

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ ОДНОРОДНО ИЗОГНУТЫМ КРИСТАЛЛОМ В ЛАУЭВСКОМ СЛУЧАЕ

*В.И.Кушнир, Э.В.Суворов*

Экспериментально обнаружено предсказанное ранее явление динамической фокусировки рентгеновских лучей однородно изогнутым кристаллом с коэффициентом увеличения, отличным от единицы. Наблюдается сжатие дифрагированного пучка до ширины  $\approx 8$  мкм, что на порядок меньше величины основания треугольника Бормана.

Коэффициент преломления любого вещества для рентгеновских лучей ( $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ ) практически равен единице (отличие составляет  $\sim 10^{-6}$ ), поэтому создание линз, основанных на обычном эффекте преломления, для рентгеновского диапазона не представляется возможным. В то же время в оптике известны и другие принципы фокусировки, основанные на дифракционных эффектах (фазовые линзы, зонные пластинки Френеля и пр.) [1]. Впервые динамическая дифракционная фокусировка рентгеновской волны, амплитуда и фаза которой определенным образом промодулированы по фронту, была предсказана теоретически [2] и осуществлена экспериментально [3] несколько лет назад. Затем была исследована дифракционная фокусировка сферической волны на плоской кристаллической пластине [4.— 6]. Однако, как в первом, так и во втором случае, коэффициент увеличения рентгенооптической схемы был равен единице. В то же время в работах [7 — 8] была теоретически предсказана принципиальная возможность схем дифракционной фокусировки на однородно изогнутом кристалле с коэффициентом увеличения, отличным от единицы. Поэтому в данной работе ставилась задача экспериментального обнаружения динамической дифракционной фокусировки рентгеновских лучей однородно изогнутым кристаллом.

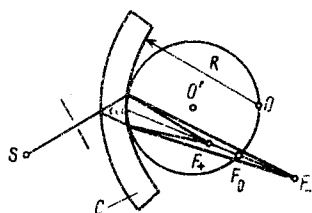


Рис. 1. Схема уменьшающей цилиндрической линзы:  $S$  — источник;  $C$  — кристалл, изогнутый по окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $O$ ; окружность с центром  $O'$  — множество точек  $F_0$  фокусировки по Кошуа;  $F_+$  и  $F_-$  — две точки динамической фокусировки

Такая фокусировка может быть осуществлена в двух схемах — увеличивающей и уменьшающей линз. В первом случае увеличение составляет  $10^1 \div 10^3$ , разрешение  $\sim 1000 \div 100 \text{ \AA}$ , размер фокуса  $\sim 10 \text{ мкм}$ , во втором — увеличение  $\sim 10^{-1} \div 10^{-3}$ , разрешение  $\sim 10 \text{ мкм}$  и размер фокуса  $\sim 1000 \div 100 \text{ \AA}$ . Схема увеличивающей линзы впервые была предложена и теоретически исследована в работе [7]. В данной работе из двух возможных схем была выбрана схема уменьшающей линзы, так как в этом случае "точечный" источник может быть значительно больших размеров, и сжатие изображения приводит к повышению плотности рентгеновского излучения, что облегчает его регистрацию. Схема фокусировки приведена на рис. 1. В отличие от кинематической фокусировки по Кошуа [9], которая заключается в пересечении на расстоянии  $L = R \cos \theta$  ( $R$  — радиус изгиба кристалла,  $\theta$  — брегговский угол) некогерентных пучков, соответствующих разным дельтам Бормана и имеющих ширину порядка размера основания дельты  $2t \operatorname{tg} \theta$  ( $t$  — толщина кристалла), динамическая фокусировка заключается в сжатии пучка, выходящего из одной дельты Бормана в область много уже ее основания. При этом на оси пучка возникают два динамических фокуса  $F_+$  и  $F_-$  (см. рис. 1), соответствующие двум типам блоховских волн в

кристалле. Условие фокусировки имеет вид

$$\frac{1}{L_{\pm}} - \frac{1}{R \cos \theta} = \pm \gamma \frac{\chi_{hr}}{2t \sin^2 \theta},$$

где  $\chi_{hr}$  — вещественная часть фурье-компоненты поляризуемости кристалла,  $\gamma$  — коэффициент порядка единицы, учитывающий цилиндрическую aberrацию. Для устранения хроматического уширения фокуса в работе была использована двухлинзовая ахроматическая схема, показанная на рис.2. Кристаллы кремния были вырезаны в виде плоскопараллельных пластин. После окончательной химической полировки их толщины

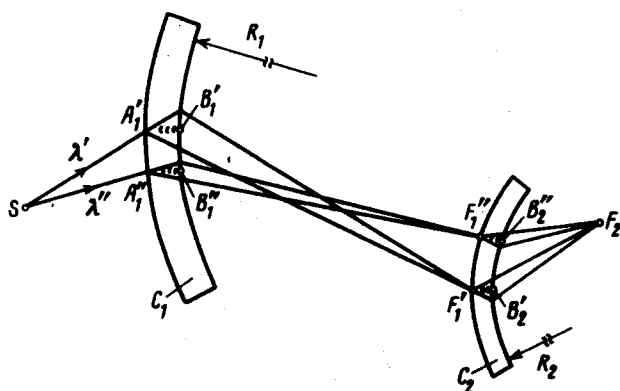


Рис.2. Двухлинзовая ахроматическая схема:  $S$  — источник,  $C_1$  и  $C_2$  — первый и второй кристаллы,  $F_1'$  и  $F_1''$  — точки фокусировки первым кристаллом для длин волн  $\lambda'$  и  $\lambda''$ ;  $F_2$  — точка фокусировки второго кристалла;  $SA_1' \approx SA_1'' \approx 182$  мм,  $R_1 \approx 704$  мм,  $B_1'F_1' \approx B_1''F_1'' \approx 542$  мм,  $B_2'F_2 \approx B_2''F_2 \approx 232$  мм

были равны 425 мкм и 360 мкм, отражающие плоскости (448) и (111) были перпендикулярны к входным поверхностям и параллельны осям изгиба. Съёмки проводились на излучении  $Mo K_{\alpha_1}$ . (При этом  $\gamma_1 \approx 1$ ,  $\gamma_2 \approx 1,245$ ). Кристаллы нагружались механически по схеме четырехопорного изгиба с помощью устройства, описанного в работе [10]. Радиусы изгиба измерялись по угловому смещению центра тяжести пика отражения при сканировании образца; при этом использовалась двухкристальная схема ( $n$ ,  $-n$ ). При варьировании параметров схемы (рис.2) в точке  $F_2$  был обнаружен фокус с шириной на половине высоты  $\sim 8$  мкм (рис.3). Наблюдаемое уширение фокуса по сравнению с теоретическими значениями ( $\sim 0,22$  мкм) могло быть вызвано целым рядом причин, основные из которых, по-видимому, следующие: а) неточное выполнение условий фокусировки и ахроматичности; б) конечные размеры источника; в) искажения волновых пакетов в кристаллах, вызванные concentra-

цией напряжений на неровностях поверхности; г) пропеллерообразное закручивание отражающих плоскостей (см. работу [10]); д) нестабильность рентгенооптической схемы во времени.

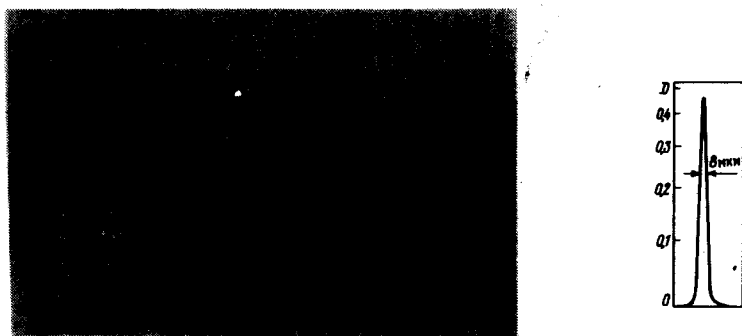


Рис.3. Распределение интенсивности в фокусе двухлинзовой схемы: а — топограмма, б — фотометрическая кривая ( $D$  — плотность почернения)

Таким образом, ширина обнаруженного фокуса на порядок меньше, чем размер основания дельты Бормана (80 мкм), что позволяет сделать вывод о существовании в описанных условиях эффекта динамической фокусировки рентгеновских лучей однородно изогнутым кристаллом.

Институт физики  
твердого тела  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
26 июня 1980 г.

### Литература

- [1] А.Зоммерфельд. Оптика, М., ИИЛ, 1953.
- [2] В.Л.Инденбом, И.Ш.Слободецкий, К.Г.Труни. ЖЭТФ, 66, 1110, 1974.
- [3] Э.В.Суворов, В.И.Половинкина. Письма в ЖЭТФ, 20, 326, 1974.
- [4.] N.Kato. Z. Naturforsch, 15a, 369, 1960.
- [5] А.М.Афанасьев, В. Г.Кон. ФТТ, 19, 1775, 1977.
- [6] В.В.Аристов, В.И.Половинкина, И.М.Шмытько, Е.В.Шулаков. Письма в ЖЭТФ, 28, 69, 1978.
- [7] П.В.Петрашень, Ф.И.Чуховский. Письма в ЖЭТФ, 23, 385, 1976.
- [8] Ф.И.Чуховский, П.В.Петрашень. ДАН СССР, 228, 1087, 1976.
- [9] I.Cauchois. J. Phys. et radium, ser. 7, 3, 320, 1932.
- [10] В.И.Кушнир, Э.В.Суворов, К.Ю.Мухин. ФТТ, 22, 2135, 1980.