

Особенности дифракционной фокусировки рентгеновского излучения на одном и двух кристаллах

В. Г. Кон¹, И. А. Смирнова^{2, *}

¹ Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182.

² Института Физики Твердого Тела РАН, ул. Академика Осипяна, 2, Черногловка, 142432.

*irina@issp.ac.ru

Представлены результаты исследования эффекта дифракционной фокусировки методом численного моделирования экспериментов, в которых рентгеновская составная преломляющая линза формирует вторичный источник малого поперечного размера. Показано, что при слабом поглощении возникают осцилляции высоты пика фокусировки и ширины пучка в фокусе в зависимости от толщины кристаллов из-за эффекта экстинкции.

В динамической теории дифракции сферической волны описан эффект дифракционной фокусировки рентгеновского излучения в геометрии на прохождении [1]. Эффект обусловлен тем, что идеальный кристалл играет роль собирающей линзы для слабо поглощающейся части рентгеновской волны. Эффект реализуется в широкой области спектра рентгеновского излучения, если толщина кристалла $t = t_0$, где $t_0 = CL$ есть толщина фокусировки, пропорциональная расстоянию L между источником и детектором. Наиболее ярко эффект фокусировки проявляется в случае большого поглощения.

Еще один эффект дифракционной фокусировки был теоретически предсказан в случае отражения рентгеновской сферической волны последовательно на двух кристаллах при малом (нулевом) расстоянии между источником и детектором [2]. Экспериментально пучок ограничивается с помощью узкой щели, установленной перед первым кристаллом в геометрии прохождения. Дифрагируя в первом кристалле толщиной t_1 , он приобретает ширину $2t_1 \tan \theta$, где θ – угол Брэгга. При повторной дифракции во втором кристалле с толщиной $t_2 = t_1$, часть пучка вместо расширения до ширины $4t_1 \tan \theta$, испытывает дифракционное сжатие и восстанавливает изображение исходной щели с точностью $\Delta x = (L/\pi) \tan \theta$, где L – экстинкционная длина для данного отражения. В работе [3] было показано, что учет расстояния приводит к расщеплению условия фокусировки на три случая: (1) $t_1 + t_2 = t_0$, (2) $t_1 = t_2 - t_0$ и (3) $t_1 = t_2 + t_0$. В первом случае два кристалла работают как один кристалл, и фокусируется часть излучения с минимальным поглощением. Во 2-м и в 3-м случаях фокусиру-

ются части излучения с различным поглощением. При $t_0 = 0$ ($t_1 = t_2$) оба последних случая работают одновременно и приводят к относительно малому размеру фокуса. В данной работе этот эффект исследуется методом численного моделирования эксперимента с использованием синхротронного излучения (СИ) и составной преломляющей линзы (СПЛ), которая формирует вторичный источник малого размера. Показано, что с помощью СПЛ можно легко управлять геометрией дифракции и иметь источник высокой яркости и малого размера, что намного лучше, чем в случае щели.

Результаты и обсуждение

Возможная схема эксперимента показана на рисунке 1 для случая одного кристалла (С). В случае двух кристаллов они близки друг к другу, однако небольшое расстояние все же необходимо для разделения проходящих и отраженных пучков в пространстве. Источник СИ, расположен на большом расстоянии z_0 от СПЛ. Монохроматор из двух кристаллов кремния (М) выделяет заданную частоту. Затем линза (СПЛ) формирует расходящийся пучок как будто вторичный источник, находится в фокусе СПЛ. Детектор (D) регистрирует профиль интенсивности рентгеновского излучения $I(x) = |E(x)|^2$.

В случае двух кристаллов амплитуда электрического поля на детекторе равна:

$$E(x) = \int dx_1 P_C^2(x - x_1) \int dx_2 P(x_1 - x_2, Z_1) T(x_2) P(x_2 - x_0, z_0) \quad (1)$$

где $Z_1 = z_f + z_1$ есть расстояние от СПЛ до детектора (рис.1). Здесь функция $P(x,z)$ является пропагатором Френеля (поперечная часть сферической волны в паракиальном приближении), $P_C(x)$ есть пропагатор кристалла как фурье-изображение амплитуды отражения плоской волны кристаллом $P_C(q)$, $T(x)$ есть функция, описывающая изменение волны при прохождении через СПЛ. Численные расчеты выполнены с помощью программы на языке ACL. Сам язык и интерпретатор для него на языке программирования Java разработан одним из авторов работы (Кон). Интерпретатор можно бесплатно скачать вместе с описанием в интернете на сайте автора [4].

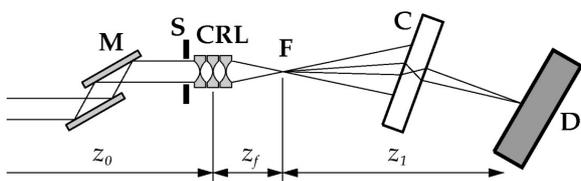


Рисунок 1. Схема дифракции.

Как видно на рис.1, всегда есть конечное расстояние z_1 от источника до плоскости регистрации. В результате расчетов показано (см. рис. 2), что в случае двух кристаллов ширина пучка на детекторе быстро увеличивается от 2 мкм до 8 мкм, и более 10 мкм для более мягкого излучения, с ростом расстояния. Из этого следует, что эффект фокусировки излучения двумя кристаллами нельзя использовать в качестве спектрометра рентгеновского излучения, как предполагалось ранее [5].

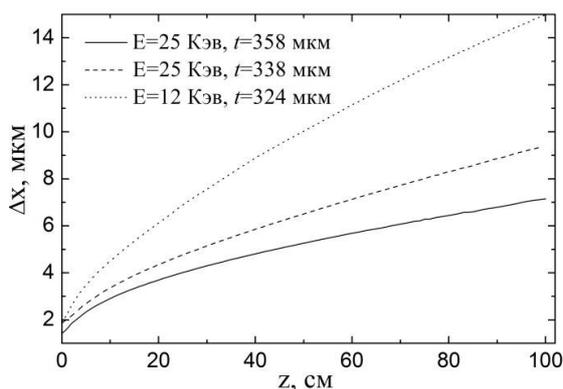


Рисунок 2. Зависимость ширины пучка от расстояния z_1 (источник - плоскость регистрации), отражение Si(220).

Используя в эксперименте СПЛ можно легко реализовать случай почти нулевого расстояния источник-детектор и исследовать двухкристальную фокусировку излучения более детально. Случай почти нулевого расстояния может быть реализован,

если СПЛ сфокусировать на детектор, а набор из двух кристаллов поставить между СПЛ и фокусом линзы.

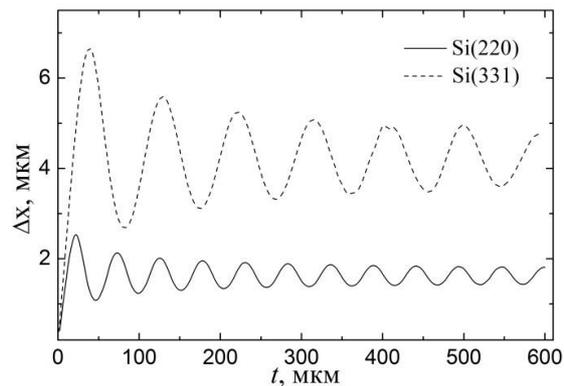


Рисунок 3. Зависимость ширины фокусировки от толщины кристалла для $E = 25$ КэВ.

Для этого случая были изучены осцилляции ширины пучка в фокусе в зависимости от толщины кристалла (рис.3), причем осциллирует как ширина фокуса, так и максимальная интенсивность. Природа осцилляций такова. Пока нет поглощения, плоская волна под углом Брэгга дифрагирует то в проходящий пучок, то в отраженный пучок. Полная интегральная интенсивность, не меняется, но интегральная интенсивность в отраженном пучке осциллирует с длиной экстинкции. Когда волна не плоская, а сферическая, то ее можно представить в виде суперпозиции плоских волн. При этом осцилляции сохраняются, только имеют более слабую амплитуду. Эти же эффекты происходят и при увеличении поглощения. На рис. 3 показаны графики осцилляций для разных отражений кремния, ширина фокусировки больше для более слабого отражения.

Аналогичные осцилляции от толщины кристалла также наблюдаются в случае фокусировки на одном кристалле.

Литература

1. А. М. Афанасьев, В. Г. Кон // ФТТ, Т. 19, С. 1775 (1977).
2. В. Л. Инденбом, И. Ш. Слободетский, К. Г. Труни. // ЖЭТФ, Т. 66, С. 1100 (1974).
3. V. V. Aristov, A. A. Snigirev, A. M. Afanasev, V. G. Kohn, V. I. Polovinkina // Acta Cryst., A. 42, 426 (1986).
4. <http://kohnvict.ucoz.ru/acl/acl.htm>
5. В.Л. Инденбом, Э. В. Суворов // Письма в ЖЭТФ, Т. 23, В. 9, С. 485 (1976).