

СПЕКТРАЛЬНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННОЙ ФОКУСИРОВКИ

В.Л.Инденбом, Э.В.Суворов

Демонстрируется принципиально новый метод исследования рентгеновских спектров с использованием явления дифракционной фокусировки, возникающей в дважды дифрагированном пучке П-образного рентгеновского интерферометра. Проведены измерения параметров спектральных линий для дублета $M_o K_{\alpha_{1,2}}$ и трудно разрешаемого на обычных типах спектрометров дублета $M_o K_{\beta_{1,3}}$. Спектральная ширина $K_{\alpha_{1,2}}$ линий согласуется с лучшими результатами, полученными с помощью несопоставимо более сложных и громоздких приборов, и оказывается несколько меньше теоретического значения.

В 1973 г. один из авторов (В.Л.Инденбом), выступая в ЕрГУ с лекциями по динамическому рассеянию рентгеновских лучей, выдвинул идею рентгеновского спектрометра нового типа, основанного на использовании явления дифракционной фокусировки спектральных линий. Теория эффекта была кратко изложена в работе [1] и может быть проиллюстрирована на рис. 1. Каждый узкий монохроматический пучок, дифрагируя в первой пластине интерферометра толщиной d , приобретает ширину $2d \operatorname{tg} \theta$, где θ – угол Брэгга. При повторной дифракции во второй пластине, согласно теории [1], пучок вместо расширения до ширины $4d \operatorname{tg} \theta$, испытывает дифракционное сжатие и восстанавливает изображение исходной узкой щели с точностью $\Delta = (\Lambda/\pi) \operatorname{tg} \theta$, где Λ – экстинкционная длина для данного отражения.

Обнаружение эффекта дифракционной фокусировки на опыте [2] и выяснение факторов, обеспечивающих возможность получения предсказанной теорией острой фокусировки [3], позволили перейти к практическому осуществлению спектрометра с дифракционной фокусировкой.

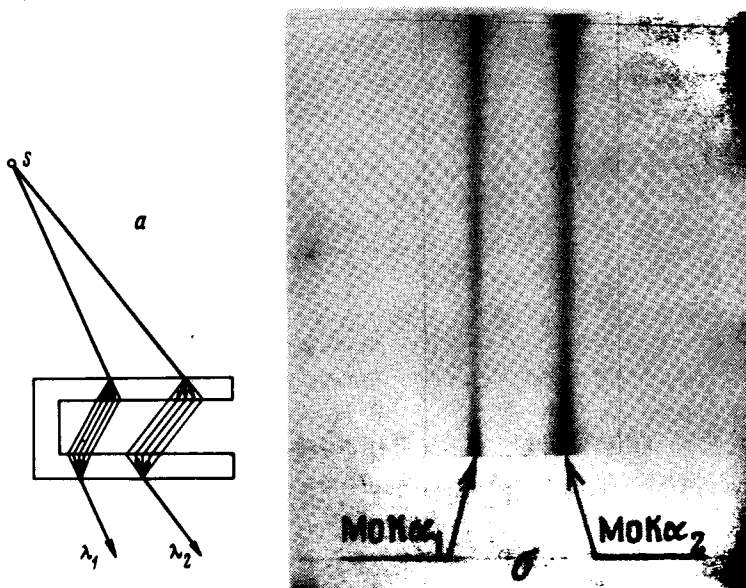


Рис. 1. Спектрометр с дифракционной фокусировкой рентгеновских линий: *a* – схема установки; *б* – рентгенограмма $M_0K_{\alpha_{1,2}}$ дублета

Установка была собрана по схеме рис. 1, *a* с той лишь разницей, что исходная щель отсутствовала, поскольку источником излучения служила микрофокусная трубка Д-4С фирмы "Rigaku Denki" с проекцией фокального пятна порядка 3 мкм. П-образный интерферометр, вырезанный из бездислокационного монокристалла кремния, устанавливался на столе камеры А-3. Пластины обычно вырезались по плоскости (111), перпендикулярной оси роста слитков. Толщины пластин уравнивались с точностью 1 – 2 мкм механической и химической полировкой. Отражающими плоскостями служили плоскости (220) и (224). Дифракционное уширение в области M_0K_{α} излучения соответственно составляло 1,4 и 3,5 мкм, а расчетная разрешающая способность спектрометра достигала по [1] значений $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ \AA}$ и $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ \AA}$. Регистрация спектрограмм осуществлялась с помощью фотопластинок типа МК, микрофотометрирование производилось с помощью регистрирующего микроденситометра G-II фирмы "Карл Цейсс".

На рис. 1, *б* приведена фотография дублета $M_0K_{\alpha_{1,2}}$ для отражения (220). Расстояние между линиями дублета (0,48 мкм) соответствует расчетному спектральному интервалу между линиями K_{α_1} и K_{α_2} ($\lambda_2 - \lambda_1 = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$). По микрофотограмме рис. 2, *a* видно, что полуширина

фотографического изображения линий дублета соответствует примерно $0,15 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, что заметно меньше данных о естественной ширине этих линий, полученных с помощью двухкристалльных спектрометров ($\delta\lambda = 0,24 + 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ для $M_o K_{\alpha_1}$ [4,5]) и спектрометров с изогнутым кристаллом ($\delta\lambda = 0,26 - 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ для $M_o K_{\alpha_2}$ [6]).

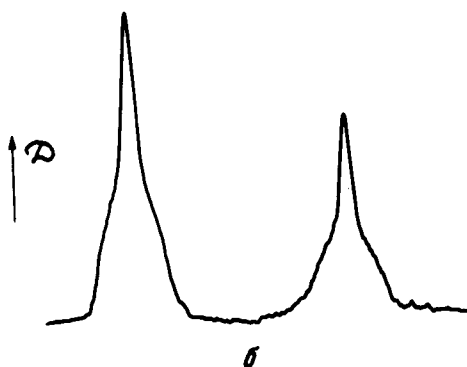
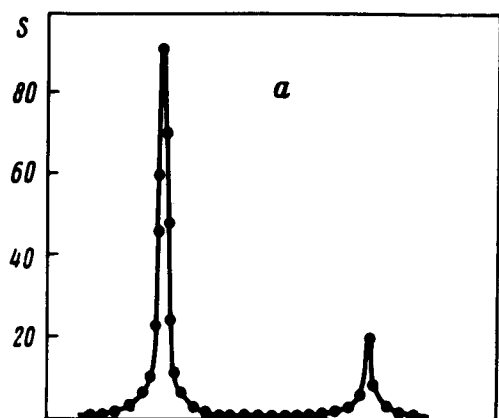


Рис. 2. Форма линий дублета $M_o K_{\alpha_{1,2}}$; *a* – запись фотографического изображения; *b* – то же для оптической плотности изображения, соответствующей интенсивности рентгеновского излучения

Необходимо, однако, учесть нелинейность фотограмметрической кривой. На рис. 2, *b* изображение дублета $M_o K_{\alpha_{1,2}}$ пересчитано на оптическую плотность $D - \lg(1 - S)$, что примерно соответствует плотности рентгеновского облучения. Пересчет четко выявляет пьедестал центрального пика, причем высоты пьедестала и пика оказываются сопоставимыми. По-видимому, на форме линий сказывается и размер фокуса рентгеновской трубки и сферичность волны, достигающей поверхности кристалла. (Оценки показывают, что оба указанных эффекта дают в уширение линий дополнительный вклад примерно по 3 мкм).

Вычитание пьедестала дает форму линий, приведенную на рис. 3, *a*. Здесь полуширина линии $M_o K_{\alpha_1}$ составляет $0,24 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, а линии $M_o K_{\alpha_2}$ – $0,23 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, что соответствует лучшим результатам, полученным с помощью несопоставимо более громоздких и сложных установок. Теоретический расчет ширины рентгеновских термов, к сожалению, не дает требуемой точности. Согласно последним данным [7] суммарное (ради-

ационное и вызванное оже-переходами) уширение K , L_2 и L_3 термов для M_0 ($Z = 42$) должно соответственно составлять 4,29; 2,60 и 2,37 эв [7]. Отсюда для линий $M_0 K_{\alpha_1}$ (переход $K \rightarrow L_3$) следует полуширина 6,66 эв или $\delta\lambda = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, а для $M_0 K_{\alpha_2}$ (переход $K \rightarrow L_2$) — полуширина 6,89 эв или $\delta\lambda = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, что выше экспериментальных данных, как приведенных в литературе, так и полученных в настоящей работе.

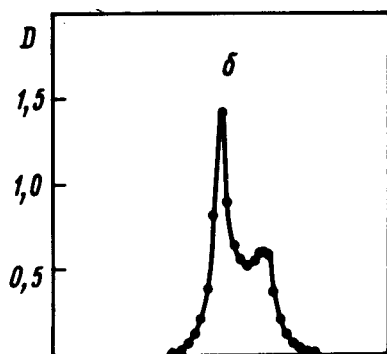
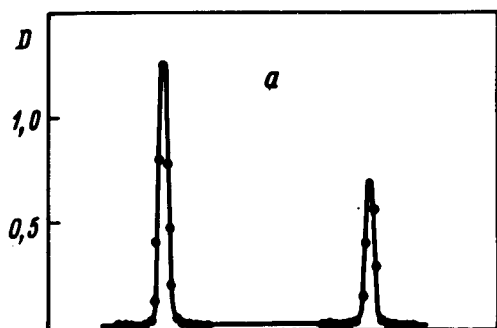


Рис. 3. Форма линий после вычитания фона: а — дублета $M_0 K_{\alpha_{1,2}}$; б — дублета $M_0 K_{\beta_{1,3}}$

Высокая разрешающая способность спектрометра с дифракционной фокусировкой может быть продемонстрирована на примере наблюдения дублета $M_0 K_{\beta_{1,3}}$. Здесь табличное расстояние между линиями составляет всего $0,58 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, а теоретическая полуширина линий достигает 7 эв или $0,23 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ (переходы $K \rightarrow M_{1,2}$; полная ширина М-терма 2,7 эв [7]). Как видно из рис. 3,б спектрометр с дифракционной фокусировкой, даже при малых габаритах, затрудняющих подавление эффектов сферической абберации и размытия фокального пятна, хорошо разделяет дублет $M_0 K_{\beta_{1,3}}$. Расстояние между линиями составляет около $0,57 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, полуширина линий (после вычитания фона и с учетом перекрытия линий) оказывается порядка $0,23 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, что согласуется с теоретической оценкой.

Полученные результаты наглядно демонстрируют возможности практической реализации спектрометра с дифракционной фокусировкой рентгеновских спектральных линий, высокую разрешающую способность прибора и его преимущества по сравнению с рентгеновскими спектрометрами обычных типов, как применительно к решению обычных задач (например, задач по рентгеноспектральному анализу), так и применительно к расширению области применения рентгеновских спектрометров,

построению малогабаритных автоматических спектрометров или, наоборот, крупногабаритных спектрометров высокого разрешения, позволяющих исследовать влияние различных факторов на форму, ширину, расщепление и смещение рентгеновских спектральных линий.

Авторы выражают искреннюю признательность В.И.Никитенко за помощь в организации экспериментов и постоянное внимание к работе. Один из авторов (В.Л.Инденбом) благодарит Ф.О.Эйрамджяна за первые попытки осуществления эффекта дифракционной фокусировки, Г.М.Аладжаджана за контрольные измерения ширины $M_0 K_{\alpha 1}$ линий и К.И.Нарбутта за ценную консультацию.

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 февраля 1976 г.
26 марта 1976 г.

Литература

- [1] В.Л.Инденбом, И.Ш.Слободецкий, К.Г.Труни. ЖЭТФ, 66, 1110, 1974.
 - [2] Э.В.Суворов, В.И.Половинкина. Письма в ЖЭТФ, 20, 326, 1974.
 - [3] В.Л.Инденбом, И.Ш.Слободецкий, Э.В.Суворов. ЖЭТФ, 71, вып.7, 1976.
 - [4] G.Brogren. Arkiv för Fysik, 8, 391, 1954.
 - [5] L.G.Paratt. Rev. Mod. Phys., 31, 616, 1959.
 - [6] B.G.Gokhale. Annales de Physique., 7, 852, 1952.
 - [7] W.Bambynek et al. Rev. Mod. Phys., 44, 716, 1972.
-