

О ДИФРАКЦИОННОЙ ФОКУСИРОВКЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ "ПЛОСКАЯ ВОЛНА – ТОЧКА" ДВУХОСНО ИЗОГНУТЫМ КРИСТАЛЛОМ

К.Т. Габриелян, Д.И. Пискунов, Ф.Н. Чуховский, Г.О. Демирчян

Используя представления теории геометрической оптики, показана принципиальная возможность фокусировки рентгеновского излучения при брэгговской дифракции плоской монохроматической волны на двухосно изогнутом кристалле. Найдены условия изгиба кристалла и положение точки фокуса в вакууме.

Как известно ¹, показатель преломления в веществе рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda \sim 10^{-10}$ м с точностью до $10^5 \div 10^{-6}$ совпадает с единицей и по этой причине обычный подход к созданию фокусирующей оптики неприменим. Единственный практический путь — это использование явления дифракции рентгеновских лучей в кристаллах. В настоящее время известны несколько способов дифракционной фокусировки с помощью как плоских, так и изогнутых кристаллов. Было показано ²⁻⁶ (см. также ссылки в обзорах ^{7,8}), что одноосно изогнутые кристаллы фокусируют излучение в плоскости дифракционного рассеяния с образованием линейного фокуса.

Принципиальное значение для развития рентгеновской оптики имеет решение задачи пространственной фокусировки дифрагирующего пучка в точку с помощью двухосно изогнутого кристалла. Так, в ⁹ было дано обобщение известной схемы фокусировки по Иоганну, когда источник излучения и точка фокуса находятся в плоскости дифракционного рассеяния изогнутого кристалла и одновременно соединяющая их линия является осью изгиба кристалла в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракционного рассеяния. В ¹⁰ предложен способ фокусировки двухосно изогнутым кристаллом в условиях трехволновой дифракции.

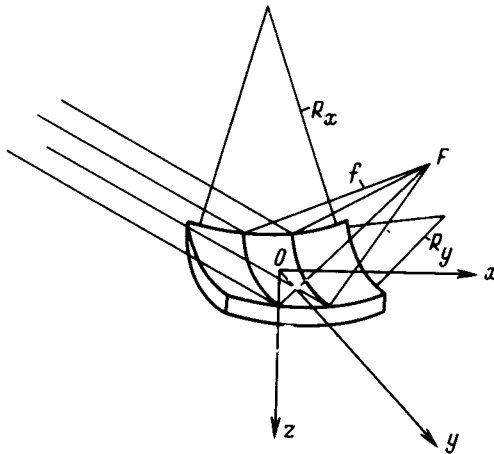


Схема дифракционной фокусировки на отражение
"плоская волна – точка"

В данном сообщении обсуждается возможность дифракционной фокусировки при брэгговском отражении плоской монохроматической волны от кристалла, изогнутого в двух взаимно-перпендикулярных Ox и Oy направлениях ((x, z) — плоскость дифракционного рассеяния). Предположим, что для падающей волны условие Вульфа – Брэгга выполняется в точке начала системы координат $(0,0,0)$, помещенной на поверхности изогнутого кристалла, и волновые вектора падающей k_0 и брэгговски отраженной k_h волн соответственно имеют компоненты симметричное брэгговское отражение, см. рисунок)

$$k_0 = k (\cos\theta, 0, \sin\theta), \quad k_h = (\cos\theta, 0, -\sin\theta), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, θ - угол Брэгга.

Вектор смещения $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, описывающий положение отражающих плоскостей двухосно изогнутого кристалла, имеет следующие компоненты ($|\partial u_i / \partial x_j| \ll 1$)

$$\mathbf{u} = (0, 0, u_z), \quad u_z = -x^2 / 2R_x - y^2 / 2R_y, \quad (2)$$

где R_x, R_y — радиусы изгиба кристалла, см. рис.

Нетрудно показать (см. ⁸), что в плоскости дифракционного рассеяния, отвечающей сечению $y = 0$, брэгговски отраженная от кристалла волна фокусируется на расстоянии

$$L_h = \sin\theta R_x / 2, \quad (3)$$

отсчитываемом от начала координат $x_0 = (0, 0, 0)$ в направлении волнового вектора \mathbf{k}_h .

Рассмотрим теперь ход лучей волн, отраженных в сечениях $y \neq 0$. С точностью до членов $|\partial u_i / \partial x_j| \ll 1$ включительно локальный вектор обратной решетки, соответствующий выбранной системе отражающих плоскостей изогнутого кристалла, равен

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0 - \nabla(\mathbf{h}_0 \mathbf{u}) \quad (4)$$

(\mathbf{h}_0 — вектор обратной решетки идеального (неизогнутого) кристалла).

При переходе волны из кристалла в вакуум тангенциальная компонента волнового вектора \mathbf{k}_h непрерывна и равна

$$\mathbf{k}_{ht} = \mathbf{k}_{0t} + \mathbf{h}_t \quad (5)$$

и согласно (2), (4) вектор \mathbf{h}_t имеет вид

$$\mathbf{h}_t = -2 \sin\theta k (x/R_x, y/R_y). \quad (6)$$

Принимая во внимание закон сохранения энергии

$$k_h^2 = k^2,$$

из (5), (6) с точностью до малых членов $x^2/R_x^2, y^2/R_y^2 \ll 1$ получаем следующее выражение для локальных значений волнового вектора на поверхности изогнутого кристалла

$$\mathbf{k}_h = k (\cos\theta - 2 \sin\theta x/R_x, -2 \sin\theta y/R_y, -\sin\theta - 2 \cos\theta x/R_x) \quad (7)$$

и соответствующие им уравнения траекторий лучей в вакууме

$$(x_p - x) / (\cos\theta - 2 \sin\theta x/R_x) = (y_p - y) / (-2 \sin\theta y/R_y) = z_p / (-\sin\theta - 2 \cos\theta x/R_x).$$

Отсюда сразу следует, что если для двухосно изогнутого кристалла выполняется условие

$$R_y = \sin^2\theta R_x = 2 \sin\theta L_h, \quad (8)$$

дифрагированное излучение фокусируется в вакууме в точке с координатами

$$\mathbf{x}_f = L_h (\cos\theta, 0, -\sin\theta). \quad (9)$$

Дифракционное уширение точки фокуса (9) вдоль осей Ox и Oy , как показывает непосредственный расчет на основе динамической теории дифракции (8), равно соответственно

$$\delta x_f \sim 2 \operatorname{ctg}\theta \Lambda, \quad \delta y_f \sim \lambda R_y / \sin\theta l_y, \quad (10)$$

где Λ — длина экстинкции рентгеновского излучения, отвечающая данному брэгговскому отражению, l_y — размер кристалла вдоль оси Oy . Так, для отражения (333) от кристалла кремния, Mo $K\alpha$ -излучения с длиной волны $\lambda = 0,7 \times 10^{-10}$ формулы (10) при $l_y \sim 10^{-2}$ м, $R_y \sim 1$ м дают $\delta x_f \sim \delta y_f \sim 10^{-6}$ м.

При оценке остроты фокусировки необходимо также принять во внимание коллимационное и хроматическое размытие фокального пятна за счет конечной угловой и спектральной ширины падающего излучения. Их влияние на фокусировку будет рассмотрено отдельно.

Таким образом, проведенное рассмотрение показывает принципиальную возможность пространственной фокусировки "плоская волна - точка" при брэгговском отражении рентгеновского излучения от двухосно изогнутого кристалла. Найдены условия изгиба кристалла (8), при выполнении которых он фокусирует излучение наподобие дифракционной линзы Френеля в световой оптике. Описанный выше способ фокусировки допускает очевидную аналогию применительно к брэгговскому отражению тепловых нейтронов и мессбауэровских квантов.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред, М.: ГИФМЛ, 1959, с. 510.
2. Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н. ЖЭТФ, 1975, 69, 477.
3. Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 385.
4. Сумбаев О.И., Лапин Е.Г. ЖЭТФ, 1980, 78, 802.
5. Кушнир В.И., Суворов Э.В. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 551.
6. Габриелян К.Т., Чуховский Ф.Н. ЖТФ, 1982, 52, 2127.
7. Чуховский Ф.Н. Металлофизика, 1980, 2, 3.
8. Чуховский Ф.Н. Металлофизика, 1981, 3, 3.
9. Berreman D.W., Stamatoff J., Kennedy S.J. Appl. Optics, 1977, 16, 2081.
10. Kushnir V.I., Kaganer V.M., Suvorov E.V. Acta Cryst., 1985, A41, 17.

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
15 октября 1987 г.