

О ВЛИЯНИИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА НА  
РАССЕЯНИЕ УЛЬТРАМЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И. А. Брытов, А. Я. Грудский, В. А. Слемзин

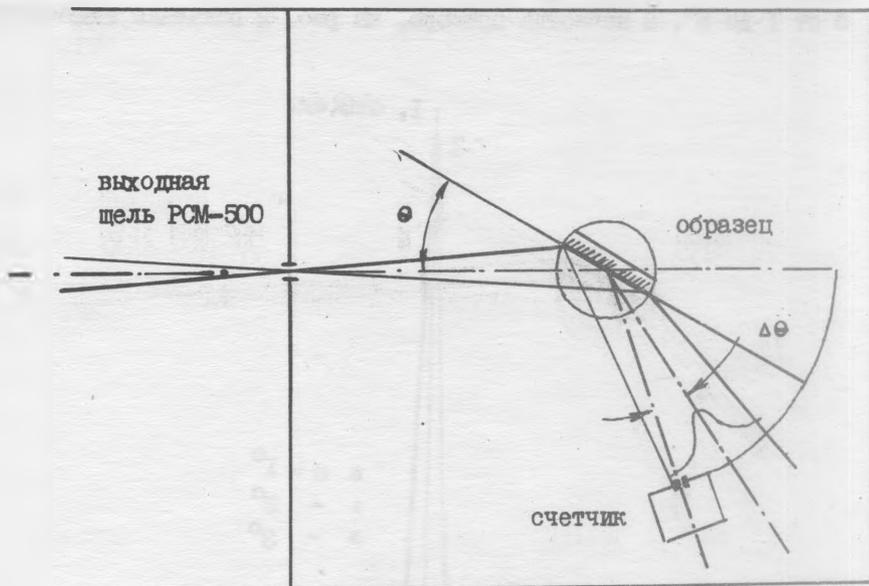
УДК 535.394 : 537.531

Экспериментально исследовано рассеяние ультра-  
мягкого рентгеновского излучения с длиной волны

$\lambda = 44 \text{ \AA}$  при отражении от полированных поверхно-  
стей с различной шероховатостью. Показано, что по  
относительной интенсивности рассеяния при скользя-  
щем падении с помощью теории Бекмана может быть  
оценена среднеквадратическая высота шероховатости.

Для разработки оптимальной технологии изготовления рентге-  
новских зеркал скользящего падения существенное значение имеет  
связь характеристик отражения и рассеяния рентгеновского излу-  
чения со свойствами отражающей поверхности. Наличие такой связи  
отмечалось еще в работах А. П. Лукирского и сотрудников /1/, Стю-  
ардсона и Андервуда /2/. В работе /3/ впервые было показано, что  
интенсивность и угловое распределение рентгеновского излучения  
с длиной волны  $\lambda = 8 - 13 \text{ \AA}$ , рассеянного на сверхполированных поверх-  
ностях с шероховатостью  $\sigma \sim 10 \text{ \AA}$  хорошо согласуется с теорети-  
ческой моделью, описывающей рассеяние как чисто поверхностный  
эффект.

С целью проследить зависимость рассеяния ультрамягкого рент-  
геновского излучения (УМР) от шероховатости поверхности, длины  
волны и угла падения пучка, в настоящей работе исследовалось  
рассеяние излучения в области  $\lambda = 44 \text{ \AA}$  на образцах со средне-  
квадратической шероховатостью  $\sigma = 50 \div 200 \text{ \AA}$ . Для этого исполь-  
зовался рентгеновский спектрометр РСМ-500 со специальной каме-  
рой-приставкой /4/, позволяющей устанавливать образец под различ-  
ными углами к выходящему из монохроматора пучку и сканировать  
индикатрису отраженного излучения (рис. 1). В качестве детектора



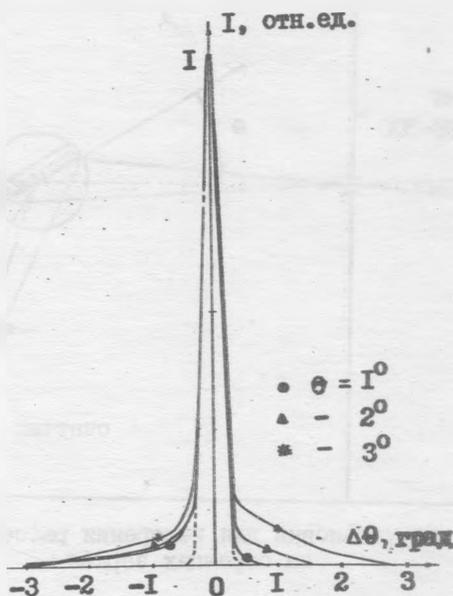
Р и с. 1. Схема установки для измерения рассеяния УМР излучения на образцах зеркал

использовался пропорциональный счетчик А. П. Лукирского с узкой щелью  $\sim 150$  мкм. С учетом ширины падающего на образец пучка и щели счетчика, угловое разрешение составляло по полуширине  $2\Gamma'$ .

Измерения проводились на пяти длинах волн:  $\text{CuL}_\alpha (13,3 \text{ \AA})$ ,  $\text{FeL}_\alpha (17,6 \text{ \AA})$ ,  $\text{VL}_\alpha (24,3 \text{ \AA})$ ,  $\text{TlL}_\alpha (31,4 \text{ \AA})$  и  $\text{СК}_\alpha (44,4 \text{ \AA})$ . Образцы зеркал были изготовлены из никеля полировкой алмазно-пастой различными способами: образец № 1 – мягким полировальником, №№ 2 – 4 – твердым полировальником. На поверхность образца № 4 был напылен в вакууме слой золота толщиной порядка 0,2 мкм. Оценка шероховатости поверхности образцов с помощью микроинтерферометра МИИ-ИИ показала, что величина  $R_z$  (среднеарифметическая высота от впадин до выступов) составляла для образца № 1 порядка 1100  $\text{Å}$ , № 2 – 240  $\text{Å}$ , №№ 3 и 4 – 160 – 200  $\text{Å}$ .

Индикатриса отражения  $I(\Delta\theta)$ , где  $\Delta\theta$  – угол относительно положения максимума зеркального отражения, была измерена для всех 4-х образцов на всех перечисленных длинах волн при значе-

ниях угла скольжения пучка по отношению к поверхности образца  $\theta$  от  $1^\circ$  до  $5^\circ$ . В качестве примера, на рис. 2 показаны индикатрисы



Р и с. 2. Угловое распределение интенсивности отраженного излучения (образец № 4,  $\lambda = 13,3 \text{ \AA}$ )

си отражения для образца № 4 на длине волны  $13,3 \text{ \AA}$ . Отрицательные значения  $\Delta\theta$  соответствуют углам отражения, большим зеркального угла. Для наглядности, индикатрисы приведены к единичной интенсивности в максимуме. Пунктиром показан контур падающего на образец пучка.

Во всех индикатрисах можно выделить центральный максимум зеркального отражения, распределение интенсивности в котором совпадает с распределением в падающем пучке, и крылья рассеянного излучения. Форма крыльев асимметрична и зависит от угла  $\theta$ . Интенсивность рассеянного излучения резко растет с увеличением шероховатости поверхности. Качественно вид индикатрис такой же, как и при отражении от шероховатой поверхности видимого излучения /5/.

Для количественных оценок удобно рассматривать полную индикатрису отражения в виде суперпозиции контура диффузного рассеяния и пика зеркального отражения. Введем коэффициент рассеяния  $\eta = I_d/I_0$ , где  $I_0$  — полная интегральная интенсивность отраженного излучения,  $I_d$  — интегральная интенсивность диффузной компоненты. Очевидно, что для зеркальной компоненты  $I_s$  справедливо соотношение:  $I_s/I_0 = 1 - I_d/I_0 = 1 - \eta$ .

Табл. I иллюстрирует зависимость коэффициентов  $\eta$  от угла скольжения  $\theta$  для излучения с  $\lambda = 31,4 \text{ \AA}$  (для других длин волны зависимость аналогична). Величина  $\eta$  рассчитывалась в виде суммы интегралов по крыльям индикатрисы отражения в интервалах  $\Delta\theta = -3^\circ - -30'$  и  $30' + 3^\circ$  и интеграла контура диффузного рассеяния в центральной части. При этом контур рассеяния в центре индикатрисы (от  $-30'$  до  $30'$ ) аппроксимировался продолжением крыльев прямыми линиями. Точность определения коэффициентов  $\eta$  составила около 0,02 для образцов № 3 и № 4 и 0,1 — 0,2 для образцов № 2 и № 1.

Таблица I

Коэффициенты рассеяния  $\eta$  для  $\lambda = 31,4 \text{ \AA}$  и величина  $\sigma$ , рассчитанная по формуле (1).

№ образца	1		2		3		4	
	$\eta$	$\sigma, \text{ \AA}$						
1	0,64	146	0,22	71	0,09	44	0,10	47
3	0,74	55	0,52	41	0,30	29	0,27	27
5	-	-	-	-	0,42	22	0,40	21

Полученные результаты были проанализированы с помощью теории рассеяния электромагнитного излучения шероховатыми поверхностями, развитой Бекманом /6/. Согласно Бекману, при отражении излучения от поверхности со случайным профилем шероховатости

для отношения интенсивности зеркальной компоненты к полной интенсивности отраженного излучения имеет место соотношение:

$$I_s/I_o = \exp[-(4\lambda\sigma \sin\theta/\lambda)^2], \quad (I)$$

где  $\sigma$  - среднеквадратическая шероховатость отражающей поверхности.

В табл. 1 и 2 приведены значения  $\sigma$ , вычисленные по коэффициентам  $\eta$  для нескольких длин волн и углов скольжения, а также значения  $\sigma_u$ , полученные независимым образом из измерений  $R_z$ , с помощью микроинтерферометра /5/:  $\sigma_u = (1/4)R_z$ . При  $\theta = 1^\circ$  на всех длинах волн значения  $\sigma$  и  $\sigma_u$  для образцов № 2 - 4 согласуются удовлетворительно. Для образца № 1 расхождение больше из-за того, что при большом рассеянии точность разделения зеркальной и диффузной компонент падает.

Таблица 2

Значения  $\sigma$  для различных длин волн при  $\theta = 1^\circ$  и значения  $\sigma_u$  по данным микроинтерферометра.

№ образца $\lambda, \text{Å}$	1	2	3	4
13,3	190	60	30	29
17,6	-	64	37	36
24,3	-	-	46	40
31,4	146	71	44	47
44,4	220	70	48	53
$\sigma_u, \text{Å}$	270	60	40 - 50	40 - 50

Уменьшение значений  $\sigma$  при больших  $\theta$  и меньших  $\lambda$  может быть связано с тем, что при этих условиях часть диффузной компоненты оказывается в пределах ширины центрального максимума индикатрисы и не учитывается в коэффициентах  $\eta$ . По Бекману, это свидетельствует о наличии у данного образца компонент шероховатости с корреляционными длинами  $\rho > \rho_0 = (\lambda(\pi \sin\theta \Delta\theta_0))^{-1}$ , где  $\Delta\theta_0$  - угловая ширина максимума. Поэтому для более точного определения  $\sigma$

следует проводить измерения при возможно меньших углах скольжения и больших длинах волн или, соответственно, увеличивать угловое разрешение.

Полученные результаты подтверждают предположение о прямой связи рассеянии УМР излучения с шероховатостью отражающей поверхности в широком интервале длин волн и параметров шероховатости и о применимости теории Бекмана для описания этого рассеяния. При оптимальных условиях наблюдения, по относительной интенсивности диффузной компоненты в УМР области спектра может быть оценена среднеквадратическая шероховатость поверхности вплоть до  $\sigma$  порядка нескольких ангстрем. Преимуществом метода является также возможность исследования не только плоских, но и криволинейных поверхностей, так как при малой длине волны без заметной дифракции размер участка поверхности может быть уменьшен до нескольких десятков микрон.

Поступила в редакцию  
27 декабря 1979 г.

### Л и т е р а т у р а

1. А. П. Лукирский, Е. П. Савинов, О. А. Ершов, Д. Ф. Шепелев, *Опт. и спектр.*, **16**, 310 (1964).
2. E. A. Stewardson, J. H. Underwood, *Brit. J. Appl. Phys.*, **16**, 1877 (1965).
3. P. A. J. de Korte, R. Laine, *Appl. Opt.*, **18**, 236 (1979).
4. И. А. Брытов, А. Я. Грудский, Е. А. Оболенский, А. Ф. Панов, *ПТЭ* № 6, 125 (1979).
5. А. С. Топорец, *Опт. мех. пром.*, № 1, 34 (1979).
6. P. Beckmann, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon Press, New-York, 1963. P. I.