

УДК 535.8: 537.531

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЙ МОНОХРОМАТОР УЛЬТРАМЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА СТАНЦИИ МЕТРОЛОГИИ ВЭПП-2М С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗЕРКАЛ

© 2000 г. Н. Г. Гаврилов<sup>1</sup>, А. Г. Легкодимов<sup>1</sup>, А. Д. Николенко<sup>1</sup>,  
В. Ф. Пиндиорин, В. А. Чернов<sup>2</sup>, А. Н. Субботин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.А. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саратов, Россия

Поступила в редакцию 06.07.99 г.

Описан двухзеркальный монохроматор для исследований в ультрамягком рентгеновском диапазоне (УМР). Имеющийся набор зеркал и фильтров обеспечивает рабочий диапазон монохроматора от 100 до 1800 эВ. Приведены оценки спектрального разрешения монохроматора вблизи *L*-края никеля (700–1100 эВ). С использованием эталонного детектора измерены абсолютные потоки фотонов после монохроматора.

### ВВЕДЕНИЕ

В статье приведено описание двухзеркального монохроматора, изготовленного в Институте ядерной физики СО РАН в 1998 году для станции метрологии в ультрамягком рентгеновском (УМР) излучении на накопителе ВЭПП-2М [1]. Значительная часть метрологических измерений, связанных с калибровкой спектральных характеристик рентгеночувствительных детекторов или рентгеновской оптики, не накладывает жестких требований на спектральное разрешение монохроматора. В связи с этим многослойные рентгеновские зеркала (МСЗ) представляются весьма удобным оптическим элементом для проведения подобных работ. Относительного спектрального разрешения от нескольких десятков до сотни, достигаемого МСЗ, оказывается достаточно для проведения большей части спектральных калибровок. Большие рабочие углы и широкая кривая качания МСЗ позволяют обходиться в конструкции монохроматора без точной механики и сложных юстировочных процедур.

### УСТРОЙСТВО МОНОХРОМАТОРА

Оптическая схема монохроматора приведена на рис. 1. Для удобства работы с пучком использована двухзеркальная оптическая схема типа “бабочка”. Центр пучка совмещен с серединой первого зеркала, угол  $\theta$  зеркала относительно пучка, расстояние  $h$  и угол  $\alpha$  между зеркалами регулируются с помощью шаговых двигателей (ШД) дистанционно без нарушения вакуума в экспериментальном объеме. Продольное смещение  $x$  второго зеркала относительно первого фиксируется при его установке на монохроматор. Параметры из-

меняются в следующих пределах:  $10 < x < 30$  мм;  $7 < h < 58$  мм;  $-7^\circ < \alpha < +7^\circ$ ;  $6.5^\circ < \theta < 70^\circ$ ;  $L = 38$  мм ( $L$  – длина зеркала).

Фильтры установлены на подвижном диске, и их можно менять по мере необходимости, не нарушая вакуум в экспериментальном объеме. Детекторы (эталонный или калибруемые) также установлены на подвижном диске и вводятся в пучок по очереди. В качестве эталонного детектора использован фотодиод AXUV-100Ti [2] с предусилителем 100HYB1. Имеющиеся на сегодняшний день пары W/Si и Fe/C многослойных зеркал дают возможность перекрыть диапазон энергий от 150 эВ до 1800 эВ.

Конструкция монохроматора позволяет реализовывать гибридные схемы, устанавливая вместо второго зеркала отражающую решетку или кристалл. Особую привлекательность гибридная схема приобретает при использовании радиационно-нестойких кристаллов.

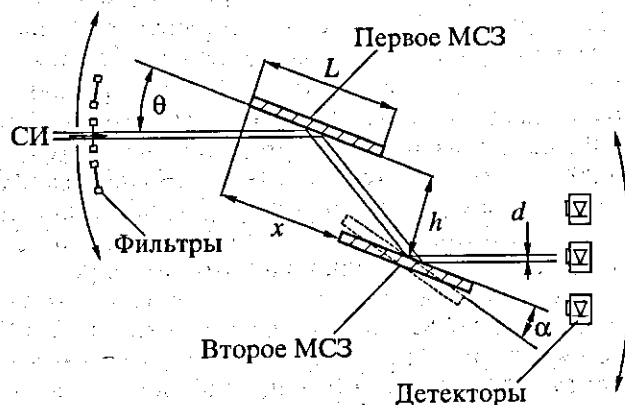


Рис. 1. Оптическая схема монохроматора.

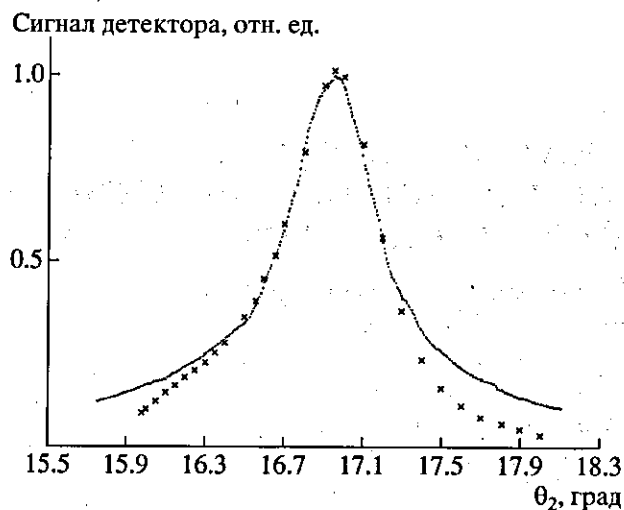


Рис. 2. Кривая качания второго зеркала монохроматора при неподвижном первом зеркале. Непрерывной линией представлены результаты измерений, квадратики — расчетная зависимость.

### СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОХРОМАТОРА

Спектральная функция монохроматора определяется спектральным пропусканием фильтров и коэффициентом спектрального отражения каждого из двух многослойных зеркал, зависящим от угла поворота зеркала относительно падающего на него излучения. Коэффициент отражения есть одна и та же функция угла падения для обоих зеркал, поскольку они изготовивались как единое зеркало, впоследствии распиленное на две части. Тогда спектральная функция монохроматора запишется в виде:

$$F(\theta_1, \theta_2, \epsilon_p) = \exp\left(\sum_i \mu_i(\epsilon_p) x_i\right) M(\theta_1, \epsilon_p) M(\theta_2, \epsilon_p), \quad (1)$$

где  $F$  — спектральная функция монохроматора;  $\epsilon_p$  — энергия фотонов;  $\theta_{1,2}$  — угол скольжения пучка относительно первого и второго зеркала;  $\mu_i$  — поглощение  $i$ -го химического элемента, входящего в состав фильтров;  $x_i$  — концентрация  $i$ -го химического элемента в фильтре;  $M$  — спектральный коэффициент отражения многослойного зеркала.

Расчет показывает, что при углах  $\theta_1 = \theta_2$  от  $10^\circ$  до  $20^\circ$  для имеющихся фильтров основной вклад в спектральную функцию (99.9–98% площади под графиком функции) дает первый порядок отражения, спектральная ширина которого определяет спектральное разрешение монохроматора. Простым способом определения этой ширины является сканирование второго зеркала углом поворота  $\theta_2$  вблизи угла  $\theta_1$  при одновременном измерении тока с эталонного детектора, установленного после монохроматора.

Ток, ожидаемый с эталонного детектора при освещении его приемной поверхности синхротронным излучением (СИ), прошедшим через монохроматор, вычисляется по формуле:

$$I(\theta_1, \theta_2) = \eta_c \frac{e_0}{E_0} \int_0^\infty SR(\epsilon_p) F(\theta_1, \theta_2, \epsilon_p) \eta_q(\epsilon_p) d\epsilon_p, \quad (2)$$

где  $\eta_c$  — эффективность сбора зарядов в детекторе;  $\eta_q$  — квантовая эффективность детектора;  $e_0$  — заряд электрона;  $E_0$  — энергия образования пары в кремнии;  $SR$  — спектральное распределение энергии СИ из накопителя, получено интегрированием спектрально-угловой зависимости СИ по площади диафрагмы детектора.

Значения  $\eta_c$  и  $\eta_q$  приняты равными единице. Титановое покрытие детектора толщиной  $2000 \text{ \AA}$  учитывается как дополнительный фильтр.

Для каждого угла поворота зеркала можно установить взаимно-однозначное соответствие с энергией фотонов, имеющих максимально возможный при этом угле коэффициент отражения. Значение энергии подчиняется закону Вульфа-Брэгга для первого порядка отражения, и ее можно назвать энергией, на которую настроено зеркало в отдельности или монохроматор в целом, если его зеркала установлены параллельно друг другу.

### ОПИСАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во время измерений энергия частиц в накопителе была  $680 \text{ МэВ}$ , радиус кривизны орбиты в точке излучения  $1.22 \text{ м}$ , расстояние до точки излучения  $16 \text{ м}$ , перед монохроматором была установлена квадратная диафрагма со стороной  $3 \text{ мм}$ . Измерения проводились на паре W/Si многослойных зеркал (150 слоев, период  $2.68 \text{ нм}$ , толщина межслойной диффузии  $0.35 \text{ нм}$ ).

На рис. 2 представлены экспериментальная и расчетная кривые качания второго зеркала при неподвижном первом зеркале. Угол скольжения пучка СИ относительно первого зеркала был выбран  $\theta_1 = 17^\circ$  ( $810 \text{ эВ}$ ). Второму зеркалу сообщалось равномерное вращение с угловой скоростью  $0.2 \text{ град/мин}$ , сигнал с детектора измерялся каждые  $0.7 \text{ с}$ . Значение угла второго зеркала изменялось в пределах  $\theta_2 = 16\text{--}18^\circ$  ( $857\text{--}765 \text{ эВ}$ ). Расчет кривой качания для второго зеркала проводился по формуле из [3]. Ширина кривой качания  $I(\theta_1 = 17^\circ, \theta_2)$  на полувисоте составила  $0.61^\circ$ , что хорошо согласуется с расчетным значением, полученным с использованием результатов [3]. Кривая качания  $I(\theta_1 = 17^\circ, \theta_2)$ , представляет свертку кривых качания обоих зеркал. Теоретическая ширина кривой качания МСЗ для энергии  $810 \text{ эВ}$  составляет  $0.44^\circ$ , что дает в приближении гауссовского профиля кривой качания МСЗ, значение  $0.44^\circ \cdot \sqrt{2} = 0.62^\circ$ . Наблюда-

емое на рис. 2 уширение экспериментальной кривой качания относительно расчетной, вдали от максимума, объясняется как флуктуацией периода используемых МСЗ, так и неполным подавлением фильтрами ультрамягкой компоненты СИ, связанной с зеркальным отражением от поверхности МСЗ. Кривая качания монохроматора, как системы из двух параллельных зеркал, примерно в  $\sqrt{2}$  раз уже кривой качания одного зеркала и ее ширина составляет  $0.44^\circ/\sqrt{2} = 0.31^\circ$ .

Закон Вульфа-Брэгга позволяет перевести ширину кривой качания в спектральное разрешение монохроматора. В рассмотренном диапазоне оно составляет 13 эВ. Такая оценка спектрального разрешения монохроматора согласуется с результатами измерений, приведенными на рис. 3: монохроматор позволяет различить L2 и L3-края никеля, находящиеся на расстоянии 17 эВ друг от друга.

На рис. 3 представлены экспериментально снятые зависимости тока эталонного детектора от энергии настройки монохроматора с разными наборами фильтров. Зеркала устанавливались параллельно друг другу. Для обоих зеркал углы  $\theta_{1,2}$  равномерно, в течение четырех минут, изменялись от 12 до 17°, измерение тока детектора проводилось каждые 0.7 с. Для снятия кривой А перед монохроматором устанавливался фильтр из полимерной пленки СН толщиной 0.55 мкм с магниевым покрытием толщиной 6.5 мкм, а перед детектором – никелевый фильтр (0.66 мкм СН + 0.37 мкм Ni). Кривая В соответствует измерениям, при которых магниевый фильтр был заменен на медный (0.7 мкм СН + 0.26 мкм Cu).

Кривая А на рис. 3 позволяет определить скачки, соответствующие L1-, L2-, и L3-краям поглощения никеля. Положения L2- и L3-краев согласуются с табличными значениями (853 и 870 эВ, соответственно), приведенными в [4] с точностью ~1 эВ. Край L1 смещен относительно табличного значения, примерно на 10–12 эВ (~1020 эВ по сравнению с табличным значением 1008 эВ) [4]. Такие же результаты дает анализ кривой В – определяют положения L-скачков меди: L1 (1096 эВ), L2 (952 эВ) и L3 (932 эВ), соответствующие табличным значениям [4].

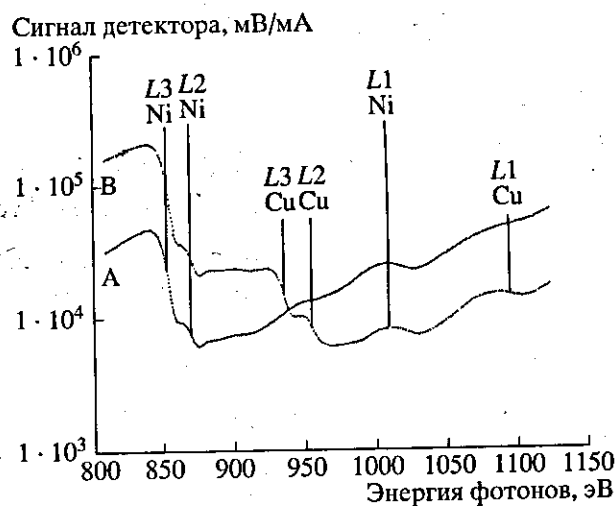


Рис. 3. Экспериментальные спектры, снятые на СИ с использованием разных фильтров: А – фильтры содержат Mg и Ni, В – фильтры содержат Ni и Cu. На графиках четко прослеживаются L1(1008 эВ), L2 (870 эВ) L3(853 эВ) – края поглощения никеля и L1 (1096 эВ), L2(952 эВ) и L3(932 эВ) – края поглощения меди.

Паспортный коэффициент усиления предусилителя детектора составляет  $10^9 \pm 3\%$ , что позволяет оценить абсолютный поток фотонов после монохроматора. Вблизи энергии максимального пропускания оптических элементов монохроматора  $E = 840$  эВ при наличии медного и никелевого фильтров измеренный поток фотонов после монохроматора сквозь прямоугольную диафрагму  $2 \times 3$  мм составил  $1.2 \cdot 10^6$  фотонов/сек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chkhalo N.I., Evstigneev A.V., Kholopov M.A. et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1995. V. A359. P. 440.
2. <http://www.ird-inc.com/axuvabs.html>. Описание детектора.
3. [http://www-cxro.lbl.gov/optical\\_constants/multi2.html](http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/multi2.html). Программа расчета спектрального отражения многослойных зеркал.
4. [http://www-cxro.lbl.gov/opticalconstants/pert\\_form.html](http://www-cxro.lbl.gov/opticalconstants/pert_form.html). Программа расчета спектрального пропускания рентгеновских фильтров.

## The Two Mirrors Monochromator for Soft X-Ray Metrology Station of VEPP-2M with Use of Multilayer Mirrors

N. G. Gavrillov, A. G. Legkodymov, A. D. Nikolenko, V. F. Pindyurin, V. A. Chernov, A. N. Subbotin

The two X-ray mirrors monochromator fabricated at the Budker Institute of Nuclear Physics is described. This device was designed for use on the soft X-ray metrology station of VEPP-2M storage ring and tested at pressure  $10^{-5}$  Pa. The available set of mirrors and filters allows to surpass the energy region from 100 eV to 1800 eV. Some calculated spectral characteristics are presented. We propose to achieve the experimental results concerned to sensitivity of semiconductor detectors and transmission of thin film X-ray filters measurements in the first half year of 1999.