

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ДИФФУЗНОМ РАССЕЯНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

А.В.Андреев, Ю.В.Пономарев

*Физический факультет, МГУ им.М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 17 ноября 1994 г.

Экспериментально обнаружены явления, обусловленные дифракцией волн, порожденных как падающей, так и рассеянными волнами: разрешение запрещенных отражений в спектре диффузного рассеяния, появление максимумов диффузного рассеяния, соответствующих рассеянию в глубь образца.

1. Настоящая статья посвящена исследованию влияния эффектов динамической дифракции на формирование угловых спектров диффузного рассеяния в многослойных структурах. Экспериментально обнаружены явления, которые не могут быть описаны в рамках кинематической теории дифракции и связаны с появлением сильных дифрагирующих волн, порожденных как падающей, так и рассеянной волнами: эффекты динамической дифракции приводят к сильной зависимости профиля диффузного рассеяния от угла падения волны в области брэгговского отражения, разрешению запрещенных отражений в спектре диффузного рассеяния, появлению максимумов диффузного рассеяния, соответствующих резонансному рассеянию в глубь образца.

Угловой спектр диффузного рассеяния рентгеновского излучения с длиной волны порядка 1 \AA от многослойных структур с периодом в несколько единиц – десятков нанометров составляет несколько градусов. Таким образом, размер когерентно освещаемой области оказывается порядка нескольких сантиметров, что позволяет по угловым спектрам рассеяния определять статистические характеристики неоднородностей границ раздела. Теоретический расчет угловых спектров диффузного рассеяния был проведен в [1,2]. В последнее время диффузное рассеяние от многослойных структур широко исследуется экспериментально [3–6]. Для определения статистических характеристик неоднородностей границ раздела из экспериментальных спектров до настоящего времени использовались кинематические модели, не учитывающие наличие зеркальных компонент для падающей и рассеянных волн. В настоящей работе экспериментально показано, что динамические эффекты приводят к качественному изменению профиля угловых спектров диффузного рассеяния.

2. В экспериментах использовались многослойные рентгеновские зеркала, изготовленные в Институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород), с величиной периода $30\text{--}180\text{ \AA}$, с различными парами материалов и различным числом слоев. Отношение толщины слоя более плотного материала (a) к периоду (d) в исследуемых образцах лежало в пределах $\beta = a/d = 0,1 - 0,5$.

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Эксперименты проводились на спектрометре с использованием монохроматизированного ($\text{Ge}(220)$) излучения рентгеновской трубки с медным анодом. Угловая расходимость падающего на образец излучения составляла 20 угл.с. Рассеяние от образца регистрировалось рентгеновским координатным детектором с окном $50 \times 8\text{ мм}^2$ и пространственным разрешением $0,2\text{ мм}$.

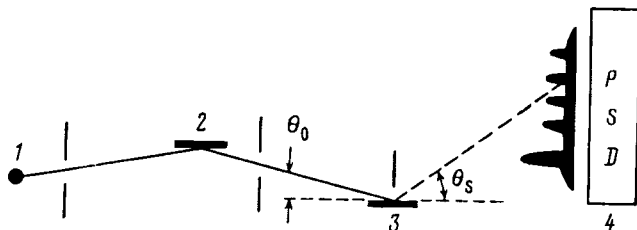


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 - рентгеновская трубка, 2 - монохроматор, 3 - образец, 4 - рентгеновский координатный детектор

3. На рис.2 показаны экспериментальные панорамные угловые спектры диффузного рассеяния в зависимости от угловой отстройки ($\theta_0 - \theta_B$) падающей волны относительно положения первого брэгговского максимума для двух многослойных зеркал: S1-24 (рис.2a) и S-258 (рис.2b). Зеркало S-258 состояло из $N = 17$ пар слоев $\text{Mo}/\text{V}_4\text{C}$ с периодом $d = 70,8 \text{ \AA}$ ($\beta = 0,4$), напыленных на стеклянную подложку, и имело следующие значения коэффициентов брэгговского отражения: $R_1 = 75\%$, $R_2 = 15\%$, $R_3 = 16\%$, $R_4 = 0,1\%$ на длине волны излучения линии $\text{CuK}_{\alpha 1}$. Зеркало S1-24 имело $N = 35$ пар слоев Fe/C с периодом $d = 51,8 \text{ \AA}$ ($\beta = 0,49$), напыленных на кремниевую подложку, и коэффициенты отражения $R_1 = 55\%$, $R_2 = 0,05\%$, $R_3 = 1,1\%$ на линии $\text{CuK}_{\alpha 1}$.

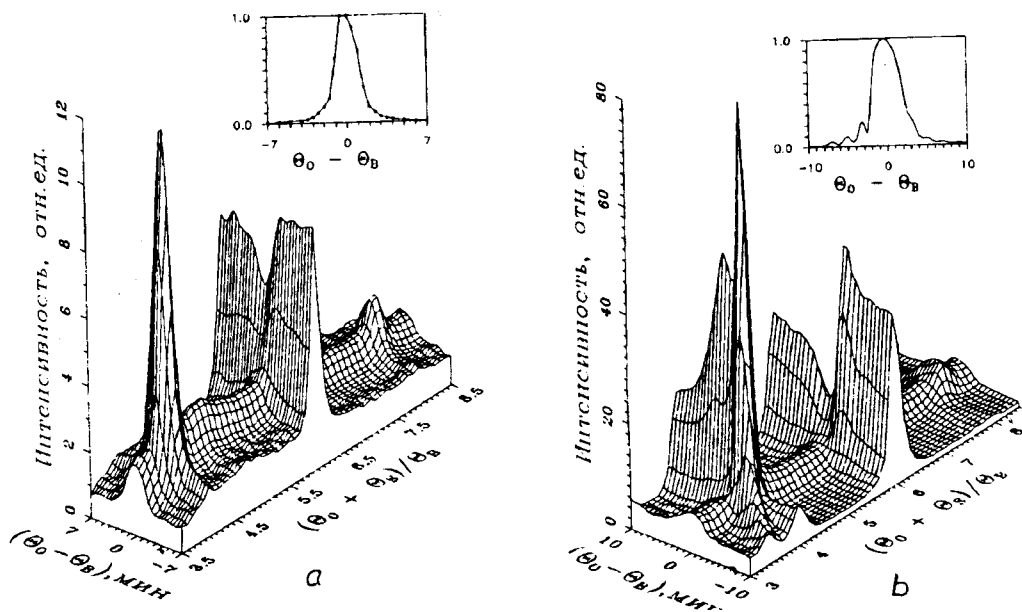


Рис.2. Панорамные спектры диффузного рассеяния в зависимости от угловой отстройки $\theta_0 - \theta_B$ падающей волны относительно положения первого брэгговского максимума для многослойных зеркал: а - $\beta = 0,49$; б - $\beta = 0,4$ (на вставках зависимости интенсивности (I) зеркальной компоненты от угловой отстройки относительно первого брэгговского максимума)

В угловом спектре (см. рис.2) наряду с нерезонансным фоном видны максимумы резонансного диффузного рассеяния, положение которых в первом приближении дается выражением $\theta_0 + \theta_S = 2n\theta_B$ (n - порядок максимума). Если угол падения рентгеновского излучения лежит далеко от области брэг-

говского отражения $|\theta_0 - \theta_B| \gg \Delta\theta_B$ ($\Delta\theta_B$ - ширина области брэгговского отражения), то параметры максимума резонансного диффузного рассеяния (его высота и ширина) определяются статистическими характеристиками границ раздела (среднеквадратичной высотой шероховатостей, продольной и поперечной длиной корреляции) [1] и соответствующей фурье-компонентой поляризуемости. На вставках к рис.2 приведены зависимости интенсивности зеркальной компоненты от угловой расстройки, которые дают представление о ширине области первого брэгговского отражения. Как видно из рис.2а, вне области брэгговского отражения отчетливо виден третий диффузный резонансный максимум, а максимумы четных порядков практически подавлены из-за запрета по структурному фактору $f_h = 1 - \exp(iNha)$ ($N = 2\pi/d$ - вектор обратной решетки).

В области брэгговского отражения по падающей волне характер углового спектра качественно изменяется: увеличивается интенсивность нерезонансного фона, интенсивности резонансных максимумов существенно зависят от величины угловой отстройки, резко возрастают интенсивности "запрещенных" резонансных максимумов (см. рис.2а). Эти изменения обусловлены возникновением системы связанных рентгеновских стоячих волн, которые образуют как падающая, так и диффузно рассеянные волны, и изменением фаз этих интерференционных полей. Изменяя угол падения, мы меняем положения пучностей интерференционных полей относительно границ раздела. Таким образом, мы получаем возможность более точного определения как усредненного профиля границ раздела, так и статистических характеристик границ раздела. Увеличение интенсивности нерезонансного фона связано с увеличением в области брэгговского отражения длины экстинкции, определяющей формирование рассеянного излучения. В первом приближении, без учета влияния интерференционного поля рассеянных волн, рост интенсивности "запрещенных" максимумов резонансного рассеяния обусловлен тем, что формирование максимумов запрещено по структурному фактору для падающей волны и разрешено по структурному фактору для дифрагированной волны. Характер зависимости интенсивности резонансных максимумов от угловой отстройки определяется интерференционными полями, создаваемыми как падающей, так и рассеянными волнами.

Формирование резонансных максимумов в области брегговских отражений определяется динамическими эффектами по падающей, а также по отраженной и рассеянными волнам, что следует из панорамного углового спектра диффузного рассеяния для зеркала с $\beta = 0,4$ (рис.2б). Характерной особенностью этого спектра является наличие двух пиков при отрицательных отстройках в области $\theta_0 + \theta_S = 4\theta_B$, что свидетельствует о резонансном возбуждении рассеянных волн на двух ветвях дисперсионной поверхности в относительно тонких многослойных структурах. Интерференция этих волн объясняет также двугорбую структуру максимума резонансного диффузного рассеяния от угла отстройки. Экспериментальная регистрация дополнительного пика с меньшим углом выхода θ_S указывает на неполноту обычно используемого кинематического подхода и необходимость учета динамической дифракции рассеянных волн в формировании рассеянного поля.

4. Проведенные эксперименты ярко демонстрируют, что кинематическая теория дифракции часто не дает правильного описания спектров диффузного рассеяния от многослойных структур. Эффекты динамической дифракции

(как по падающей, так и по рассеянным волнам) приводят к качественному изменению угловых спектров рассеяния: разрешению запрещенных отражений и появлению дополнительных пиков резонансного рассеяния. Исследование угловых зависимостей спектров диффузного рассеяния в области динамической дифракции по падающей волне значительно расширяет возможности реконструкции усредненного профиля плотности многослойных структур и определения статистических характеристик границ раздела слоев.

Авторы благодарят Н.Н.Салашенко и Ю.Я.Платонова за предоставленные образцы рентгеновских многослойных зеркал и обсуждение результатов.

-
1. A.V.Andreev, A.G.Michette, and R.Renwick, *J. Mod. Phys.* **35**, 1667 (1988).
 2. V.Holy, J.Kubena, I.Ohlidal et al., *Phys. Rev.* **B47**, 15896 (1993).
 3. D.K.G.de Boer, A.J.G.Lenaers, and W.W.van den Hoogenhof, *Appl. Phys.* **A58**, 169 (1994).
 4. V.Holy and T.Baumbach, *Phys. Rev.* **B49**, 10688 (1994).
 5. V.Pietsch, T.Barberka, W.Makler et al., *Thin. Solid. Films* **247**, 230 (1994).
 6. T.Salditt, T.H.Metzger, and J.Peils, Programme and Abstracts of 2nd European Symposium "X-ray Topography and High Resolution Diffraction", Berlin: Humbolt Univ., 1994, p.23.