанов

Красноярск 1988

УДК 535.8
(088.8)

А Н Н О Т А Ц И Я

Описана экспериментальная установка для определения высотного и шагового параметров шероховатости сверхгладких поверхностей с помощью измерения индикатрисы диффузного рассеяния света. Исследована шероховатость диэлектрических и металлических образцов. Определены влияние оптического и поверхностного факторов на параметры шероховатости, корреляционная функция поверхностей полированных кристаллов кварца и ниобата лития. Предложено записывать последнюю в виде суммы функций Гаусса и экспоненциальной, что соответствует большинству реальных диэлектрических поверхностей, имеющих как плавные, так и резкие неровности.

I. Введение

Количественное измерение микронеровностей поверхности является важной практической задачей. Контроль качества обработки поверхности играет решающую роль при производстве изделий микроэлектроники, лазерных зеркал, оптических дисков для записи информации, монокристаллических подложек и т.д. Это не только практическая, но и научная проблема, поскольку определение отклонения поверхности от идеально гладкой позволяет изучать роль шероховатости в гигантском комбинационном рассеянии света на поверхности, усиленной поверхностью генерации второй оптической гармоники, в ориентации подложкой жидкого кристалла, усилении эффективности (КПД) фотопроводников и солнечных батарей.

Сверхгладкими называются поверхности, для которых отношение среднеквадратичной высоты неровностей δ к длине волны λ излучения (так называемая, оптическая неоднородность) много меньше I.

Из существующих методов исследования сверхгладких неровных поверхностей наиболее перспективными и удобными являются оптические. Хорошую точность дают интерферометрические средства измерения шероховатости: многолучевой интерферометр, интерферометр Тваймана-Грина, интерферометр сдвига Жамена, многолучевой сканирующий интерферометр ФИЗО и другие приборы [I] . Оригинальное решение имеет профилометр [2] , построенный на основе автоматизированного интерферометра, в котором измерение сдвига интерференционных полос, обусловленного неровностями поверхности, производится путем измерения временного интервала между опорным импульсом и первым нулем интерференционного сигнала. Однако для быстрого измерения параметров шероховатости при решении инженерных задач более удобным является бесконтактный рефлектометрический метод, дополняющий интерферометрический. Его достоинствами является высокая скорость измерений, возможность получить не только высоту, но и пространственный период шероховатостей; он прост и легко поддается автоматизации, а условия измерения совпадают с условиями эксплуатации оптических поверхностей.

Как хорошо известно, рассеяние света возникает в результате появления в рассеивающей среде или на рассеивающей поверхности оптических неоднородностей. Среда может стать оптически неоднородной в результате посторонних включений и примесей, при геометрических отклонениях рассеивающих объемов и площадок от идеальных, при флуктуациях оптической диэлектрической проницаемости вещества. Первое исследование молекулярного рассеивания света на частицах, размеры которых много меньше λ, провел Рэлей, и несмотря на несовершенство его теории, она дала правильный результат для газов. В общем виде решение задачи о рассеянии на оптических неоднородностях, много меньших длины возбуждающего света, имеет вид [3]:

$$J = J_0 \pi^2 V_1 V / 2R^2 \lambda^4 \cdot \overline{\Delta \varepsilon^2} (1 + \cos^2 \theta), \qquad (I)$$

где J_0 - интенсивность падающего света, R - расстояние до точки наблюдения, V - весь рассеивающий объем, θ - угол рассеяния, объем одной частицы $V_1 \ll \lambda^3$, но больший по сравнению с радиусом межмолекулярного взаимодействия. Измерение $\Delta\varepsilon$ диэлектрической проницаемости среды является мерой оптической неоднородности и определяет интенсивность J рассеяния света.

В настоящее время существуют два подхода для теоретического описания рассеяния электромагнитных волн на сверхгладких поверхностях: скалярный и векторный. Первый из них [4] учитывает только статистические свойства поверхности, второй [5,6], помимо этого, учитывает оптические постоянные материала, поляризационные соотношения падающего и отраженного излучения, взаимодействия с плазмонами поверхности. И в скалярной, и в векторной теории интенсивность рассеянного света зависит от так называемой корреляционной функции (КФ) поверхности (см.ниже), которая выбирается исходя из данной модели поверхности или определяется независимо. Однако векторную теорию пока не используют в инженерных приложениях, так как экспериментальное подтверждение теоретических параметров, входящих в расчетные формулы, представляет определенные трудности. Различия в угловых зависимостях интенсивностей рассеяния, полученных теоретически и экспериментально, в большей мере определяется отличием КФ реальных поверхностей от принятых при расчетах.

Задачей настоящей работы является выбор теоретической модели для исследования рассеяния света на полированных диэлектрических прозрачных пластинах, одна из поверхностей которых сверхгладкая, определение вида КФ и разработка метода для практического определения высотного и шагового параметров шероховатости таких поверхностей.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА СЛУЧАЙНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В случае периодических неровностей (двумерные кристаллы, дифракционные решетки) задачи нахождения их параметров может быть

решена точно. Однако, даже небольшие нарушения периодичности приводят к новым явлениям, например, смазыванию дифракционных максимумов, и в этом случае точного решения не существует. При решении практических задач достаточно знать средние значения параметров отраженного сигнала, усредненные по ансамблю поверхностей. Поэтому ищется не точное решение, а приближенное для некоторых средних характеристик рассеянного света для целого ансамбля образцов, причем каждая отражающая поверхность из этого ансамбля может рассматриваться как одна из реализаций некоторой случайной функции координат и времени.

Пусть уравнение поверхности имеет вид $z = s(x,y,t) = s(\bar{\rho},t)$ где функция $s(x,y,t)$ - однозначная и достаточно гладкая. С точки зрения теории вероятностей случайная поверхность $s(x,y,t)$ представляет собой континуум случайных величин высот точек поверхности S с координатами x и y в момент t. В общем случае полное статистическое описание поверхности трудно получить и ограничиваются её приближенным описанием с помощью набора величин, усредненных по ансамблю реализаций случайной функции. Рассмотрим эти величины для стационарной, изотропной и эргодической поверхности, вид которой показан на рис.I. $s(x',y')$ и $s(x+x, y+y)$ высоты точек M′ и M над плоскостью P, т.е. характеризует высоту поверхности.

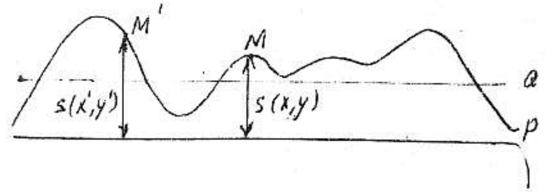

Рис.I.

Среднее значение $\bar{s}(\bar{\rho})$ (момент первого порядка) вычисляется с помощью плотности вероятностей $f(s)$:

$$\bar{s}(\rho) = \iint_{-\infty}^{\infty} s\, f(s)\, ds \qquad (2)$$

Для статистически однородной поверхности $\bar{S}$ не зависит от x и y, т.е. в среднем такая поверхность плоская и $\bar{S}(\bar{\rho}) = 0$. При этом $\bar{S}(\bar{\rho}) = \overline{S(x',y')} = \overline{S(x'+x, y'+y)}$. Если определять высоту $h(x',y')$ точки M' относительно средней поверхности Q, то $h(x',y') = S(x',y') - \bar{S}$. Для M имеем $h(x'+x, y'+y) = S(x'+x, y'+y) - \bar{S}$.

Среднее квадратичное отклонение (дисперсия) поверхности относительно среднего уровня:

$$\overline{h^2(\bar{\rho})} = \sigma^2 = \iint_{-\infty}^{\infty} h^2 f(h,\bar{\rho})\, dh \qquad (3)$$

σ характеризует разброс высот h поверхности относительно плоскости $z = 0$.

Корреляционная функция $W(MM')$ определяется как среднее от произведения ординат в двух различных пространственно разнесенных точках поверхности:

$$W(\rho_1, \rho_2) = \overline{S(\rho_1)S(\rho_2)} = \iint_{-\infty}^{\infty} [S(\rho_1) - \bar{S}][S(\rho_2) - \bar{S}]\, W(S_1,\rho_1; S_2,\rho_2)\, dS_1\, dS_2 \qquad (4)$$

где $W(S_1,\rho_1; S_2,\rho_2)$ - плотность вероятности. Если высоту шероховатости измерять относительно средней плоскости, $\bar{S} = 0$, и

$$W(\rho_1,\rho_2) = \iint S(\rho_1)S(\rho_2)\, W(S_1,S_2)\, dS_1\, dS_2 \Rightarrow \qquad (5)$$

$$\overline{h(x'+x, y'+y)h(x',y')} = \iint h(x'+x, y'+y)\, h(x',y')\, W(h_1,h_2)\, dh_1\, dh_2$$

Если поверхность случайная и не содержит регулярной составляющей, то при большом разнесении точек M и M' величин $h(\rho_1)$ и $h(\rho_2)$ станут независимыми и корреляция между ними исчезает, т.е.

$$\lim W(\rho_1,\rho_2) = 0 \quad при \quad |M - M'| \to \infty$$

Если в уравнении (5)

$$x = y = 0, \text{ то } \quad W(0,0) = \overline{h^2(x',y')} = \sigma^2 \qquad (6)$$

Величина σ характеризует шероховатость в направлении, перпендикулярном плоскости поверхности. Часто бывает важным другой параметр-радиус (интервал) корреляции (его называют еще длиной автокорреляции) T - характерное расстояние, на котором корреляционная функция W поверхности существенно изменяется, т.е. средняя длина, на которой точки M и M' шероховатой поверхности уже не зависят друг от друга. Эта величина не является однозначно

определенной. Так, в [7] для крупномасштабных неровностей радиус корреляции вводится соотношением:

$$\pi T^2 = \iint_{-\infty}^{\infty} W(x,y)\, dx\, dy. \qquad (7)$$

Если поверхность статистически изотропна, то величина T, определяемая из (7), является радиусом круга, внутри которого отклонения поверхности от средней плоскости $z = 0$ коррелируют. Таким образом, величина T совпадает по порядку величины с линейными размерами крупномасштабных неровностей поверхности.

Для очень малых неровностей радиус корреляции определяется из соотношения [8]

$$\Delta_\rho W(\rho)_{\rho=0} = \frac{1}{T^2} \qquad (8)$$

При таком определении T оказывается связанным с линейными размерами мелкомасштабных шероховатостей, которые и определяют остроту корреляционной функции при малых аргументах.

Большую роль играет преобразование Фурье от корреляционной функции - $\tilde{W}$, которое называется пространственным спектром случайной поверхности.

Для поверхности $z = S(\bar{\rho}, t)$, $\bar{\rho} = \{x, y\}$,

$$W(\bar{\rho}, \tau) = \overline{S(\bar{\rho}+\bar{\rho}', t+\tau)S(\bar{\rho}, t)} = \int_{-\infty}^{\infty} d^2k \int_{-\infty}^{\infty} d\omega\, \tilde{W}(\bar{k},\omega)\, e^{i(\bar{k}\bar{\rho} - \omega\tau)} \qquad (9a)$$

$$\tilde{W}(\bar{k},\omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} d^2\rho \int d\tau\, W(\bar{\rho}',\tau)\, e^{+i(\omega\tau - \bar{k}\bar{\rho})} \qquad (9б)$$

Если шероховатость поверхности рассматривать как случайный процесс, не зависящий от времени, то

$$W(\bar{\rho}) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\bar{k})\, \exp(i\bar{k}\bar{\rho})\, d^2\bar{k} \quad \text{и} \qquad (10а)$$

$$\tilde{W}(\bar{k}) = (2\pi)^{-3} \int_{-\infty}^{\infty} W(\bar{\rho})\, \exp(-i\bar{k}\bar{\rho})\, d^2\bar{\rho} \qquad (10б)$$

Функция $\tilde{W}(\bar{k})$ называется пространственной спектральной плотностью или пространственным спектром поверхности. Для изотропного однородного случайного поля $\tilde{W}$ зависит только от модуля