

О ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА TIS ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СВЕРХГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО РАССЕЯНИЮ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Виноградов, И.В. Кожевников, М.М. Митропольский, В.А. Слемзин

Обсуждаются условия применимости метода интегрального рассеяния рентгеновского излучения (TIS) для исследования поверхностных шероховатостей. Показано, что метод TIS дает лишь грубую оценку среднеквадратичной высоты шероховатости и не может служить основой для количественного описания микрогеометрии поверхности.

Для изучения сверхгладких поверхностей используется подход, основанный на измерениях интегральной интенсивности рассеяния рентгеновского излучения (TIS – Total Integral Scattering) [1–5]. В методе TIS предполагается, что интегральная интенсивность рассеяния I_S полностью определяется среднеквадратичной высотой поверхностных шероховатостей ξ :

$$S(\theta_0) = I_S / I_0 = R_F - R = R_F \{1 - \exp(- (4\pi \xi \sin \theta_0 / \lambda)^2)\} \approx R_F(\theta_0) (4\pi \xi \sin \theta_0 / \lambda)^2, \quad (1)$$

где S – коэффициент интегрального рассеяния; I_0 – интенсивность падающего пучка; λ и θ_0 – соответственно длина волны и угол скольжения падающего излучения; R_F и R – соответственно коэффициенты отражения от идеально гладкой и шероховатой поверхностей.

Метод TIS привлекателен простотой проведения измерений и обработки экспериментальных данных, а также высокой чувствительностью, позволяющей обнаруживать шероховатости высотой в доли нанометра [1]. В формулу (1) входит лишь среднеквадратичная высота ξ и не входит корреляционная функция высот шероховатостей, что создает впечатление универсальности метода TIS. Однако результаты работ [3–5] свидетельствуют об ограниченной применимости выражения (1), что проявляется в зависимости высоты шероховатостей ξ TIS, найденной из экспериментальных данных по формуле (1), как от угла скольжения θ_0 падающего пучка, так и от его длины волны λ . Объяснение этих результатов дано в [6, 7].

Цель настоящей заметки – экспериментальное изучение и интерпретация индикатрисы рентгеновского рассеяния сверхгладкими поверхностями, исследование применимости формулы (1) и обсуждение физических и аппаратурных факторов, которые следует принимать во внимание.

Были проведены измерения индикатрис рассеяния мягкого рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda = 4,47$ нм от никелевой пленки толщиной 100 нм, напыленной на подложку из стекла. Для определения ξ по методу TIS в измеренных индикатрисах выделялась зеркальная компонента и проводилось интегрирование рассеянного излучения по углу. В пределах зеркально отраженного пучка интенсивность рассеяния полагалась постоянной. На рис.1 показана зависимость высоты шероховатостей ξ_{TIS} , рассчитанной с помощью формулы (1), от угла скольжения θ_0 падающего пучка. Наличие такой зависимости свидетельствует о неприменимости выражения (1), а следовательно, и метода TIS в условиях данного эксперимента.

Более полную информацию о микрогеометрии шероховатой поверхности можно извлечь из анализа углового распределения рассеянного излучения. Как показано в [6, 7], по измеренной индикатрисе рентгеновского рассеяния может быть найден спектр поверхностных шероховатостей $\chi_c(p)$, связанный с функцией корреляции их высот $X(\rho)$ косинус-преобразованием Фурье:

$$\chi_c(p) = \sqrt{2/\pi} \int_0^{\infty} X(\rho) \cos(p\rho) d\rho, \quad (2)$$

где $p = 2\pi |\cos \theta - \cos \theta_0| / \lambda$, θ – угол наблюдения, отсчитываемый в плоскости падения. Величина $\chi_c(p)$ связана с индикатрисой, проинтегрированной по азимутальному углу. Именно такая индикатриса фактически измеряется в рентгеновских экспериментах. Вид спектра шероховатостей для исследованного образца, рассчитанный по индикатрисам рассеяния при разных θ_0 , показан на рис.2. Разброс экспериментальных точек обусловлен статистикой числа импульсов при измерении индикатрис.

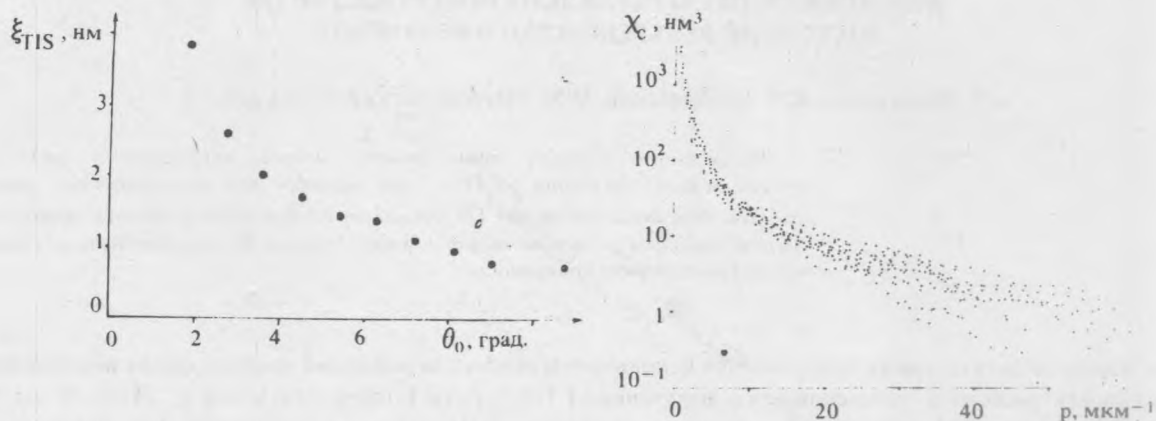


Рис.1. Экспериментальные значения средневквдратичной высоты поверхностных шероховатостей ξ_{TIS} никелевого образца, определенные по методу TIS для различных углов скольжения $\theta_0 = 1,8^\circ \div 10,8^\circ$ падающего пучка ($\lambda = 4,47$ нм).

Рис.2. Спектр поверхностных шероховатостей $\chi_c(p)$ для того же образца, что и на рис.1, найденный по измеренным индикатрисам рассеяния.

Полученный спектр шероховатостей можно аппроксимировать суммой двух экспоненциальных функций:

$$\chi_c(p) = \sqrt{\pi/2} \sum_{i=1}^2 \xi_i^2 a_i \exp(-pa_i), \quad (3)$$

где с учетом разброса экспериментальных точек $a_1 = (1,5 \pm 0,2)$ мкм, $\xi_1 = (1,90 \pm 0,15)$ нм, $a_2 = (0,100 \pm 0,035)$ мкм, $\xi_2 = (0,72 \pm 0,13)$ нм. Поэтому можно считать, что на исследуемой поверхности существуют две системы шероховатостей с различными средневквдратичными высотами и радиусами корреляции, рассеяние от которых складывается аддитивно. Среднее значение высоты шероховатостей составляет $\langle \xi \rangle = (\xi_1^2 + \xi_2^2)^{1/2} \approx 2$ нм.

Как показано в [6, 7], коэффициент интегрального рассеяния определяется выражением (1) лишь в том случае, если радиус корреляции высот поверхностных шероховатостей достаточно велик ($a \gg \lambda/\pi \theta_c^2$, где θ_c – критический угол полного внешнего отражения), а угол скольжения падающего пучка не слишком мал ($\theta_0 > \sqrt{\lambda/\pi a}$). Если же хотя бы одно из этих условий не выполнено, то характер рассеяния меняется, а коэффициент S становится пропорциональным углу скольжения θ_0 в первой степени (а не θ_0^2 , как в формуле (1)) и оказывается зависящим от радиуса корреляции а:

$$S \approx \sqrt{2\pi} k^2 \xi^2 \theta_0 / \sqrt{ka}: a \gg \lambda / \pi \theta_c^2, \theta_0 < \sqrt{\lambda / \pi a}, \quad (4)$$

$$S \approx \sqrt{\pi/8} k^2 \xi^2 \sqrt{ka} |1 - \epsilon_+| \sin \theta_0: a \ll \lambda / \pi \theta_c^2, \theta_0 < \theta_c, \text{Re}(1 - \epsilon_+) \gg \text{Im} \epsilon_+. \quad (5)$$

Поэтому если в таких условиях высоту шероховатостей определить по методу TIS, то она окажется зависящей от угла скольжения θ_0 падающего пучка и будет возрастать как $\theta_0^{-1/2}$ при его уменьшении.

Учтем, что падающий на образец пучок имеет конечную угловую ширину. Ясно, что в некотором интервале углов наблюдения $\theta \in [\theta_0 - \Delta\theta/2, \theta_0 + \Delta\theta/2]$, где интенсивность зеркально отраженного пучка сравнима с интенсивностью рассеянного излучения или превосходит ее, величину рассеяния определить невозможно (поскольку нельзя отличить рассеянный рентгеновский фотон от зеркально отраженного). Если положить интенсивность рассеяния внутри зеркального пика постоянной, то коэффициент интегрального рассеяния принимает вид:

$$S = (4\pi\xi \sin \theta_0 / \lambda)^2 R_F(\theta_0) (1 + p_{\min} a) \exp(-p_{\min} a), \quad (6)$$

где $p_{\min} \approx \pi \Delta\theta \sin \theta_0 / \lambda$, $a \gg \lambda / \pi \theta_0^2$, $\theta_0 > \sqrt{\lambda / \pi a}$, и тем сильнее отличается от (1), чем больше угол скольжения θ_0 , причем высота шероховатостей, будучи определенной по методу TIS, уменьшается при увеличении θ_0 . Это связано с тем, что в условиях применимости выражения (6) угловая ширина индикатрисы рассеяния составляет $\Delta\theta \cong \lambda / \pi a \theta_0 / 6, 7/$. Поэтому при увеличении θ_0 индикатриса рассеяния сужается, все большая часть рассеянного излучения оказывается внутри зеркально отраженного пучка и не может быть зафиксирована в эксперименте.

Выражения (4)–(6) для коэффициента интегрального рассеяния и найденный из эксперимента вид спектра шероховатостей (3) позволяют определить условия применимости метода TIS и объяснить результаты, представленные на рис. 1.

Возрастание высоты шероховатостей ξ_{TIS} , найденной в условиях данного эксперимента по методу TIS, при малых углах скольжения θ_0 связано с переходом от формулы (1) к выражению (4). Этот переход происходит при $\theta_0 \cong 2^\circ$ для системы шероховатостей с большим радиусом корреляции ($a = a_1 = 1,5$ мкм) и при $\theta_0 \cong 7^\circ$ для системы шероховатостей с малым радиусом корреляции ($a = a_2 = 0,1$ мкм). Уменьшение величины ξ_{TIS} до значения $\xi_2 = 0,72$ нм при больших углах скольжения θ_0 связано с неполным учетом части рассеянной компоненты, находящейся в пределах зеркального пика.

Таким образом, метод TIS справедлив лишь в том случае, если корреляционный радиус шероховатостей исследуемой поверхности велик: $a \gg \lambda / \pi \theta_0^2$. При этом съемку следует производить так, чтобы угол скольжения зондирующего пучка был достаточно большим ($\theta_0 > \sqrt{\lambda / \pi a}$), а его угловая ширина малой ($\Delta\theta \ll \lambda / \pi a \theta_0$). Так как a priori микрогеометрия поверхности неизвестна, то величина ξ_{TIS} может сильно отличаться от истинного значения среднеквадратичной высоты шероховатостей и зависеть от угла скольжения и длины волны падающего излучения (рис. 1). Тем самым, метод TIS даёт лишь грубую оценку ξ и не может использоваться для изучения статистических свойств шероховатых поверхностей. Тем не менее, этот метод вполне применим при сравнительном исследовании качества различных рентгенооптических элементов, а также в тех случаях, когда важно знать не непосредственно микрогеометрию отражающих поверхностей, а величину интегрального рассеяния в заданный телесный угол при фиксированных λ и θ_0 .

Авторы благодарны Н.Н. Зореву за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. De Korte P. A. J., Laine R. Appl. Opt., 18, 236 (1979).
2. Брытов И.А., Грудский А.Я., Слемзин В.А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 16 (1980).
3. Zombek M.V. et. al. Proc. SPIE, 316, 174 (1981).
4. Aschenbach B. et. al. Proc. SPIE, 257, 223 (1980).
5. Herring J.R.H. Appl. Opt., 23, 1156 (1984).
6. Виноградов А.В. и др. ЖЭТФ, 94, 203 (1988).
7. Виноградов А.В. и др. Препринт ФИАН № 319, М., 1986.

Поступила в редакцию 13 июля 1989 г.