

УДК 535.853.4

© Физика твердого тела, том 32, № 2, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 2, 1990

## ВЫХОД ФОТОЭЛЕКТРОНОВ ПРИ АСИММЕТРИЧНОЙ ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В СКОЛЬЗЯЩЕЙ БРЭГГ—ЛАУЭ ГЕОМЕТРИИ

А. М. Афанасьев, Р. М. Имамов, Э. Х. Мухамеджанов, А. В. Есян,  
А. А. Бжеумихов

В асимметричной схеме дифракции с параметром асимметрии  $|\beta| > 1$  (рис. 1, а) дифрагированная волна отражается под малым углом к входной поверхности кристалла. В результате глубина проникновения рентгеновских лучей в кристалл уменьшается, а плотность потока вблизи поверхности сильно возрастает. Поперечное сечение дифрагированного пучка  $S_h$  уменьшается в  $|\beta|$  раз по сравнению с поперечным сечением падающего пучка  $S_0$  (рис. 1, а); при этом коэффициент отражения  $R_h$ , кото-

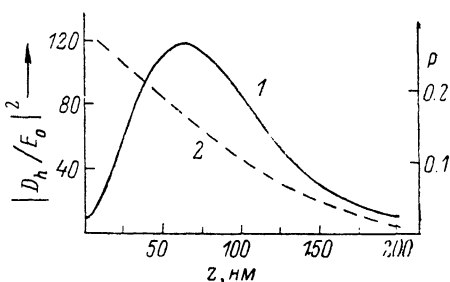
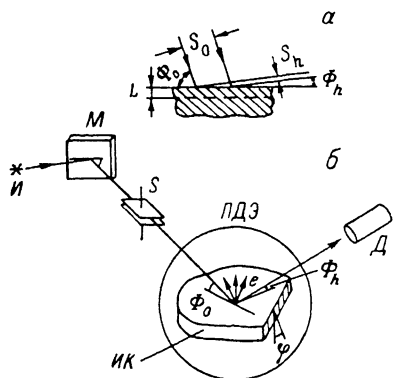


Рис. 1. Схемы асимметричной брегговской дифракции (а) и скользящей Брэгг—Лауэ геометрии дифракции (б).

$L$  — глубина выхода электронов,  $И$  — источник рентгеновских лучей,  $М$  — монохроматор,  $ИК$  — исследуемый кристалл,  $S$  — щель,  $\varphi$  — угол скоса отражающих плоскостей,  $ПДЭ$  — пропорциональный детектор электронов,  $Д$  — детектор дифрагированного излучения.

Рис. 2. Зависимости квадрата амплитуды поля дифрагированной волны (1) и плотности вероятности выхода фотоэлектронов (2) по глубине кристалла.

рый определяется как отношение интенсивностей дифрагированного и падающего пучков, оказывается близким к единице [1, 2]. Эта особенность дифракционного рассеяния находит свое яркое отражение в угловой зависимости выхода вторичных излучений, сопутствующих дифракционному процессу, с малыми глубинами выхода, например в угловой зависимости выхода фотоэлектронов [3, 4].

При асимметричной дифракции рентгеновских лучей резко возрастает число вылетающих фотоэлектронов по отношению к их интенсивности

вдали от области дифракционного отражения [3]. В работе [4] выбором отражения с большим параметром асимметрии было зафиксировано увеличение числа вылетающих электронов на порядок.

При малых углах выхода дифрагированного пучка  $\Phi_0$  наличие зеркального отражения существенно изменяет дифракционный процесс — меняется структура волновых полей в кристалле, их глубина проникновения и т. п., что, естественно, должно найти отражение в кривых выхода фото-

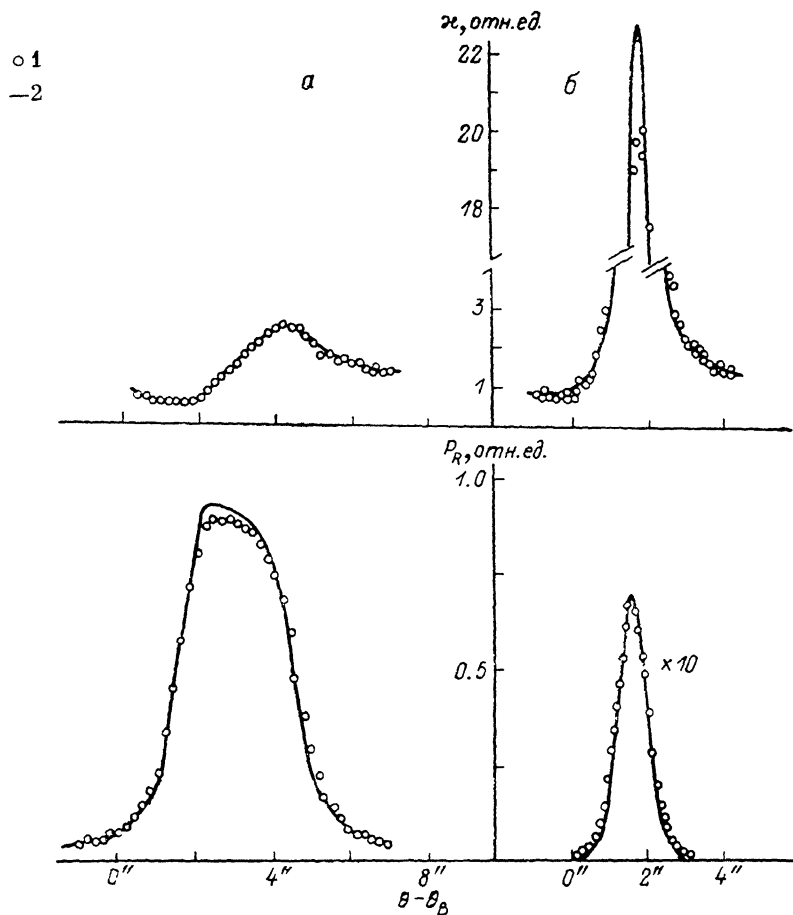


Рис. 3. Экспериментальные (1) и расчетные (2) угловые зависимости интенсивности выхода фотоэлектронов  $\chi$  (верхние кривые) и дифракционного отражения  $P_R$  (нижние кривые) в скользящей Брэгг—Лауэ геометрии.

а — симметричный случай,  $\Phi_0=337.5'$ ; б — асимметричный случай,  $\Phi_0=673'$ .

электронов [5]. При этом было показано [6], что при приближении  $\Phi_0$  к нулю коэффициент дифракционного отражения, а вместе с ним и плотность потока дифрагированных лучей на поверхности кристалла падают. С другой стороны, на некотором расстоянии от поверхности кристалла все же образуется пучок очень высокой плотности.

Экспериментальное исследование этих явлений удобно проводить не в обычной схеме (рис. 1, а), а в схеме скользящей Брэгг—Лауэ геометрии дифракции (рис. 1, б). В этой схеме изменением угла падения рентгеновских лучей  $\Phi_0$  можно на одном и том же кристалле реализовать как симметричную, так и асимметричную схемы дифракции. Кроме того, увеличивая угол падения  $\Phi_0$  свыше некоторого угла скоса  $|\tilde{\varphi}| = 2\varphi \sin \theta_B$  (где  $\varphi$  — угол скоса отражающих плоскостей,  $\theta_B$  — угол Брэгга), можно осуществить переход из геометрии Брэгга в геометрию Лауэ. Данная схема дифракции была использована также для изучения специфики выхода

флуоресцентного излучения [7] и комптоновского рассеяния [8]. В работе [9] детально исследовалась динамика поведения дифракционных пиков в граничном случае — вблизи Брэгг—Лауэ перехода, где существенную роль играет эффект полного внутреннего отражения рентгеновских лучей.

Эксперимент проводился на монокристалле Si, вырезанном под углом  $\varphi = 8.1^\circ$  по отношению к кристаллографическим плоскостям (111) вдоль направления [112].  $\text{CuK}_\alpha$ -излучение рентгеновской трубки мощностью 0.8 кВт коллимировалось посредством асимметричного (422)-отражения от совершенного кристалла Si. Расходимость пучка при этом составляла величину 0.75 угловых секунд. Вертикальная расходимость пучка задавалась щелями и составляла 2.5 угловых минут.

Для регистрации фотоэмиссии исследуемый образец помещался внутри специального газопроточного пропорционального детектора [10], который позволял проводить энергетический анализ фотоэлектронов с разрешением  $\sim 16\%$ . Угловые зависимости измерялись для SiK-фотоэлектронов с энергией  $E \approx 6.2$  кэВ. Функция плотности вероятности выхода  $P(z)$  таких фотоэлектронов была определена экспериментально, согласно [11], и приведена на рис. 2, 2.

Как показано в [6], для данной скользящей схемы дифракции максимальная плотность потока в кристалле реализуется при угле падения

$$\Phi_0 = |\tilde{\psi}| - \frac{3}{2}\delta_0 \quad (1)$$

и отходе от точного брэгговского угла на величину

$$\Delta\theta = \frac{1}{2 \sin 2\theta_B} (\Phi_c^2 - 3\delta_0^2), \quad (2)$$

$$\delta_0 = (C^2 |\chi_h|^2 / 2 |\tilde{\psi}|)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $C$  — коэффициент поляризации,  $\chi_h$  — Фурье-компонента поляризуемости,  $\Phi_c$  — критический угол зеркального отражения.

На рис. 2, 1 приведена зависимость квадрата амплитуды поля дифрагированной волны по глубине кристалла для отражения (422) с эффективным углом скоса  $|\tilde{\psi}| = 675'$  и значениях параметров  $\Phi_0$  и  $\Delta\theta$ , определяемых формулами (1)–(3). Как видно из этого рисунка, на расстоянии  $L_0 \approx \approx 60$  нм плотность потока в дифрагированном пучке более чем в сто раз превосходит плотность падающего пучка.

На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные кривые дифракционного отражения и выхода фотоэлектронов для симметричного отражения с углом падения  $\Phi_0 = |\tilde{\psi}| / 2$  (а) и резко асимметричного отражения с углом  $\Phi_0$ , определяемым формулой (1) (с точностью  $\sim 2.5'$ ) (б). На этом рисунке в четкой форме проявляется обсуждаемое выше явление. Отношение максимума пика к фону вне дифракции на кривой рис. 3, б составляет величину  $\sim 20$ , что в два раза превышает результат работы [4], но, с другой стороны, это отношение существенно меньше величины, предсказанной теорией. Такое расхождение объясняется наличием угловой расходимости пучка после кристалла—монокроматора и пространственным усреднением по глубине, определяемым функцией  $P(z)$ . Заметим, что коэффициент дифракционного отражения в асимметричном случае составляет всего лишь 7%, в то время как для симметричного случая 90%.

Экспериментальное выявление максимального эффекта представляет несомненный интерес. Очевидно, что наличие слабых искажений структуры кристалла вблизи поверхности должно сильно сказываться на форме и величине пика кривой выхода фотоэлектронов, и это явление может служить основой для нового метода диагностики поверхности кристаллов.

## С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Пинскер З. Г. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. М.: Наука, 1974. 368 с.
- [2] Афанасьев А. М., Александров П. А., Имамов Р. М. Рентгеновская структурная диагностика в исследовании приповерхностных слоев монокристаллов. М.: Наука, 1986. 95 с.
- [3] Takahashi T., Kikuta S. // J. Phys. Soc. Jap. 1977. V. 42. N 4. P. 1433—1434.
- [4] Круглов М. В., Созонтов Е. А., Соломин И. К. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 9. С. 2732—2734.
- [5] Afanas'ev A. M., Imamov R. M., Maslov A. V., Mukhamedzhanov E. Kh. // Phys. St. Sol. (a). 1989 (in press).
- [6] Афанасьев А. М., Есаян А. В. // Преприят ЕФИ. Ереван. 1989. 25 с.
- [7] Афанасьев А. М., Имамов Р. М., Мухамеджанов Э. Х., Ле Конг Куи, Перегудов В. Н. // ДАН СССР. 1986. Т. 289. № 2. С. 341—344.
- [8] Афанасьев А. М., Имамов Р. М., Мухамеджанов Э. Х., Ле Конг Куи. // ДАН СССР. 1986. Т. 288. № 4. С. 847—850.
- [9] Афанасьев А. М., Имамов Р. М., Мухамеджанов Э. Х., Ле Конг Куи. // ДАН СССР. 1987. Т. 295. № 4. С. 839—842.
- [10] Мухамеджанов Э. Х., Ле Конг Куи. // Приборы и техн. exper. 1985. № 3. С. 183—185.
- [11] Afanas'ev A. M., Imamov R. M., Mukhamedzhanov E. Kh., Chuzo A. N. // Acta Cryst. 1986. V. A42. P. 24—29.

Институт кристаллографии АН СССР  
Москва

Поступила в Редакцию  
8 февраля 1989 г.  
В окончательной редакции  
10 октября 1989 г.

### ПОПРАВКА

к статье Ю. В. Илсавского, Л. А. Кулаковой  
«Механизмы упругой релаксации в многокомпонент-  
ных фосфатных стеклах»  
(ФТТ. 1989. Т. 31. № 8. С. 153—157).

В подписи к рис. 1 следует читать 1, 3 (вместо 1, 2),  
2 — релаксационный . . . (вместо 3).