

01;07

## О когерентных свойствах рентгеновских пучков при их фокусировке изогнутыми кристаллами

© Т. Чен

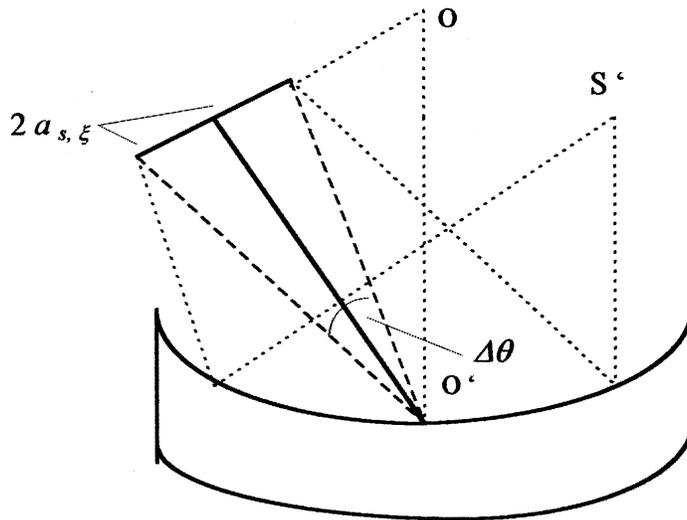
Московская государственная академия тонкой химической технологии  
им. М.В. Ломоносова  
E-mail: docent65@mtu-net.ru, ttchnen@e-mail.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2002 г.

Проведено теоретическое рассмотрение влияния пространственной и временной когерентности на фокусировку рентгеновской волны изогнутым кристаллом в некоторых рентгено-оптических фокусирующих схемах (Иоганн, обратное рассеяние). Показано, что большая светосила кристаллической оптики, достигаемая в схемах Иоганна и обратного рассеяния, приводит к некогерентной фокусировке.

В последние годы в связи с созданием третьего поколения синхротронных источников рентгеновского излучения наметился очередной подъем интереса к вопросам фокусировки и управления рентгеновскими пучками с помощью кристаллической оптики на основе изогнутых кристаллов. Одними из наиболее привлекательных рентгено-оптических схем являются известные схемы Иоганна [1–6] и схема обратного рассеяния [7–19]. Обе схемы имеют одно несомненное преимущество перед всеми другими — возможность получения пучков с большой светосилой.

В настоящей работе исследуется вопрос о когерентности фокусировки в указанных выше схемах. Рассмотрим вначале проблему пространственной когерентности при фокусировке рентгеновской волны изогнутым кристаллом. Обозначим  $2a_{s,\xi}$  и  $2a_{s,y}$  — размеры источника рентгеновской волны в плоскости дифракционного рассеяния и в перпендикулярной к ней плоскости соответственно (см. рисунок). Максимальный размер  $2a_{s,\xi}$  источника, при котором еще сохраняется когерентность падающего пучка, можно оценить из следующего нера-



К вопросу о влиянии размера источника на когерентные свойства фокусировки.  $S'$  — изображение источника,  $|OO'| = R_x$ .

венства:

$$2a_{s,\xi} \leq \lambda / (2\Delta\theta). \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  — длина волны падающего излучения,  $\Delta\theta$  — угол между лучами, исходящими из концов источника и падающими в центр кристалла.

Положим в формуле (1) угол  $\Delta\theta$  равный угловой расходимости пучка  $\Delta\theta_{\text{Johann}}$ , падающего на кристалл, получим оценку для „когерентного“ размера  $2a_{s,\xi}$  источника в схеме Иоганна:

$$2a_{s,\xi,\text{Johann}} \leq \lambda \sin 2\theta_B / (4|\chi_{hr}|^{1/2}). \quad (2)$$

В формуле (2):  $\chi_{hr}$  — фурье-компонента рентгеновской поляризуемости кристалла,  $\theta_B$  — брэгговский угол.

При выводе (2) учтено, что  $\Delta\theta_{\text{Johann}} \approx x_{\text{eff},\text{Johann}} / (R_x \sin \theta_B)$ . Здесь  $R_x$  — радиус изгиба кристалла в плоскости дифракционного

рассеяния, а  $x_{eff, Johann}$  определяется следующим выражением [20]:

$$x_{eff, Johann} = R_x (2\Delta\theta_{TRR} \operatorname{tg} \theta_B)^{1/2}. \quad (3)$$

$\Delta\theta_{TRR} = |\chi_{hr}| / \sin 2\theta_B$  — угловая полуширина области полного отражения.

Для обратного рассеяния ( $\theta_B \cong \pi/2$ ) при  $L_0 = R_x \sin \theta_B$  с учетом результатов, полученных в [21], имеем:

$$2a_{s, \xi \theta \approx \pi/2} \leq \lambda / (2|\chi_{hr}|^{1/2}). \quad (4)$$

Из выражения (2) и (4) видно, что при обратном рассеянии можно использовать несколько большие источники по сравнению с схемой Иоганна без нарушения когерентности фокусировки.

В плоскости, перпендикулярной плоскости дифракционного рассеяния, оценка размера  $2a_{s, y}$  источника совпадает по порядку величины с оценкой (4).

Численная оценка для отражения (20),  $\text{CuK}\alpha$ -излучения от Si-кристалла дает  $2a_{s, \xi, Johann} \leq 10^{-8}$  м. Ясно, что, используя источники размерами 1–10  $\mu\text{m}$ , мы получим некогерентную фокусировку Иоганна. Следовательно, для таких источников использование рентгено-оптического принципа Гюйгенса–Френеля [22] уже не совсем корректно.

Заметим, что плоский кристалл „позволяет“ использовать большие источники по сравнению с изогнутыми. Это видно из (1). Однако плоский кристалл, не подвергнутый никакому внешнему воздействию (механический изгиб, температурный градиент, акустическое воздействие, линейное изменение периода кристаллической решетки и т. д.), не способен сфокусировать в точку брэгговски дифрагированную волну. Возможно лишь уменьшение сечения дифрагированного пучка при резко-асимметричной дифракции, приводящее к увеличению интенсивности пучка.

Положив в формуле (1)  $\Delta\theta \approx 2a_{s, \xi} / L_0$ , где  $L_0$  — расстояние от источника до кристалла, получим зависимость „когерентного“ размера источника от  $L_0$ :

$$a_{s, \xi} \leq (\lambda L_0)^{1/2} (8)^{1/2}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что для плоской падающей волны (случай синхротронного источника рентгеновского излучения,  $L_0 \gg R_x \sin \theta$ ), когда  $\Delta\theta_{pl.} \ll \Delta\theta_{TRR}$ , фокусировка остается когерентной для более крупных источников. Например, для  $L_0 \approx 20$  м имеем:  $2a_{s, \xi, pl.} \leq 90 \mu\text{m}$ .

Рассмотрим теперь влияние некогерентности падающего излучения на фокусировку. Для сохранения когерентности фокусировки потребуем выполнения неравенства:

$$L_{coh} = \lambda^2 / \Delta\lambda > x_{eff, Johann}. \quad (6)$$

Используя формулу (3), а также использованные выше типы отражения и излучения, получим из (6):  $\Delta\lambda < \lambda^2 \cos \theta_B / (R_x |\chi_{hr}|^{1/2}) \sim 0.7 \cdot 10^{-17}$  м для  $R_x = 1$  м, что соответствует степени монохроматичности  $\delta\lambda/\lambda \sim 5 \cdot 10^{-8}$ . Теоретическая подобная степень монохроматичности достижима с помощью монохроматора с многократными брэгговскими отражениями. При использовании более реальной величины  $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-4} - 10^{-6}$  имеет место нарушение временной когерентности.

Время когерентности  $\tau_{coh} \sim L_{coh}/c \sim 2.5 \cdot 10^{-3}$  с при  $\Delta\lambda \sim 10^{-17}$  м, где  $c$  — скорость света в вакууме.

Таким образом, в настоящей работе показано, что фокусировка в схеме Иоганна является некогерентной для источников с размерами  $\geq 1 \div 10 \mu\text{m}$ , обычно используемых в эксперименте. Увеличение светосилы оптики, достигаемое путем изгиба кристалла, сопровождается уменьшением длины пространственной когерентности. При использовании синхротронных источников фокусировка рентгеновских пучков изогнутым кристаллом является когерентной. Другим несомненным „плюсом“ синхротронного излучения по сравнению с „обычным“ источником является высокая мощность синхротронного источника. Для достижения оптимальной фокусировки с помощью обычной рентгеновской трубки необходимо соблюсти компромисс между приемлемой степенью когерентности и необходимой величиной светосилы.

## Список литературы

- [1] *Jahann H.H.* // *Z. Phys.* 1931. Bd. 69. S. 185.
- [2] *Габриелян К.Т., Чуховский Ф.Н., Пинскер З.Г.* // *ЖТФ.* 1980. Т. 50. С. 3.
- [3] *Чуховский Ф.Н.* // *Металлофизика.* 1981. Т. 3. С. 3.
- [4] *Wittry D.B., Sun S.* // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 67 (4). P. 1633.
- [5] *Chang W.Z., Wittry D.B.* // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74 (5). P. 2999.
- [6] *Chukhovskii F.N., Chang W.Z., Förster E.* // *J. Appl. Phys.* 1995. V. 77 (5). P. 1843.
- [7] *Kohra K., Matsushita T.* // *Z. Naturf.* 1972. V. 27A. P. 484.

- [8] *Brümmer O., Höche H.R., Hieber J.* // Phys. Stat. Sol. (A). 1979. V. 53. P. 565.
- [9] *Caticha A., Caticha-Ellis S.* // Phys. Rev. (B). V. 25. P. 971.
- [10] *Caticha A., Caticha-Ellis S.* // Phys. Stat. Sol. (A). 1990. V. 119. P. 47.
- [11] *Graeff W., Materlik G.* // Nuclear Instrum. and Methods. 1982. V. 195. P. 97.
- [12] *Кушнир В.И., Суворов Э.В.* // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 44. С. 262.
- [13] *Кушнир В.И., Суворов Э.В.* // Phys. Stat. Sol. (A). 1990. V. 122. P. 391.
- [14] *Kikuta S., Imai Y., Iizuka T.* et al. J. Synchrotron Rad. 1998. V. 5. P. 670.
- [15] *Shvyd'ko Yu., Gerdau E., Jäschke J.* et al. // Phys. Rev. (B1). 1998. V. 57. P. 4968.
- [16] *Shvyd'ko Yu.V., Gerdau E.* // Hyperfine Interactions. 1999. V. 123/124. P. 741.
- [17] *Shvyd'ko Yu.V., Lucht M., Gerdau E.* et al. // J. Synchrotron Rad. 2002. V. 9. P. 17.
- [18] *Kohn V.G., Shvyd'ko Yu.V., Gerdau E.* // Phys. Stat. Sol. (B). 2000. V. 221. P. 597.
- [19] *Nikulin A.Yu., Davis J.R., Jones N.T.* et al. // Phys. Stat. Sol. (A). 2000. V. 179. P. 103.
- [20] *Чен Т.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 21. С. 1–5.
- [21] *Чен Т.* // Кристаллография. 2002. Т. 47. N 2. С. 1–6.
- [22] *Габриелян К.Т., Чуховский Ф.Н., Пискунов Д.И.* // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. В. 3 (9). С. 834–846.