

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ПОЛУГРАДУСНОЙ УГЛОВОЙ ОБЛАСТИ ОТРАЖЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ СОВЕРШЕННОГО КРИСТАЛЛА ПРИ ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ ( $\theta \approx \pi/2$ )

В.И.Кушнир, Э.В.Суворов

Экспериментально обнаружен предсказанный ранее <sup>1-3</sup> эффект увеличения на три порядка угловой ширины области отражения совершенного кристалла при обратном рассеянии. На основе этого явления могут быть созданы новые элементы рентгеновской оптики с высокой светосилой.

Совершенные кристаллы отражают рентгеновские лучи, падающие на них как под точным брэгговским углом, так и в конечном угловом интервале вокруг него. Ширина этого интервала определяется для брэгговской дифракции величиной щели в дисперсионной поверхности и для симметричного отражения равна

$$\Delta\theta = \chi / \cos(\theta), \quad (1)$$

где  $\chi$  — фурье компонента поляризуемости кристалла,  $\theta$  — брэгговский угол. Обычно  $\theta \lesssim 1$ ,  $\chi \lesssim 10^{-5}$ , что дает ширину области отражения  $\Delta\theta_0 \approx 2''$ . Эта величина определяет многие характеристики рентгенооптических схем, собранных из совершенных кристаллов, и прежде всего — яркость отражения. При дифракции излучения на таких кристаллах в формировании наблюдаемых эффектов принимает участие лишь ничтожная доля излучения рентгеновского источника, попавшая в угловой интервал отражения; остальное излучение теряется, что обуславливает крайне низкую светосилу таких рентгеновских элементов.

В 1972 году Кора и Мацущита <sup>1</sup> обратили внимание на то, что при  $\theta = \pi/2$  формула (1) теряет применимость. Строгое рассмотрение <sup>1-3</sup> показало, что при

$$\lambda = 2d_{HKL} \quad (2)$$

( $\lambda$  — длина волны,  $d_{HKL}$  — межплоскостное расстояние, перенормированное с учетом преломления) ширина области отражения

$$\Delta\theta_1 = 2\sqrt{\chi}. \quad (3)$$

Максимальная ширина области отражения достигается при несколько меньшей длине волны <sup>2</sup> и равна

$$\Delta\theta_2 = 2\sqrt{2\chi}. \quad (4)$$

Лучшее из известных совпадений типа (2) — излучение  $\text{CoK}_{\alpha_1}$  и отражение  $\text{Ge}(620)$  <sup>1</sup>.

Для этого случая  $\Delta\theta_1 = 26'$ , а  $\Delta\theta_2 = 36'$ .

Это предсказание теории весьма необычно для динамической рентгеновской оптики, так как угловая область отражения шириной пол-градуса должна наблюдаться на совершенном кристалле; это на три порядка больше, чем в случае обычной дифракции с  $\theta \lesssim 1$ . Аналогично должна возрасти и светосила отражения. Поэтому целью данной работы являлось экспериментальное наблюдение аномально широкой угловой области отражения рентгеновских лучей при  $\theta \approx \pi/2$ .

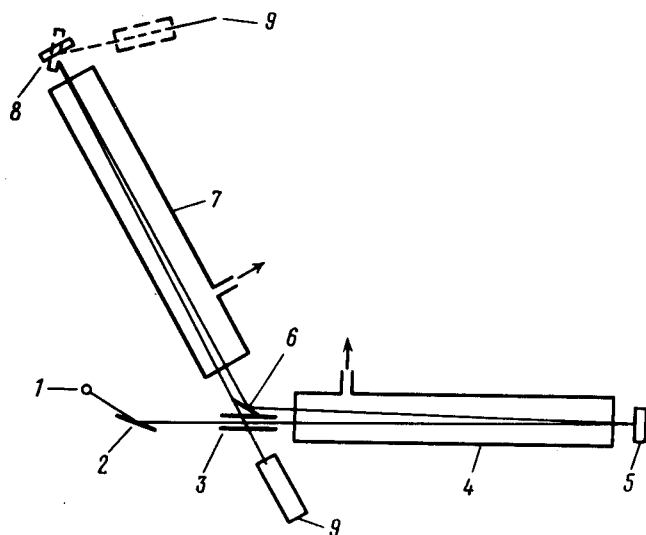


Рис. 1. Схема измерения угловой ширины области отражения: 1 — рентгеновская трубка БСВ-24, СО; 2 — кристалл пиролитического графита, (200); 3 — медная трубка  $\phi$  3 мм; 4 и 7 — вакуумные рентгенопроводы длиной по 1 м с майларовыми окнами; 5 и 8 — монокристаллы германия, поверхность (620); 6 — коллиматор из фтористого лития, (200); 9 — детектор

В экспериментах по наблюдению обратного рассеяния рентгеновских лучей есть ряд особенностей, отличающих их от традиционных экспериментов, в которых  $\theta \lesssim 1$ . Во-первых, для установки образца в брэгговское положение требуется его одновременная юстировка вокруг двух осей. Для ее упрощения поверхности кристаллов германия перед химической полировкой были выведены параллельно плоскостям (620) с точностью порядка  $4'$ , и первоначальная установка образцов производилась по лазерному лучу.

Во-вторых, при брэгговских углах, отличающихся от  $\pi/2$  не более чем на  $\Delta\theta_1$ , возникают трудности при регистрации дифрагированного пучка, так как он идет очень близко от падающего ( $10 - 20'$ ). Для того, чтобы они разошлись хотя бы на несколько миллиметров, пучки должны пройти расстояние не менее метра. Однако, кобальтовое излучение сильно поглощается в воздухе — в два раза на 50 см. поэтому при длине пути рентгеновского излучения 5 м использовались вакуумные рентгенопроводы. Для предварительной настройки рентгеновской схемы применялся детектор с отверстием  $\phi$  4 мм в середине чувствительной зоны  $\phi$  20 мм.

Измерения проводились при помощи рентгеновской схемы, изображенной на рис. 1. Излучение из рентгеновской трубки 1 попадает на кристалл графита 2, который служит для подавления сплошного спектра и снижения фона в установке. Затем через трубку 3, защищающую детектор от рассеянного на воздухе фона, пучок, попадает в вакуумный рентгеновод 4. Кристалл 5 — Ge (620) — монокристалл. Он необходим, так как обратная дифракция наблюдается в спектральном интервале 0,1 эВ, а ширина линии  $\text{CoK}_{\alpha_1}$  (6,93 кэВ) равна 3,1 эВ. Монокристаллизация должна подавить уширение искомого пика, вызванное отражением излучения с  $\lambda < 2d_{HKL}$ . Расчетная монокристаллизация составляет 0,1 эВ.

Кристалл 6 — LiF(200) — служит для коллимации излучения. Его кривая качания, снятая на  $\text{MoK}_{\alpha_1}$  имеет ширину  $1,5'$ . Далее через рентгеновод — излучение попадает на исследуемый кристалл 8 — Ge (620). Дифрагированный пучок проходит над трубкой 3 и попадает в детектор 9.

На рис. 2 показана зависимость интенсивности дифрагировавшего пучка от угла поворота последнего кристалла. Ширина этой кривой на половине высоты –  $35'$ . Для сравнения на рис. 3 приведена аналогичная зависимость, снятая в рентгеновской схеме, изображенной на рис. 1 пунктиром для отражения (511) на последнем кристалле. Ширина этой кривой –  $2'$  – демонстрирует инструментальное разрешение рентгенооптической схемы.

Таким образом, в данной работе впервые экспериментально наблюдалась аномально широкая угловая область отражения рентгеновского излучения от совершенного кристалла. Развита методика наблюдения обратного рассеяния рентгеновского излучения. Обнаруженное явление открывает перспективы создания ряда элементов рентгеновской оптики со светосилой на три порядка большей, чем в случае использования стандартных рентгенооптических решений.

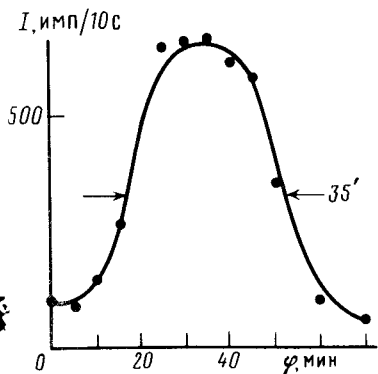


Рис. 2

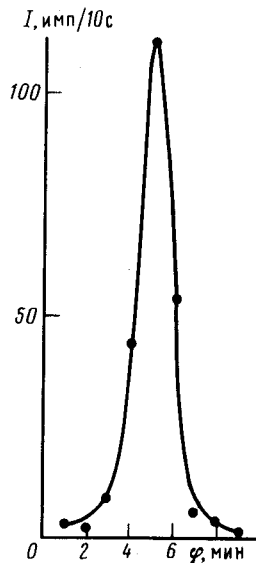


Рис. 3

Рис. 2. Кривая отражения монокристалла германия, отражение (620), излучение  $\text{CoK}_{\alpha_1}$

Рис. 3. Кривая отражения германия, отражение (511) – инструментальная кривая рентгенооптической схемы рис. 1

#### Литература

1. Kohra K., Matsushita Y. Z.Naturforsch., 1972, 27A, 484.
2. Brummer O., Hoche H.R., Nieber J. Phys. Stat. Sol. (a), 1979, 53, 565.
3. Caticha A., Caticha-Ellis S. Phys. Rev. B, 1982, 25, 2, 971.