

Спектрометр синхротронного излучения на основе дифракционной фокусировки

В. Г. Кон¹, И. А. Смирнова^{2,*}, И. И. Снигирева³, А. А. Снигирев⁴

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

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

³ European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France.

⁴ Балтийский Федеральный Университет, ул. А. Невского, 14, Калининград, 236041.

*irina@issp.ac.ru

В работе экспериментально и теоретически изучены секционные топограммы в схеме, когда вторичный источник излучения формируется составной преломляющей линзой. Эксперимент был выполнен в ESRF (Гренобль, Франция). Теоретическое моделирование эксперимента впервые явным образом учитывает фокусировку излучения с помощью линзы наряду с модификацией излучения в воздухе и в процессе дифракции излучения в кристалле. Численное моделирование эксперимента для монохроматического пучка и решение обратной задачи позволило вычислить спектр монохроматора с более высокой точностью.

Одним из основных результатов теории дифракции сферической волны, которая явно учитывала расстояние от источника до детектора [1], было предсказание эффекта дифракционной фокусировки (ДФ) расходящегося излучения кристаллом в форме пластины. В работе [2] был предложен новый тип спектрометра на основе эффекта дифракционной фокусировки, который способен регистрировать весь энергетический спектр излучения сразу, то есть за одно измерение, с точностью 2×10^{-6} . Такой спектрометр способен измерить спектр одного суперкороткого импульса рентгеновского лазера на свободных электронах с необходимой точностью.

Идея спектрометра состоит в следующем. Если расстояние до кристалла значительно больше, чем расстояние после кристалла, то разные монохроматические компоненты фокусируются в результате эффекта ДФ с разным смещением на детекторе. Это смещение определяется тем, что кристалл выбирает из расходящегося излучения только ту его часть, которая удовлетворяет условию Брэгга, а угол Брэгга зависит от энергии. Разрешение такого спектрометра зависит от того, насколько хорошо будет сфокусирована монохроматическая компонента за счет эффекта ДФ. То есть для спектрометра необходим источник с высокой угловой расходимостью и малыми размерами фокуса. Для решения данной проблемы было предложено использовать вторичный источник излучения, который формируется в фокусе составной преломляющей линзы (СПЛ).

При этом надо обеспечить большое расстояние от линзы до кристалла и малое расстояние после кристалла. Если это условие не выполняется, то разрешение спектрометра будет невысоким.

В данной работе представлены результаты первой экспериментальной реализации нового типа спектрометра, использующего эффект ДФ рентгеновского излучения кристаллом в форме пластины на источнике синхротронного излучения (СИ) 3-го поколения в ESRF (Гренобль, Франция). Как известно, СИ имеет очень широкий спектр, но на многих станциях стационарно установлены монохроматоры, которые резко ограничивают спектр излучения. Убрать или заменить монохроматор невозможно. Поэтому в данной работе был измерен относительно узкий спектр, который формируется монохроматором.

Результаты и обсуждение

Эксперимент был выполнен на станции ID06. Источник излучения имел эффективные размеры 30 мкм вертикально и 900 мкм горизонтально (рис. 1). На расстоянии 31 м от источника находился двухкристальный монохроматор Si (111) с вертикальной плоскостью дифракции и первичная щель размером 0.8 мм. Относительная ширина спектра излучения после монохроматора была равна $\Delta\lambda/\lambda = 1.5 \times 10^{-4}$. Для формирования вторичного источника использовалась СПЛ из Ве на расстоянии 56 м от источника. Линза имела 50 двояковогнутых элементов с радиусом кривизны 50 мкм.

Для энергии 12 кэВ, согласно теории СПЛ [3] фокусное расстояние линзы z_f равно 21.2 см, диаметр эффективной апертуры равен 225 мкм. Энергетический интервал, который на таком расстоянии способна зафиксировать линза, $\Delta E = 76.2^\circ \text{эВ}$. Кристалл-спектрометр из Si был вырезан в форме клина, с переменной толщиной по вертикальной оси, а плоскость дифракции была горизонтальной, отражение 111. Для регистрации интенсивности использовался CCD-детектор с размером пиксела 0.645 мкм. Кристалл располагался близко к детектору таким образом, что расстояние не превышало 3 см.

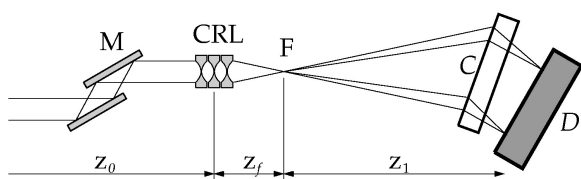


Рисунок 1. Схема дифракции. М - монохроматор, CRL - линза, F - фокус, C - кристалл, D - детектор.

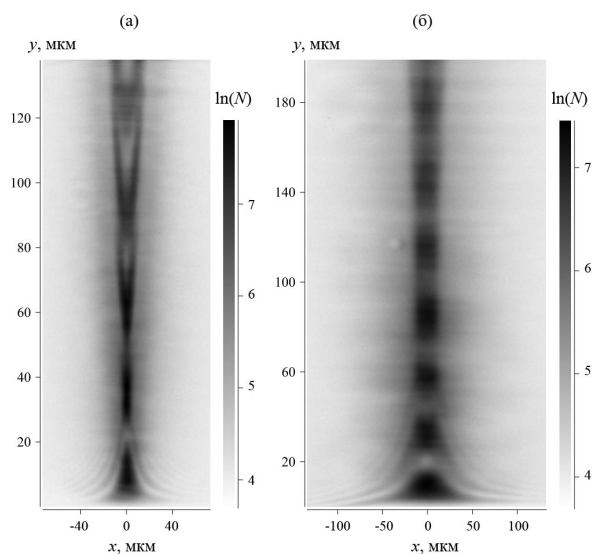


Рисунок 2. Экспериментальные топограммы, $E=12$ кэВ. По оси y указана толщина кристалла. На шкале градаций серого показан логарифм числа импульсов в CCD детекторе.

На рис. 2 показаны две топограммы клиновидного кристалла из Si на малом расстоянии 49 см (а) и на большом расстоянии 147 см (б) от центра линзы. Эффект ДФ реализуется, если толщина кристалла $t^\circ = t_0$, где $t_0 = CL$ есть толщина фокусировки, пропорциональная расстоянию L между источником и детектором, C есть коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров дифракции. Для представленных случаев t_0 равно 18.5 мкм (а) и 83.9 мкм (б). Эффективность ДФ растет с ростом t_0 . При этом желательно, чтобы на этой толщине

укладывалось много длин экстинкции Λ , то есть выполнялось условие $t_0 \gg \Lambda$. Экстинкционная длина для Si (111) равна 28.6 мкм. Следовательно, в первом случае $t_0 \ll \Lambda$, и поэтому эффект ДФ практически отсутствует, но четко видны интерференционные полосы, описываемые теорией Като [4]. Во втором случае $t_0 \gg \Lambda$, поэтому на топограмме эффект ДФ имеет место на толщине кристалла около 90 мкм, при этом ширина изображения равна $s_e = 25.8$ мкм. В этом случае изображение клиновидного кристалла очень сильно размазано вдоль оси x по сравнению с первым случаем. Размазывание изображения в основном связано с конечным спектральным составом излучения, падающего на исследуемый кристалл.

Для анализа экспериментальных данных была разработана компьютерная программа на языке ACL [5], которая моделирует фокусировку СИ линзой и последующую дифракцию излучения в кристалле. Расчет показал, что минимальная теоретическая ширина собственного изображения в области фокусировки получается при толщине кристалла $t = 90$ мкм и равна $s_i = 4.5$ мкм. Из теории следует, что для экспериментальных условий при размере источника 900 мкм, размер изображения источника в фокусе равен $s_s = 3.48$ мкм. Если считать, что уширение происходит по гауссовому закону, то тогда уширение интерференционной картины связанное с некогерентностью излучения $s_\omega = (s_e^2 - s_i^2 - s_s^2)^{1/2}$. В результате получаем, что $s_\omega = 25.2$ мкм. Соответственно теоретическая оценка на некогерентность излучения дает $\Delta E/E = 1.2 \times 10^{-4}$.

В работе показано, что новый тип спектрометра с успехом работает на СИ в стационарном режиме и несомненно может быть использован также в EXAFS и XANES методах.

Литература

1. А. М. Афанасьев, В. Г. Кон // ФТТ, Т. 19, С. 1775 (1977).
2. V. G. Kohn, O. Y. Gorobtsov, I. A. Vartanyants // J. Synchrotron. Rad. V. 20. P. 258 (2013).
3. В. Г. Кон // ЖЭТФ, Т. 124, С. 224 (2003).
4. N. Kato // Acta Cryst., V. 14, С. 526; 627 (1961)
5. <http://kohnvict.ucoz.ru/acl/acl.htm>