

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ ФОКУСИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ

В.И.Кушнир, Э.В.Суворов

Осуществлена фокусировка рентгеновского излучения $\text{Co } K_{\alpha_1}$ при помощи сферически изогнутого монокристалла $\text{Ge } (620)$, отражающего в режиме обратного рассеяния ($2\theta \approx \pi$). Получен точечный фокус размерами ~ 10 мкм. Такая схема имеет теоретический дифракционный предел ширины фокуса 120 Å и высокую светосилу.

Фокусировка мягкого рентгеновского излучения ($\lambda \sim 20 - 100$ Å) возможна с помощью зонных пластинок Френеля, зеркал, работающих при скользких углах падения или многослойных зеркал. Этот путь уже привел к созданию рентгеновских телескопов и микроскопов с разрешением до 500 Å^{-1} . Для среднего рентгеновского диапазона ($\lambda \sim 1 \text{ Å}$) естественно в качестве оптических элементов использовать высокосовершенные монокристаллы, хотя известны и эксперименты по применению зонных пластинок в этом диапазоне². Созданию фокусирующей кристаллической оптики посвящено большое число работ (библиографию см., например, в³), но во всех экспериментах осуществлялась одномерная фокусировка, т. е. фокус имел форму штриха. Возможность получения наиболее практически важной двумерной фокусировки с точечным фокусом исследовалась теоретически³⁻⁷, и ни одна из этих схем не была экспериментально осуществлена, например, схема³ — из-за сложности и низкой светосилы. Низкая светосила обусловлена тем, что кристаллической оптикой может быть сфокусировано только излучение, попавшее в угловой интервал брегговского отражения, ширина которого в типичных случаях порядка 10^{-5} , остальное излучение бесполезно теряется. Обычно в экспериментах по одномерной фокусировке это ограничение касалось только расходимости в горизонтальной плоскости, в то время как вертикальная расходимость была порядка 10^{-2} . В экспериментах по двумерной фокусировке требуется коллимация порядка 10^{-5} в двух плоскостях, что должно привести к падению интенсивности еще на 3 порядка, но такого запаса в работах по одномерной фокусировке не было.

В 1972 г. Кора и Мацусита показали⁸, что при углах дифракции $\theta \approx \pi/2$ ("обратное рассеяние") динамическая ширина брегговского рефлекса равна $\Delta\theta = 2\sqrt{\chi_{HKL}} \sim 10^{-2}$, что было подтверждено последующими расчетами⁹⁻¹⁰ и наблюдалось экспериментально¹¹. Использование обратного рассеяния повышает светосилу кристаллической оптики на 2,5 — 3 порядка, и открывает возможность получения двумерной фокусировки рентгеновского излучения, что и явилось целью данной работы.

Рентгенооптическая схема эксперимента изображена на рис. 1. Рентгеновский пучок от трубки БСВ-29, работающей в режиме 30 кв × 32 ма, попадает на кристалл Si_1 , который является горизонтальным асимметричным брегговским коллиматором. Цилиндрический изгиб этого кристалла позволяет использовать его как стигматор. Кристалл Si_2 является вертикальным коллиматором; отражение от второго плеча этого кристалла используется для того, чтобы вернуть пучок в горизонтальную плоскость. Далее пучок попадает на дугообразно изогнутое зеркало $\text{Ge } (620)$, охлаждаемое азотом до -40°C для выполнения условия $\lambda = 2d_{620}$. Этот кристалл находился в криостате с майларовым окном в вакууме $\sim 10^{-2}$ мм. рт. ст. (криостат на рисунке не показан). Падающий и дифрагировавший пучки отклонялись от нормали к плоскости в пределах динамической ширины рефлекса:

$$\pi/2 - \theta < \sqrt{\chi_{HKL}}, \quad (1)$$

что является условием работоспособности зеркала. Зеркало одновременно является и моно-

хроматором с разрешением $\Delta\lambda/\lambda = \chi_{HKL}^{-1/2}$, что составляет в данном случае $1,4 \cdot 10^{-5}$, т. е. 3% от ширины линии $Co K_{\alpha_1}$. Полученная на фотопластинке P фотография фокуса приведена на рис. 2. Оценки вкладов различных факторов в ширину фокуса показывают,

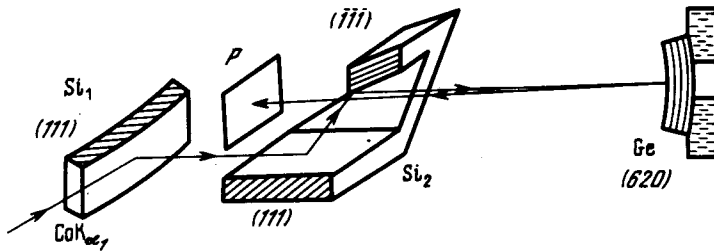


Рис. 1. Рентгенооптическая схема наблюдения двумерной фокусировки: Si_1 – горизонтальный коллиматор-стигматор, угол падения $\theta - \alpha = 0,4 \pm 0,05^\circ$ (α – асимметрия); Si_2 – вертикальный коллиматор, отражение на первом плече – асимметричное ($\theta - \alpha = 0,4 \pm 0,05^\circ$) на втором – $\alpha = 0 \pm 1^\circ$; $Ge(620)$ – зеркало, наклеенное на вогнутую стеклянную линзу с отверстием ϕ 5 мм в центре; $\alpha = 0 \pm 0,03^\circ$; радиусы изгиба зеркала ≈ 45 см, различие радиусов $\leq 10\%$; P – фотопластинка типа MP

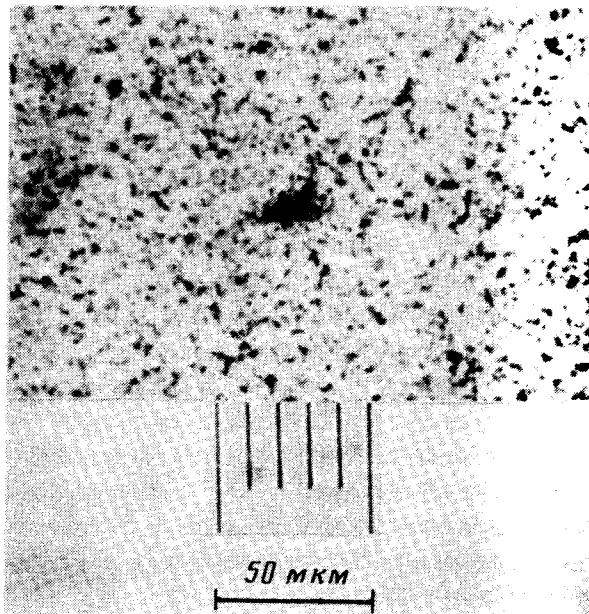


Рис. 2. Фотография фокуса. Интенсивность 10 квантов/с, экспозиция 1 мин

что вклад дифракционного уширения $\lambda/4\sqrt{\chi_{HKL}} = 120 \text{ \AA}$, конечной расходимости "плоской" волны – 1,05 мкм, конечной монохроматичности – 1,1 мкм. Размер экспериментально полученного фокуса ~ 10 мкм лимитируется, по нашим предположениям, вибрацией и дрейфом рентгенооптической схемы, а также качеством полировки кристаллов.

Таким образом, в данной работе впервые экспериментально получена двумерная фокусировка рентгеновских лучей ангстремного диапазона. Это демонстрирует перспективность использования обратного рассеяния рентгеновских лучей для повышения светосилы рентгеновской оптики и открывает возможность создания сканирующего рентгеновского микроскопа.

Литература

1. Рентгеновская оптика и микроскопия. Под ред. Г.Шмаля и Д.Рудольфа, М.: Мир, 1987, с. 4-3.
2. Аристов В.В., Басов Ю.А., Кулипанов Г.Н. и др. Письма в ЖТФ, 1988, 14, 3.
3. Kushnir V.I., Kaganer V.M., Suvorov E.V. Acta Cryst. A, 1985, 41, 17.
4. Баскаков В.А., Зельдович Б.Я. Препринт ФИАН, 1978, с. 40.
5. Кон В.Г. ФТТ, 1977, 19, 3567.
6. Габриелян К.Т., Пискунов Д.И., Чуховский Ф.Н., Демирчан Т.О. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 411.
7. Кон В.Г. Металлофизика, 1988, 10, 78.
8. Kohra K., Matsushita M. Z. Naturforsch., 1972, 27A, 484.
9. Brummer O., Hoche H.R., Nieber J. Phys. Stat. Sol. (A), 1979, 53, 565.
10. Caticha A., Caticha-Ellts S. Phys. Rev. B, 1982, 25, 971.
11. Кушнир В.И., Суворов Э.В. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 205.
12. Graeff W., Materlik G. Nucl. instr. and Methods, 1982, 195, 97.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 июня 1988 г.