

УДК 548.734

ИЗМЕРЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ СКОЛЬЗЯЩИХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КООРДИНАТНОГО ДЕТЕКТОРА

А. А. Ломов, Д. В. Новиков, Д. А. Гоганов, С. М. Гуткевич

Газопроточный координатный детектор применен для регистрации кривых дифракции в скользящей геометрии Брэгга—Лауэ. Наряду с использованием рентгено-оптической схемы без коллимации по углу Брэгга это позволило перейти к однокристалльной схеме и отказаться от вращения образца в процессе съемки. Показана высокая чувствительность поверхностного брэгговского пика к наличию на поверхности аморфной пленки. Предложено использовать регистрируемые кривые для одновременного измерения толщины аморфной пленки и восстановления переходного слоя методом асимптотической брэгговской дифракции.

Развитый в последние годы метод асимптотической брэгговской дифракции (АБД) оказался очень перспективным в исследовании тонких приповерхностных слоев [1] и переходных слоев пленка—подложка [2]. Метод основан на прецизионном измерении интенсивности дифракционного рассеяния вдали от точного угла Брэгга и реализуется на основе техники трехкристалльной рентгеновской дифрактометрии. Высокая чувствительность этой методики по сравнению с записью двухкристалльных кривых отражения обусловлена тем, что регистрируемая интенсивность при отходе от точного угла Брэгга представляет собой не плавно меняющийся сигнал, состоящий из различных компонент дифракции и фонового рассеяния, а отдельный пик, параметры которого всегда могут быть измерены с наперед заданной точностью за счет выбора необходимого времени измерения. Несмотря на высокое разрешение (~ 1 нм) по глубине кристалла, метод АБД не получил широкого распространения, поскольку он требует наличия как трехкристалльного рентгеновского спектрометра, так и большого количества экспериментальных измерений при исследовании одного образца.

Использование метода АБД в скользящей геометрии Брэгга—Лауэ [3] позволило упростить методику измерений. В этой геометрии коллимированный по углу Брэгга рентгеновский пучок составляет малый угол с поверхностью кристалла. Одновременно выполняется условие Брэгга для семейства плоскостей, слегка отклоненных на угол φ от нормали к поверхности. Угол выхода Φ_h отраженного пучка с поверхностью кристалла связан с углом Φ_0 и углом отклонения от точного угла Брэгга следующим соотношением [4]:

$$\Phi_h^2 = (\Phi_0 - \Psi)^2 - \alpha, \quad (1)$$

где $\Psi = 2\varphi \sin \Theta_B$, $\alpha = -2(\Theta - \Theta_B) \sin 2\Theta_B$, Θ_B — точный угол Брэгга. В результате удается перейти к двухкристалльной схеме дифракции с регистрацией излучения по углу Φ_h при помощи смещающегося детектора со щелью. Величина углов Φ_h примерно на два порядка превышает соответствующие углы по Θ . Однако и в этом случае требуется проведение большого количества экспериментальных измерений.

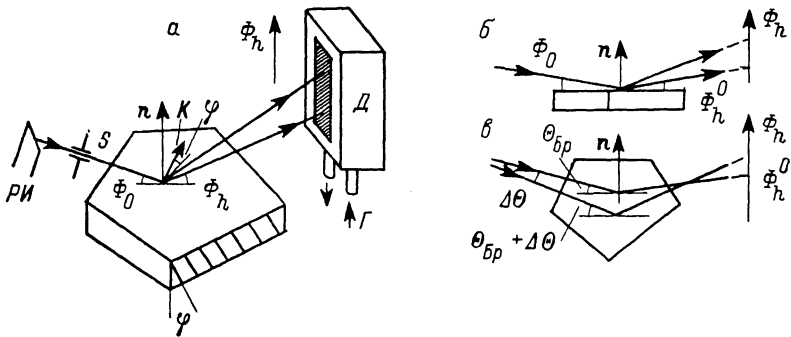


Рис. 1. Схема эксперимента. Установка кристалла при скользящем падении рентгеновского излучения.

a: РИ — рентгеновский источник, *S* — щель для коллимации излучения по углу падения Φ_0 , *n* — нормаль к поверхности, *K* — вектор обратной решетки, φ — угол разориентации, Φ_0 и Φ_h — углы падения и выхода излучения, *Д* — пропорциональный координатный детектор, Γ — газовая смесь ($\text{Xe} + 10\% \text{CH}_4$); *б, в:* схемы хода лучей при различных отклонениях от угла θ_B .

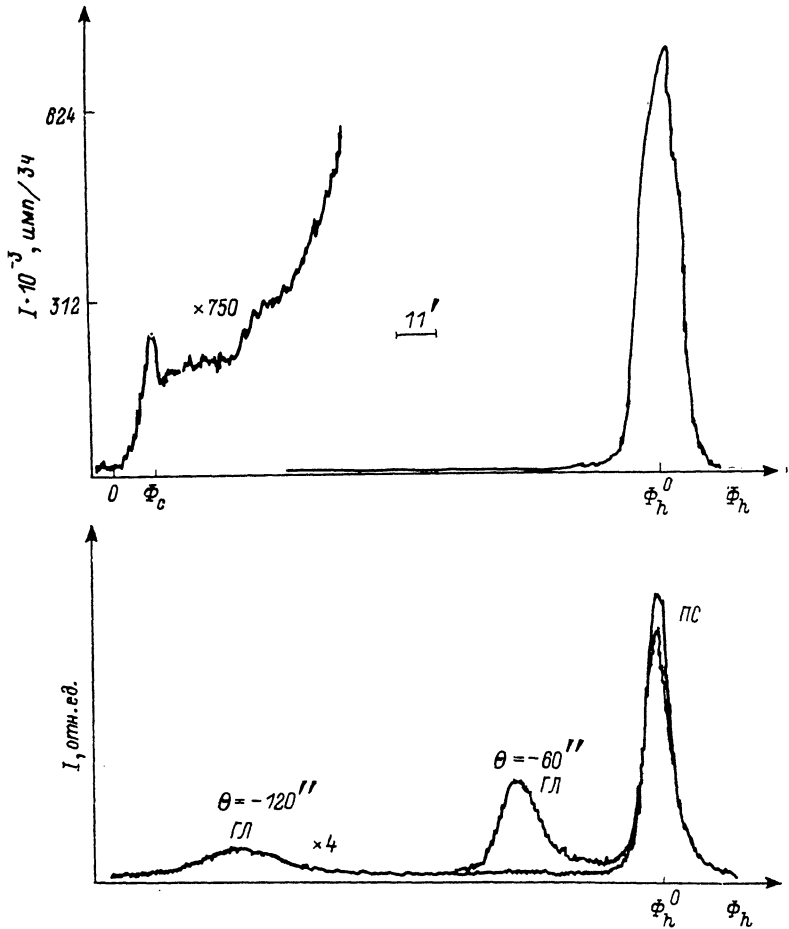


Рис. 2. Интенсивность дифракционного рассеяния от образца кремния без коллимации по углу Брэгга и с коллимацией.

$\omega = 7''$ — спектр АБД при углах рассогласования $\Delta\theta = -60$ и $-120''$, (220) отражение, CuK_α излучение, ГЛ — главный пик, ПС — псевдопик.

Настоящая работа посвящена развитию метода АБД без коллимации излучения по углу Θ в скользящей геометрии Брэгга—Лауэ.

В [3] показано, что в геометрии Брэгга—Лауэ при регистрации сигнала по углу выхода рентгеновских лучей Φ_h положения псевдопика и диффузного максимума совпадают, не зависят от величины α и равны углу выхода дифракционного рассеяния при $\Theta = \Theta_B$. Это обстоятельство дает возможность, освещая кристалл широко расходящимся по Θ пучком рентгеновского излучения, регистрировать рассеяние по углу Φ_h без вращения кристалла. Поскольку угол падения излучения на кристалл Φ_0 жестко зафиксирован, то, согласно (1), каждому α соответствует одно значение Φ_h , и наоборот. Эта методика для записи только центральных частей собственных кривых дифракционного отражения была применена в [5].

Эксперимент проводился на трехкристалльном рентгеновском спектрометре в схеме, описанной в [5] (рис. 1). В качестве источника излучения выбиралась трубка БСВ-25 с медным анодом. Система щелей обеспечивала расходимость излучения, падающего на кристалл, не хуже $0.5'$ при поперечном сечении пучка ~ 50 мкм. Коллимация по углу Брэгга отсутствовала (рис. 1, б, в).

Для регистрации зеркально дифрагированного излучения использовался газопро-

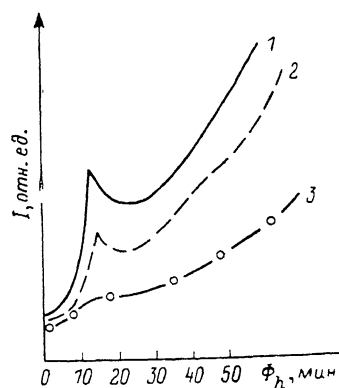


Рис. 3. Влияние аморфной пленки на интенсивность и форму дополнительного пика («всплеска») на дифракционной кривой отражения.

1 — образец с естественным окислом; 2 и 3 — слой аморфного кремния 5.0 и 20.0 нм.

точный координатный детектор РКД-1 с линейным разрешением 100 мкм. Расстояние кристалл—детектор было 25—30 см, что обеспечивало угловое разрешение не хуже $2'$.

Такая схема эксперимента дает возможность записывать для каждого фиксированного угла падения Φ_0 одновременно всю кривую по углу Φ_h . При этом каждая точка на «хвосте» записываемой кривой отражения соответствует с учетом свертки интегралу под главным пиком на спектре АБД. На рис. 2 приведены примеры спектров в одно- (а) и двухкристалльном (б) вариантах, т. е. без коллимации и с коллимацией по углу Брэгга Θ_B .

Образец представлял кремниевую подложку толщиной 500 мкм после стандартной технологической обработки с ориентацией поверхности (111). Дифрагирующие плоскости (110) были отклонены от нормали к поверхности на угол $\varphi = 208'$ ($\Psi = -167'$).

На кривой (рис. 2, а), помимо центрального максимума при $\Theta = \Theta_B$ наблюдается плавно спадающий «хвост» дифракционного рассеяния, который имеет характерный «всплеск» при $\Phi_h = \Phi_c$. Высота этого «всплеска» благодаря минимально разрешенному углу выхода ($\Phi_c = 13.3'$) оказывается очень чувствительной к наличию на поверхности аморфной пленки. Это, в частности, объясняет недостаточную высоту этого «всплеска» в [3]. Примеры зависимости высоты этого пика от толщины аморфной пленки показаны на рис. 3, что подтверждает результаты, полученные в работе [6].

Таким образом, использование координатного детектора для записи дифференциальных кривых дифракции в скользящей геометрии Брэгга—Лауэ без коллимации по углу Брэгга дает возможность перейти к однокристальному варианту схемы записи и отказаться от вращения образца в процессе измерения, что значительно упрощает методику.

Необходимо отметить, что использование такой схемы дифракции при одновременной регистрации всего хвоста чисто дифракционного рассеяния позволяет из одного измерения построить функцию приведенной интенсивности в методе асимптотической брэгговской дифракции. Это зна-

чительно упрощает исследование сверхтонких приповерхностных слоев монокристаллов и аморфных пленок на их поверхности.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Р. М. Имамову за постановку задачи и постоянную поддержку работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] *Afanas'ev A. M., Aleksandrov P. A., Imatov R. M. et al. Acta Cryst., 1984, vol. A40, p. 352—355.*
- [2] *Якимов С. С., Чапланов В. А., Афанасьев А. М. и др. Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 39, № 1, с. 3—5.*
- [3] *Афанасьев А. М., Афанасьев С. М., Александров П. А. и др. ФТТ, 1985, т. 27, № 8, с. 2284—2291.*
- [4] *Александров П. А., Афанасьев А. М., Степанов С. А. Кристаллография, 1984, т. 29, № 2, с. 197—202.*
- [5] *Головин А. Л., Имамов Р. М., Кондрашкина Е. А., Новиков Д. В. ЖТФ, 1985, т. 55, № 7, с. 1446—1448.*
- [6] *Афанасьев С. М. Тез. докл. II совещ. по всес. межвузовской программе «Рентген» (Черновцы, сент. 1987 г.). Ереван, 1987, с. 162—163.*

Институт кристаллографии
АН СССР
Москва

Поступило в Редакцию
14 декабря 1987 г.