

# Спектрометр синхротронного излучения на основе дифракционной фокусировки

В. Г. Кон<sup>1</sup>, И. А. Смирнова<sup>2,\*</sup>, И. И. Снигирева<sup>3</sup>, А. А. Снигирев<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182.

<sup>2</sup> Института Физики Твердого Тела РАН, ул. Академика Осипьяна, 2, Черногловка, 142432.

<sup>3</sup> European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, France.

<sup>4</sup> Балтийский Федеральный Университет, ул. А. Невского, 14, Калининград, 236041.

\*[irina@issp.ac.ru](mailto: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  $2 \times 10^{-6}$ . 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).

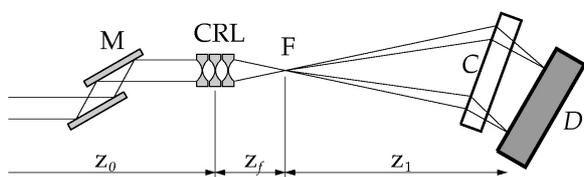
При этом надо обеспечить большое расстояние от линзы до кристалла и малое расстояние после кристалла. Если это условие не выполняется, то разрешение спектрометра будет невысоким.

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.

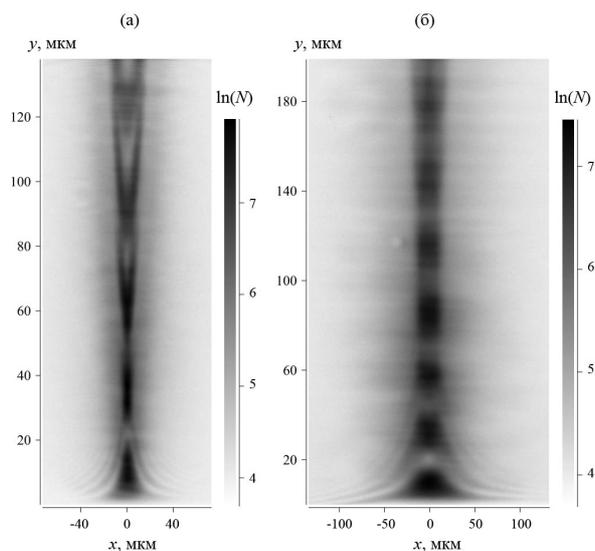
## Результаты и обсуждение

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  $A$ , то есть выполнялось условие  $t_0 \gg A$ . Экстинкционная длина для Si (111) равна 28.6 мкм. Следовательно, в первом случае  $t_0 \ll A$ , и поэтому эффект ДФ практически отсутствует, но четко видны интерференционные полосы, описываемые теорией Като [4]. Во втором случае  $t_0 \gg A$ , 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>