

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.384 : 649.004.14

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ МОНОХРОМАТОР ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© П. С. Заверткин¹, Д. В. Ивлюшкин¹, М. Р. Машковцев¹,
А. Д. Николенко¹, С. А. Сутормина¹, Н. И. Чхало²

¹Институт ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

²Институт физики микроструктур РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105

E-mail: A.D. Nikolenko@inp.nsk.su

Представлен монохроматор метрологической станции синхротронного излучения «Космос». Приведены результаты тестирования монохроматора в поддиапазоне энергий 2000–6000 эВ с использованием кристаллов Si (111). Получено спектральное разрешение на уровне $\Delta E/E = 10^{-4}$. Описана методика проверки спектральной чистоты полученного монохроматического излучения. Отмечена возможность использования монохроматора для спектроскопических измерений в указанном поддиапазоне.

Ключевые слова: синхротронное излучение, мягкий рентген, метрология, монохроматор.

DOI: 10.15372/AUT20190201

Введение. Метрологическая станция «Космос» [1] была запущена в 2007 году в Сибирском международном центре синхротронного терагерцевого излучения на сверхвысоковакуумном канале № 10 вывода синхротронного излучения (СИ) из накопителя ВЭПП-4 (Россия) [2]. Главное назначение станции состоит в разработке и реализации метрологических методик в мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах. Основной интерес у потребителей вызывает калибровка спектральной чувствительности различного рода детекторов, а также отражательных характеристик рентгеновской оптики. Для расширения круга решаемых задач на станции была произведена замена монохроматора. Конструкция ранее используемого монохроматора описана в [3]. В качестве спектральных элементов в монохроматоре в зависимости от задачи устанавливаются либо дифракционная решётка, либо многослойные зеркала, либо кристаллы Si (111) (энергии фотонов 4–100 эВ, 80–3000 эВ, 2000–6000 эВ соответственно). Новый монохроматор также базируется на плоских оптических элементах, но имеет более гибкую систему настройки элементов и позволяет охватить широкий диапазон рабочих углов, а также использовать в составе монохроматора спектральные пары оптических элементов с различными характеристиками (кристаллы с разными периодами, многослойное зеркало плюс кристалл, многослойное зеркало плюс решётка и т. д.). В ведущих мировых центрах синхротронного излучения проблема монохроматизации в ВУФ- и МР-диапазонах также решается с применением всех перечисленных спектральных элементов. Так, на накопителе BESSY-II (Германия) подавляющее большинство каналов, функционирующих в МР- и

ВУФ-диапазонах, используют дифракционные решётки в сочетании с фокусирующей оптикой полного внешнего отражения на основе тороидальных и цилиндрических зеркал. В [4] описаны фокусирующая система и монохроматор метрологического канала РМ-1. Канал ALOISA [5] на накопителе Elettra (Италия) оснащён специализированным гибридным монохроматором, включающим в себя как решётки, так и кристаллы. Монохроматор был создан в начале 2000-х годов и успешно функционирует в настоящее время. На канале также использована фокусирующая оптика полного внешнего отражения на основе тороидальных и цилиндрических зеркал. Канал BL 2-ВМ [6] на накопителе APS (США) оснащён двухзеркальным монохроматором на базе многослойных рентгеновских зеркал. Работы ведутся с применением плоских элементов.

Все перечисленные монохроматоры успешно функционируют для выполнения широкого круга исследовательских и метрологических задач. Отличие монохроматора, описанного в предлагаемой работе, состоит в том, что он позволяет использовать все три типа перечисленных спектральных элементов. Спектральное разрешение, полученное на данном монохроматоре, не уступает спектральному разрешению зарубежных аналогов. В оптической системе канала используются только плоские элементы, что даёт возможность строить топографические изображения для калибруемых оптических элементов и реализовывать более широкий спектр метрологических методик. Также на канале «Космос» реализована система дифференциальной отстройки, позволяющая эксплуатировать экспериментальный объём в условиях относительно невысокого вакуума (порядка 10^{-4} Па), что даёт возможность проводить калибровки спектрометрической аппаратуры космического базирования, ориентированной на эти вакуумные условия. Как показывает практика, такая аппаратура, несовместимая с вакуумным прогревом, встречается достаточно часто. Все перечисленные зарубежные установки предъявляют существенно более жёсткие требования к вакуумной совместимости исследуемых объектов (10^{-6} – 10^{-8} Па).

Целью предлагаемой работы является создание универсального монохроматора ВУФ- и МР-диапазонов, позволяющего использовать различные оптические спектральные элементы и совместимого с вакуумом 10^{-4} Па. Кроме того, конструкция монохроматора должна представлять возможность реализации гибридных оптических схем с одновременным использованием двух разных спектральных элементов.

Компоновка станции. Белый пучок СИ из поворотного магнита ВЭПП-4 проходит через систему предварительной коллимации, два блока фильтров и попадает в объём монохроматора (28,6 м от точки излучения), где претерпевает отражения от оптических элементов. Все элементы монохроматора (зеркала полного внешнего отражения, решётки, кристаллы, многослойные зеркала) выполнены в плоской геометрии. В конструкции монохроматора предусмотрена возможность вывода оптических элементов из прямого пучка СИ в целях проведения работ на белом излучении. После монохроматора пучок проходит через финальный блок фильтров, выходные щели (700 мм от монохроматора) и попадает в экспериментальный объём. Расстояние от приёмного фланца экспериментального объёма до точки излучения составляет 29,7 м. Оконечный экспериментальный объём имеет большие размеры (700 × 500 × 450 мм), что даёт возможность калибровать среднегабаритную аппаратуру как единое целое. Также размер экспериментального объёма позволяет установить гониометры для проведения рефлектометрических измерений.

В состав станции входит набор детекторов для решения ряда метрологических задач. Эталонный детектор (кремниевый фотодиод типа ФДУК-100УВ [7]) используется для абсолютной калибровки детекторов заказчика. Вторично-электронный умножитель ВЭУ-7 на основе микроканальных пластин даёт возможность проводить относительные измерения на низкоинтенсивных потоках фотонов вплоть до регистрации отдельных рентгеновских квантов. Двухкоординатный детектор на основе ПЗС-матрицы [8] позволяет исследовать морфологию и размеры пучков, отражённых от оптических элементов, наблюдать

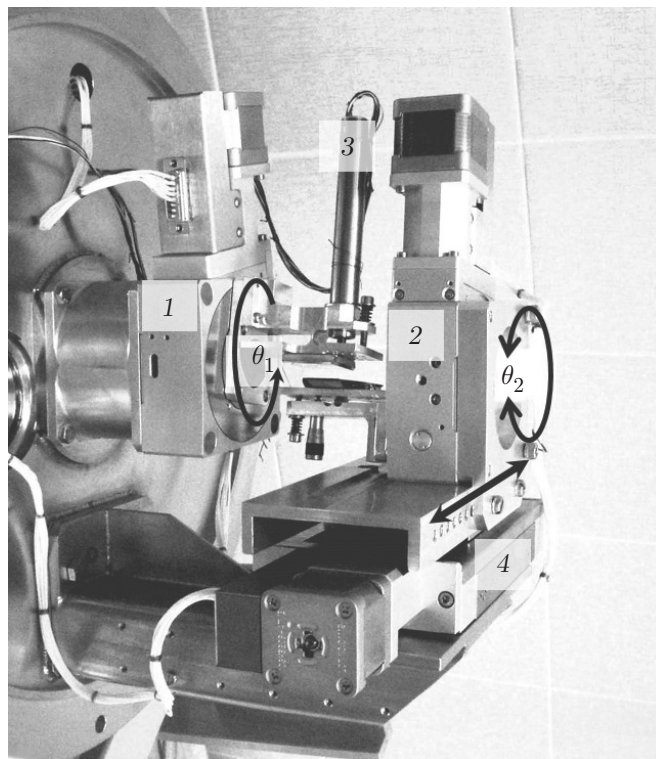


Рис. 1. Общий вид монохроматора (1, 2 — гониометры первого и второго зеркал, 3 — актуатор подстройки первого зеркала, 4 — подвижка продольного перемещения второго зеркала)

их перемещение при сканировании по спектру, а также устранять вероятные паразитные отсветы, диффузную засветку и другие нежелательные оптические эффекты. Детекторы станции устанавливаются в зависимости от задачи на линейном двухкоординатном манипуляторе либо на гониометре. Двухкоординатный манипулятор позволяет последовательно вводить в пучок калибруемые детекторы, а также снимать их карты чувствительности. В случае установки детекторов на гониометр появляется возможность проведения рефлектометрических измерений для различных отражающих рентгеновских элементов.

Оптическая схема монохроматора. Монохроматор создавался для работы с многослойными зеркалами, однако, как показали последние измерения, он может быть успешно использован для работы с кристаллами. Внешний вид монохроматора приведён на рис. 1. В состав механической части монохроматора входят два гониометра, одна линейная подвижка и актуатор подстройки аксиального угла первого зеркала. Все четыре привода оснащены шаговыми двигателями и управляются дистанционно без нарушения вакуума. Монохроматор совместим с рабочим вакуумом станции 10^{-4} Па. Поверхности зеркал расположены параллельно друг другу. После прохождения монохроматора пучок СИ сохраняет своё направление, но смещается по вертикали вниз на $h = 12$ мм. Сканирование по энергии происходит за счёт изменения угла между пучком СИ и поверхностями зеркал θ_1 и θ_2 . При этом продольное положение центра второго зеркала относительно первого изменяется, сохраняя положение пучка в центре второго зеркала. Апертура канала между объёмом монохроматора и экспериментальным объёмом достаточна для того, чтобы обеспечить прохождение как прямого, так и монохроматизированного пучка без дополнительных настроек положения экспериментального объёма.

Каждое из зеркал монохроматора установлено на оси вращения отдельного гониометра. Кроме этого, гониометр второго зеркала установлен на линейной подвижке. Ход

подвижки (50 мм) позволяет обеспечить перестройку рабочего угла монохроматора в пределах $13\text{--}77^\circ$ без нарушения вакуума. Для увеличения диапазона углов, доступных монохроматору, предусмотрена возможность установки второго гониометра со сдвигом по горизонтали относительно первого в положительном или отрицательном направлении. При этом диапазон доступных монохроматору рабочих углов сдвигается в сторону меньших или больших значений соответственно. Выбор одного из 13 положений гониометра осуществляется вручную после напуска атмосферного воздуха в рабочий объём монохроматора. Таким образом, охват минимально и максимально доступных углов монохроматора расширяется до величин 4 и 86° соответственно.

Для работы с белым пучком СИ зеркала монохроматора переводятся в нулевое положение. Возможна установка на пути белого пучка различных фильтров. Так, при работе с полупроводниковыми детекторами ФДУК-100УФ или ПЗС на пути пучка устанавливается медный фильтр толщиной 30 мкм или фильтр из нержавеющей фольги толщиной 100 мкм в целях предотвращения их радиационного повреждения. Менее чувствительные к ионизирующему излучению детекторы, такие как болометры [9, 10], калориметры или алмазные детекторы, могут быть установлены на белый пучок СИ без привлечения фильтров. Работа на белом пучке СИ с использованием набора калиброванных фильтров позволяет рассматривать накопитель ВЭПП-4 для метрологических целей в качестве эталонного источника [11].

Описанная кинематическая схема монохроматора оказалась вполне удачной при работе с многослойными зеркалами и дифракционными решётками, однако породила определённые сложности при работе с кристаллами. Сложности возникли в связи с точностью установки заданного угла гониометрами, которой оказалось недостаточно для попадания в максимум кривой качания кристаллов кремния, что устраняется путём добавления в алгоритм сканирования автоматической подстройки угла второго кристалла на максимум показаний детектора. Кроме того, непараллельность поверхности кристалла кремния его кристаллографической плоскости (111) приводит к возникновению ошибки в определении абсолютного значения энергии. Для калибровки зависимости угла поворота кристаллов от энергии монохроматора были проведены измерения пропускания нескольких фильтров вблизи краёв поглощения материалов, входящих в состав этих фильтров.

Механизм монохроматора изготовлен таким образом, что имеется техническая возможность располагать его в большом экспериментальном объёме. Это несколько ухудшает фоновые условия, однако позволяет реализовать гибридные схемы, при которых на первый и второй гониометры устанавливаются разные оптические элементы (например, многослойное зеркало плюс решётка или кристалл плюс многослойное зеркало). В таком случае параллельность входного и выходного пучков нарушается и возникает необходимость перемещения детектора.

Комплект многослойных зеркал для монохроматора разработан и изготовлен в Институте физики микроструктур РАН. В него входят девять пар зеркал, и параметры каждой пары оптимизированы для работы на небольшом участке спектрального диапазона так, чтобы можно было достичь максимально возможных коэффициентов отражения и спектрального разрешения в заявленном спектральном диапазоне 80–3000 эВ. Новые зеркала по сравнению с предыдущей версией монохроматора расширили его рабочий спектральный диапазон, повысили коэффициенты отражения и спектральную селективность прибора. Максимальный коэффициент отражения для s-поляризованного излучения на уровне 72 % достигнут в окрестности энергий фотонов 110 эВ. По мере продвижения в коротковолновую область коэффициенты отражения снижаются, но остаются в пределах 10–40 %. Исключение составляет сравнительно небольшой участок спектра (300–400 эВ), где коэффициент отражения опускается ниже 10 %. Спектральная селективность одиночного зеркала в зависимости от участка рабочего спектра изменяется в пределах $\Delta E/E \approx 0,6\text{--}4\%$.

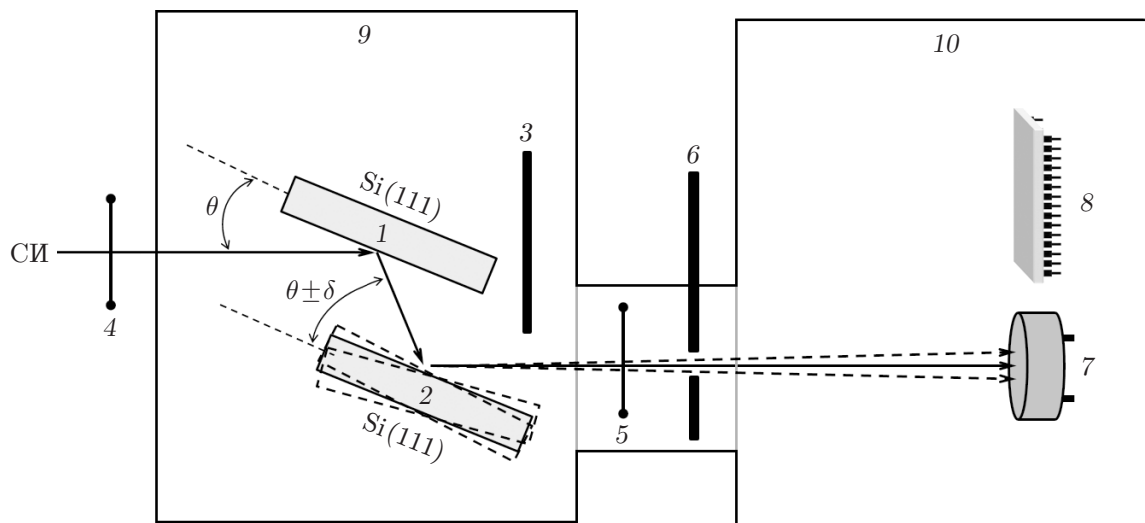


Рис. 2. Оптическая схема измерения кривой качания монохроматора (1, 2 — первый и второй спектральные элементы; 3 — экран прямого пучка; 4, 5 — тонкоплёночные фильтры; 6 — коллиматор монохроматического пучка; 7, 8 — детекторы; 9, 10 — вакуумные и экспериментальный объёмы монохроматора)

Одновременное использование в составе монохроматора двух многослойных зеркал приводит к улучшению разрешения приблизительно в $\sqrt{2}$ раз. Соответственно в составе двухзеркального монохроматора максимальная спектральная селективность зеркал в диапазоне энергий фотонов 277–395 эВ достигает $\Delta E/E \approx 0,47\%$. Такое относительно высокое энергетическое разрешение существенно расширяет экспериментальные возможности станции при спектроскопических исследованиях органических материалов.

Измерение кривой качания кристаллов кремния на пучке СИ. В целях исследования качества монохроматического пучка, выделяемого монохроматором из белого пучка СИ, был проведён ряд экспериментов. Один из экспериментов состоял в измерении кривой качания монохроматора с применением кристаллов и многослойных зеркал. Оптическая схема измерений приведена на рис. 2. Измерения проводились с использованием двух кристаллов Si (111). В ходе сканирования первый кристалл оставался неподвижным, а положение второго менялось в интервале $\delta = \pm 0,1^\circ$ от максимума сигнала с шагом $0,001^\circ$. В таком диапазоне сканирования пучок после монохроматора остаётся в пределах входной апертуры экспериментального объёма. При измерениях кривой качания в качестве детектора использовался кремниевый фотодиод. Ширина кривой качания позволяет оценить спектральное разрешение монохроматора, а сигнал детектора за пределами этой кривой (пьедал под кривой качания) — вклад в сигнал фоновой засветки. Измерения осуществлялись для углов $\theta = 24, 36$ и $57,5^\circ$ (энергии фотонов 4861, 3364, 2344 эВ соответственно). Результаты приведены на рис. 3 и в таблице. Форма экспериментального распределения хорошо описывается псевдофункцией Фойгта [12]. Её ширина на полувысоте определяет спектральное разрешение монохроматора. Несложное численное моделирование показывает, что полученная кривая качания приблизительно в 2 раза шире, чем ширина спектрального распределения излучения при последовательном отражении от двух кристаллов. Таким образом, в соответствии с проведёнными измерениями спектральное разрешение системы остаётся постоянным в пределах исследованного спектрального диапазона и составляет $\Delta E/E \approx 10^{-4}$, вклад фоновой засветки в сигнал монохроматора — не более 1 %.

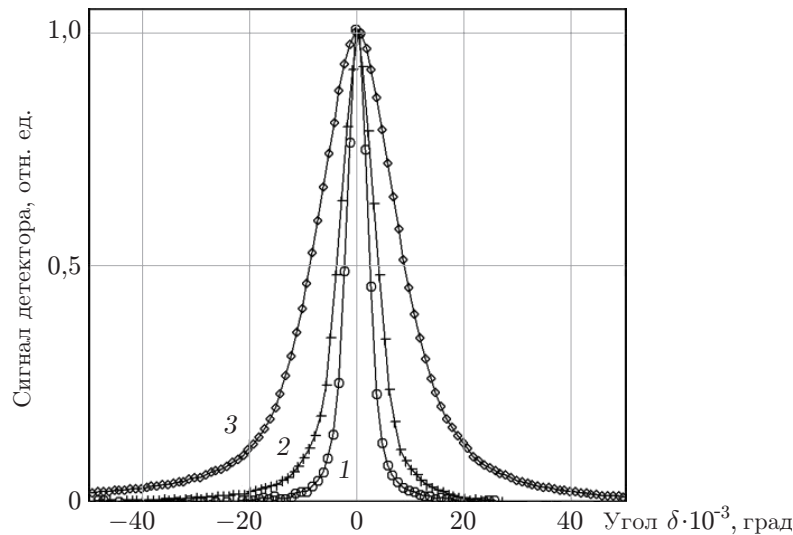


Рис. 3. Результат измерения кривых качания монохроматора с кристаллами Si (111) на энергиях 4801 эВ (кривая 1), 3338 эВ (кривая 2), 2336 эВ (кривая 3)

| Угол θ° | Ширина кривой качания на полувысоте | | Энергия фотонов, кэВ | Относительная ширина кривой качания |
|---------------------|-------------------------------------|-------------|----------------------|-------------------------------------|
| | Угол $\Delta\delta^\circ$ | Энергия, эВ | | |
| 24 | $4,7 \cdot 10^{-3}$ | 0,926 | 4,801 | $1,91 \cdot 10^{-4}$ |
| 36 | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | 0,647 | 3,338 | $1,92 \cdot 10^{-4}$ |
| 57,5 | $18,1 \cdot 10^{-3}$ | 0,459 | 2,336 | $1,96 \cdot 10^{-4}$ |

Измерения спектрального пропускания фильтров. В связи с тем что между плоскостью поверхности кристалла кремния и его основной кристаллической плоскостью (111) имеется некоторый ненулевой угол, были проведены измерения спектрального поглощения тонких плёнок ниобия и титана, позволившие определить величину этого угла. Сканирование выполнялось в пределах 2° с шагом $0,05^\circ$. В ходе сканирования в каждой точке спектра производилась подстройка угла второго кристалла на максимум сигнала детектора. Результаты измерения спектра пропускания ниобиевого фильтра приведены на рис. 4. Значение угла θ , на котором наблюдается L3-край поглощения ниобия (табличное значение 2371 эВ [13]), даёт возможность определить угол между поверхностью кристалла и плоскостью (111) используемых кристаллов кремния. Этот угол составил $0,32^\circ$. Положение края поглощения определялось как точка максимального значения производной измеренного сигнала, которая на графике отмечена символом «o». Наблюдается характерная тонкая структура рентгеновского спектра поглощения XAFS (X-ray absorption fine structure) — спектр вблизи L3-края поглощения ниобия. В правой части графика для сравнения приведена кривая качания. Сравнение ширины кривой качания и характерной структуры XAFS-спектра позволяет утверждать, что аппаратная функция монохроматора не оказывает существенного влияния на измеряемый спектр.

Анализ нижнего графика $\delta\theta(\theta)$ даёт возможность оценить погрешность установки угла, которую обеспечивают гониометры. Эта погрешность на протяжении всего спектра составляет $\pm 0,005^\circ$, что соответствует средней погрешности установки энергии $\pm 0,26$ эВ. Также были проведены предварительные исследования, позволяющие оценить вклад кратных порядков в экспериментальный сигнал. Измерения осуществлялись с использованием 30 мкм медного фильтра, который в соответствии с табличными данными [14] прибли-

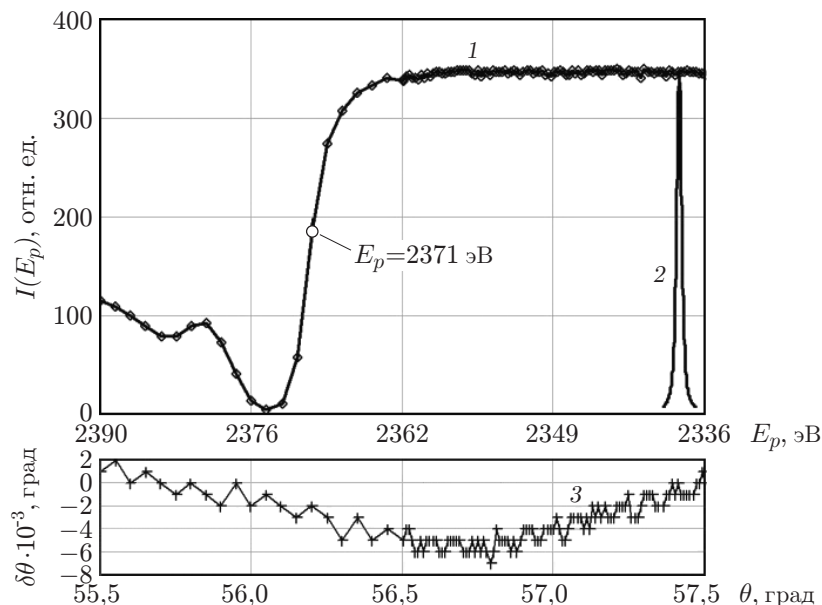


Рис. 4. Измерение коэффициента пропускания тонкоплёночного (0,3 мкм) ниобиевого фильтра (график 1 — зависимость сигнала детектора от угла θ и энергии фотонов; символ « \circ » — положение L3-края поглощения ниобия; график 2 — кривая качания монохроматора (приведена для сравнения); график 3 — величина угла подстройки второго кристалла $\delta\theta$ при автоматической настройке монохроматора на максимум сигнала)

зительно на 2 порядка подавлял сигнал первой гармоники монохроматора в диапазоне энергий 4300–4600 эВ, пропуская при этом более 35 % на энергиях фотонов вблизи К-края поглощения меди (8979 эВ). Сразу после этого края расчётное поглощение медного фильтра возрастает на 3 порядка. Поскольку результаты сканирования в вышеуказанном диапазоне не показали резких скачков в сигнале детектора, был сделан вывод, что вклад 2-го порядка не превышает 1 % от основного сигнала.

Измерение кривой качания многослойных зеркал. Поскольку спектральная избирательность многослойных зеркал значительно ниже спектральной избирательности кристаллов, повторение оптической схемы, приведённой на рис. 2, не представляется возможным по причине ограниченности апертуры канала между объёмом монохроматора и экспериментальным объёмом. Для проведения этих измерений механизм монохроматора был установлен в экспериментальном объёме и были предприняты дополнительные меры по подавлению фоновой засветки детектора вследствие рассеяния белого пучка СИ на элементах монохроматора. На рис. 5 показана кривая качания вольфрам-кремниевое (W/Si) многослойного зеркала, угол $\theta = 2,9^\circ$ (5178 эВ), ширина кривой на полувысоте составляет $0,146^\circ$ (170 эВ), что соответствует относительному спектральному разрешению $\Delta E/E = 3,3\%$. Это на порядок хуже измеренного спектрального разрешения кристаллов (абсолютное спектральное разрешение 170 эВ). Измерения на многослойных зеркалах, как и в случае с кристаллами кремния, показали чистоту монохроматического излучения, совпадающую с расчётными значениями: за пределами пика содержится не более 2 % от всей зарегистрированной мощности излучения. Для расчёта коэффициентов отражения многослойных зеркал использовались находящиеся в свободном доступе электронные базы данных Центра рентгеновской оптики при Ливерморской национальной лаборатории США CXRO (Center for X-Ray Optics) [15]. Измерения производились на паре многослойных зер-

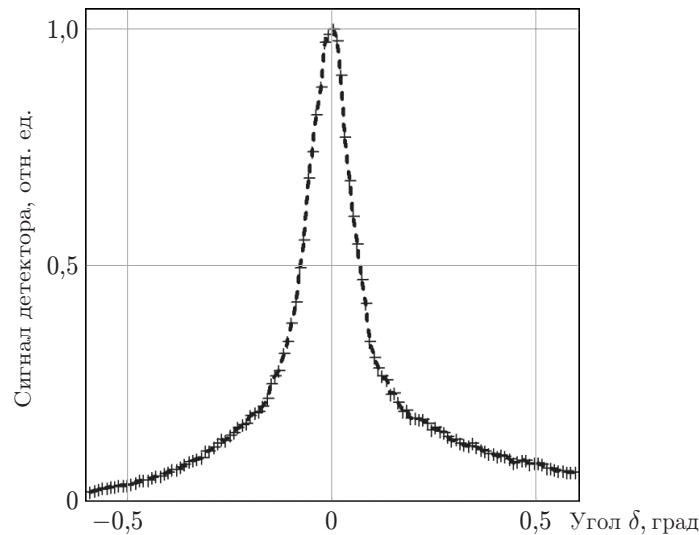


Рис. 5. Кривая качания W/Si многослойного зеркала

кал, входивших в состав предыдущей версии монохроматора. Тестирование спектральных свойств комплекта новых зеркал предполагается провести в 2019 году.

Обсуждение результатов. Таким образом, модернизированный монохроматор позволяет выделить из белого пучка СИ монохроматическое излучение с контролируемыми основными метрологическими параметрами: абсолютным значением выделяемой энергии и спектральной шириной выделяемой линии. Кроме того, методика тестирования монохроматора позволяет контролируемым образом подавить вклад кратных порядков и мягкой specularной компоненты излучения до значений менее 1 %. Перечисленные свойства дают возможность использовать монохроматор для решения широкого круга метрологических задач в мягком рентгеновском диапазоне (2000–6000 эВ). Спектрального разрешения монохроматора ($\Delta E/E = 10^{-2}$ %) достаточно для измерения EXAFS- и XANES-спектров в мягкой рентгеновской области. В указанный спектральный диапазон попадают К-края элементов с зарядовыми числами от 15 до 24, куда входят такие биологически важные элементы, как фосфор, сера, хлор, калий, кальций и углерод. В этот диапазон также попадают и L-края элементов с числами от 39 до 59 (от иттрия до празеодима). Эти возможности представляют интерес для широкого круга пользователей. Обратной стороной гибкости настройки монохроматора является необходимость подстройки угла второго кристалла, что существенно увеличивает время набора спектров.

Заключение. В данной работе создан широкополосный монохроматор, используемый на станции «Космос», для метрологических измерений. Конструкция монохроматора достаточно универсальна и позволяет устанавливать на него различные спектральные элементы: дифракционные решетки, многослойные зеркала или кристаллы, что даёт возможность покрывать широкий спектральный диапазон от 4 эВ до 6 кэВ. Проведено тестирование монохроматора в поддиапазоне энергий 2000–6000 эВ с использованием кристаллов Si (111). Получено спектральное разрешение на уровне $\Delta E/E = 10^{-4}$. Разработана и реализована методика проверки спектральной чистоты полученного монохроматического излучения. Показано, что помимо решения метрологических задач монохроматор может использоваться для спектроскопических измерений в указанном поддиапазоне.

Благодарности. Работа выполнена с использованием инфраструктуры Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ) на базе накопительного комплекса ВЭПП-3 — ВЭПП-4М (г. Новосибирск, Россия), поддержанного Министерством высшего образования и науки РФ (проект RFMEFI62117X0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Николенко А. Д., Авакян С. В., Афанасьев И. М. и др.** Станция «Космос» // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. № 5. С. 13–19.
2. **Piminov P. A.** Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // Phys. Procedia. 2016. **84**. P. 19–26. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.11.005.
3. **Гаврилов Н. Г., Легкодымов А. Г., Николенко А. Д. и др.** Двухзеркальный монохроматор ультрамягкого рентгеновского диапазона станции метрологии ВЭПП-2М с использованием многослойных зеркал // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2000. № 1. С. 129–131.
4. **Schafers F., Bischoff P., Eggenstein F. et al.** The at-wavelength metrology facility for UV- and XUV-reflection and diffraction optics at BESSY-II // Journ. Synch. Rad. 2016. **23**. P. 67–77.
5. **Floreno L., Naletto G., Cvetko D. et al.** Performance of the grating-crystal monochromator of the ALOISA beamline at the Elettra Synchrotron // Rev. Sci. Instrum. 1999. **70**, N 10. P. 3855–3865.
6. **Chu Y. S., Liu C., Mancini D. C. et al.** Performance of a double-multilayer monochromator at Beamline 2-BM at the Advanced Photon Source // Rev. Sci. Instrum. 2002. **73**, N 3. P. 1485–1487.
7. **Zabrodsky V. V., Aruev P. N., Sukhanov V. L. et al.** Silicon precision detectors for near IR, visible, UV, XUV and soft X-ray spectral range // Proc. of the 9th Intern. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII 2009). Saint-Petersburg, Russia, 29 June–2 July, 2009. Vol. 3. P. 243–247.
8. **CCD47-20** Back Illuminated. Instrumentation Projects. A1A-100041. Is. 6. 2006. 13 p. URL: <http://instrumentation.obs.carnegiescience.edu/ccd/parts/CCD47-20BI.pdf> (дата обращения: 12.11.2018).
9. **Khrebtov I. A., Malyarov V. G., Zerov V. Yu. et al.** Tests of model of absolute measuring instrument of synchrotron radiation power // Key Eng. Mater. 2010. **437**. P. 636–640.
10. **Houston J. M., Rice J. P.** NIST reference cryogenic radiometer designed for versatile performance // Metrologia. 2006. **43**. P. S31–S35.
11. **Subbotin A. N., Gaganov V. V., Kalutsky A. V. et al.** Absolute calibration of X-ray semiconductor detectors against synchrotron radiation of the VEPP-3 storage ring // Metrologia. 2000. **37**. P. 497–500.
12. **Dasgupta P.** On use of pseudo-Voigt profiles in diffractions line broadening analyses // Fisika A (Croatia). 2000. **9**, N 2. P. 61–66.
13. **Thomson A., Attwood D., Gullikson E. et al.** X-Ray Data Booklet. Center for X-ray Optics and Advanced Light. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009. CA 94720. 176 p. URL: <http://xdb.lbl.gov/xdb-new.pdf> (дата обращения: 12.11.2018).
14. **X-Ray Interactions with Matter.** The Center for X-ray Optics. X-Ray Database /Ed. E. Gullikson. Berkeley, 2010. URL: http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/intro.html (дата обращения: 12.11.2018).
15. **Multilayer Reflectivity.** X-Ray Interactions with Matter. The Center for X-ray Optics. X-Ray Database /Ed. E. Gullikson. Berkeley, 2010. URL: http://henke.lbl.gov/optical_constants/multi2.html (дата обращения: 12.11.2018).

Поступила в редакцию 12.11.2018

После доработки 12.12.2018

Принята к публикации 17.12.2018