

Двухзеркальный монохроматор для синхротрона „СКИФ“ поколения 4+

© Е.И. Глушков,¹ А.А. Ахсаханян,¹ П.А. Вепрев,¹ И.Г. Забродин,¹ М.В. Зорина,¹ И.В. Малышев,¹ М.С. Михайленко,¹ А.Е. Пестов,¹ Е.В. Петраков,¹ Р.С. Плешков,¹ Е.С. Антюшин,¹ В.Н. Полковников,¹ Д.Г. Реунов,¹ А.Б. Уласевич,¹ А.К. Чернышев,¹ Н.И. Чхало,¹ Р.А. Шапошников,¹ Я.В. Ракшун,^{2,3} Ю.В. Хомяков,^{2,4} В.А. Чернов,² И.П. Долбня⁵

¹Институт физики микроструктур РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

⁴Центр коллективного пользования „Сибирский кольцевой источник фотонов“,
630559 Кольцово, Новосибирск, Россия

⁵Даймонд, OX11 ODE,
Дидкот, Великобритания
e-mail: eglushkov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 6 июня 2025 г.

В окончательной редакции 6 июня 2025 г.

Принято к публикации 6 июня 2025 г.

Для источника синхротронного излучения поколения 4+ „СКИФ“ в ИФМ РАН разработан двухзеркальный монохроматор на рабочий диапазон энергий фотонов 10–30 keV. Монохроматизация синхротронного излучения осуществлялась многослойными рентгеновскими зеркалами. Рабочий диапазон прибора разделен на три поддиапазона: 10–19 keV, 19–30 keV и 19–30 keV с высоким спектральным разрешением. Для осуществления такой моды работы монохроматора на подложки нанесены три полосы (стрипа) многослойных рентгеновских зеркал Mo/W₄C, W/W₄C и Cr/Ve, высотой 6 nm каждый. В зависимости от энергии фотонов и поддиапазона, разрешение варьируется в диапазоне 0.35%–1.5%. Коэффициенты отражения зеркал превышают 60%. Перестройка по поддиапазонам осуществляется вертикальным перемещением зеркал. Описаны принцип работы и конструкция прибора, методы, использованные при изготовлении высокоточных подложек, и основные характеристики прибора и его составляющих.

Ключевые слова: рентгеновская оптика, синхротронное излучение, двухзеркальный монохроматор, многослойные рентгеновские зеркала.

DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61350.125-25

Введение

На разрабатываемом в СО РАН источнике синхротронного излучения (СИ) поколения 4+ „СКИФ“ на Станции 1–1 „Микрофокус“ планируется реализация методов конфокальной флуоресцентной микроскопии, спектромикроскопии μ -XANES, монокристалльной микродифракции, просвечивающей сканирующей микроскопии и птихографии [1–3]. Спецификой синхротронов четвертого поколения является большая средняя мощность в пучке, приводящая к термоиндуцированным деформациям поверхности зеркал и кристаллической решетки кристалл-монохроматоров. Следствием этого является потеря разрешающей способности — как пространственной, так и спектральной. Для решения этой проблемы по аналогии с работами [4–7] было предложено использовать двухзеркальный монохроматор (ДЗМ) на основе многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ). Он может выполнять две основные функции. В экспери-

ментах с высоким спектральным разрешением он осуществляет предварительную монохроматизацию пучка, $\Delta E/E \sim 1\%$, тем самым на порядки величин снижая поглощенную в кристалле мощность. В задачах микроскопии и микроанализа элементов за счет меньшей на 2–3 порядка, по сравнению с кристаллами, монохроматизации, обеспечивает соответствующее увеличение интенсивности пробного пучка.

При создании реализации этого прибора потребовалось решить ряд сложных научных, технических и технологических проблем. В частности, для сохранения дифракционного качества отраженных волновых фронтов (что требуется для экспериментов по птихографии и микроанализа с нанометровым разрешением) зеркала должны обеспечивать угловые ошибки отраженных фронтов на уровне $1 \mu\text{rad}$ и менее, что соответствует точности формы поверхности на уровне 1 nm. Эта проблема усложняется большой, на уровне 150 W, поглощенной в зеркале мощностью пучка СИ, т.е. должны

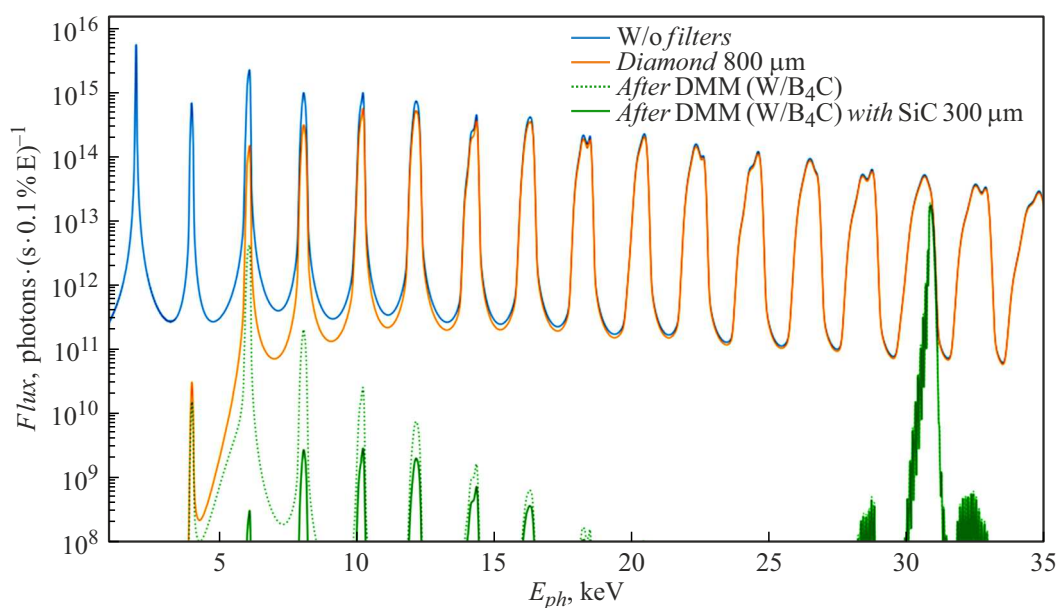


Рис. 1. Спектр ондуляторного излучения после фронтенда, фильтров и двухзеркального многослойного монохроматора. Рисунок заимствован из [2].

были бы решены проблемы изготовления и метрологии поверхности высокоточных рентгеновских зеркал, и разработана конструкция зеркала, компенсирующая термо-индуцированные деформации поверхности.

Из-за большого рабочего диапазона энергий, 10–30 keV, и ограниченных рабочих углов зеркал $0.5\text{--}0.95^\circ$ (о причинах этого ограничения будет сказано ниже), этот диапазон можно было перекрыть с использованием не менее двух МРЗ. Типичное спектральное разрешение высокоотражающих МРЗ находится на уровне 1%, однако в ряде планируемых на станции задач оптимальным является разрешение на уровне 0.3%–0.4%. Поэтому при построении монохроматора необходимо было найти решения, позволяющие интегрировать три пары многослойных зеркал наименее затратным способом и без вскрытия прибора „на атмосферу“. Кроме того, для обеспечения столь высокого спектрального разрешения при сохранении высоких коэффициентов отражения необходимо было найти подходящие материалы и разработать технологический процесс роста.

В настоящей работе подробно описываются принцип работы и конструкция прибора, методы, использованные при изготовлении высокоточных подложек и нанесения на них отражающих покрытий, расчет водяного охлаждения зеркал, приводятся основные характеристики прибора и его составляющих.

1. Характеристики источника

На станции „Микрофокус“ излучение будет генерироваться с помощью разработанного в ИЯФ СО РАН сверхпроводящего ондулятора с периодом $\lambda_u = 15.6\text{ nm}$,

магнитной длиной $L \approx 2\text{ m}$ и максимальным магнитным полем на оси $B = 1.25\text{ T}$ [2]. Энергия фундаментальной гармоники ондуляторного излучения при максимальном поле составляет 2.06 keV, край рабочего диапазона соответствуют пятой (10.3 keV) и пятнадцатая (30.9 keV) гармоники. Ожидаемые параметры: rms размеры источника $32.9 \times 5.9\text{ }\mu\text{m}$, rms расходимость излучения на энергиях резонанса пятой и пятнадцатой гармоник — $9.4 \times 11\text{ }\mu\text{rad}$ и $5 \times 10\text{ }\mu\text{rad}$ соответственно. Масками во фронтенде станции будет задаваться угловая апертура $75 \times 75\text{ }\mu\text{rad}$. Спектр излучения, испускаемого в такой телесный угол, приведен на рис. 1. Полная мощность генерируемого ондулятором излучения (т.е. интеграл по всем направлениям) составляет 7.1 kW, из которых на заданную апертуру приходится 0.3 kW. С учетом алмазных фильтров суммарной толщины $800\text{ }\mu\text{m}$ после фронтенда мощность излучения составляет 0.15 kW.

2. Рентгенооптическая схема, состав двухзеркального монохроматора и назначение его элементов

Рентгенооптическая схема монохроматора, вид сверху, приведена на рис. 2. Основными элементами монохроматора являются: входная диафрагма (Д), задающая размер падающего на зеркало пучка и ограничивающая распространение внеосевого СИ далее в оптический тракт, тем самым снижая фоны и тепловую нагрузку на элементы, а именно — первичное МРЗ М1 и вторичное МРЗ М2. Принцип работы заключается в следующем. Полихроматический пучок СИ падает под углом θ на первое зеркало. В соответствии с брэгговским условием

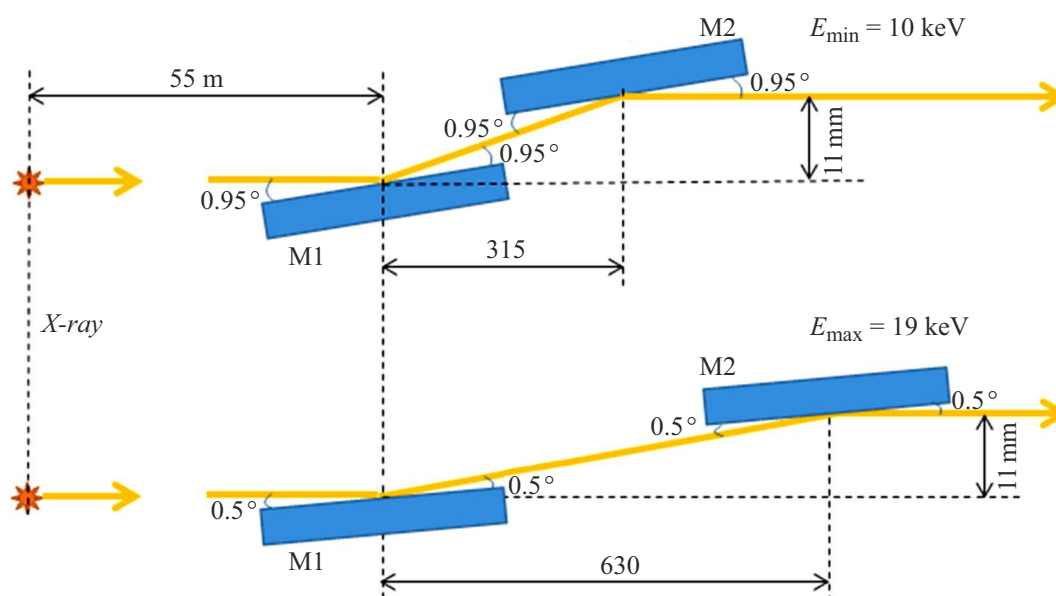


Рис. 2. Рентгенооптическая схема монохроматора, вид сверху. На рисунке: входная диафрагма; M1 и M2 — первичное и вторичное идентичные МРЗ. Данные по энергиям приведены для первого „мягкого“ поддиапазона.

от зеркала отразится длина волны λ :

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где d — период МРЗ. Отраженное от M1 излучение падает на идентичное МРЗ M2 и отражается со сдвигом 11 mm (офсет) в том же направлении, что и первичный пучок. В процессе сканирования по длине волны угол падения на оба зеркала синхронно меняется, при этом зеркало M1 остается неподвижным, а второе зеркало перемещается параллельно падающему пучку таким образом, чтобы отраженный пучок попадал в его центр. Минимальному расстоянию между центрами зеркал 315 mm соответствует максимальный угол падения (отсчитывается от поверхности) 0.95° , и он же определяет минимальную энергию отраженных фотонов. Максимальное расстояние между центрами зеркал составляет 630 mm.

Офсет 11 mm, смещающий ось монохроматического пучка по отношению к падающему, позволяет отделить жесткие гамма-кванты, распространяющиеся по оси падающего пучка СИ, и поглотить их в ловушке тормозного излучения.

На рис. 3 приведены фотографии двухзеркального монохроматора и его оптико-механической части, помещенной внутри вакуумной камеры. Справа вверху приведена система координат. Основными элементами монохроматора являются: сверхвысоковакуумная камера 1, оптико-механический модуль (рис. 3, б), включающий в себя два блока многослойных охлаждаемых зеркал 2 и набор подвижек: две вертикальные 3.1, наклонную 3.2, две вращательные 3.3, две линейные поперек направления распространения пучка 3.4, линейную вдоль распространения пучка 3.5; турбомолекулярный насос для

предварительной откачки 4.1; магниторазрядные насосы, 2 шт. 4.2; модуль виброзащиты, образованный блоком из габбро-диабазы 5.1 и пружинами 5.2; силовая рама со снятыми крышками 6 и 6D-механическое основание на виброопорах 7.

2.1. Сверхвысоковакуумная камера

Сверхвысоковакуумная камера обеспечивает высокий, лучше $5 \cdot 10^{-8}$ Torr, вакуум в монохроматоре. Наличие высокого вакуума исключает поглощение рентгеновского излучения в процессе его транспортировки от источника до исследуемого образца и минимизирует загрязнение многослойных зеркал продуктами разложения гидрокарбонов под воздействием ионизирующего излучения. Камера оснащена набором фланцев типа CF-16, CF-40, CF-63, CF-100 и CF-150 для присоединения к каналу СИ и выводу монохроматического пучка; установки вакуумных насосов и измерителя вакуума; окон для ультрафиолетовой очистки зеркал; присоединения высокоточного клапана напуска воздуха и подачи реактивного газа для очистки зеркал; присоединения вводов воды и электричества. На дне камеры установлены три сильфонных ввода, на которые устанавливается оптико-механический модуль; тем самым обеспечивается отвязка оптики от вакуумной камеры и ее прямая установка на габбро-диабазовый блок.

2.2. Оптико-механический модуль

Оптико-механический модуль предназначен для точной настройки и монохроматизации падающего на прибор пучка СИ. Основными элементами оптико-механического модуля являются: многослойные зеркала

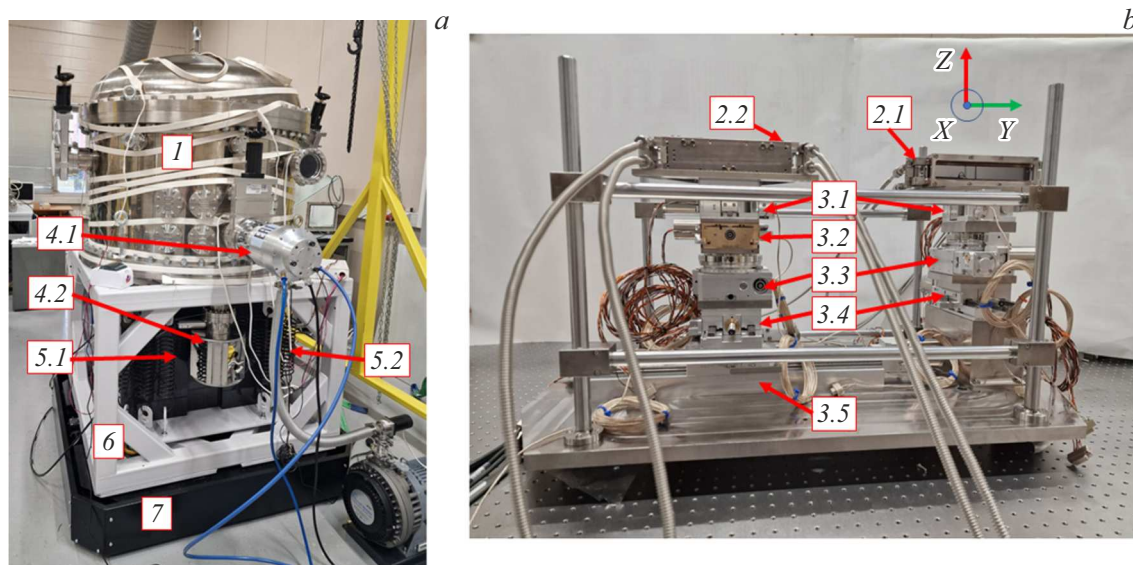


Рис. 3. Фото двухзеркального монохроматора (а) и его оптико-механической части, помещенной внутри вакуумной камеры (b). 1 — сверхвысоковакуумная камера; 2.1 — зеркало M1, 2.2 — зеркало M2; 3.1 — Z-подвижки; 3.2 — θY -подвижка; 3.3 — θZ -подвижки; 3.4 — X-подвижки; 3.5 — Y-подвижки; 4.1 — турбомолекулярный насос; 4.2 — магниторазрядные насосы; 5.1 — блок из габбро-диабаза; 5.2 — пружинный подвес; 6 — рама; 7 — 6D-основание.

M1 2.1, рис. 3, b и M2 2.2, установленные в бездеформационные оправы и оснащенные системой водяного охлаждения, и система механических подвижек для M1 2.3–2.5 и M2 2.6–2.10. Точная настройка обоих МРЗ на пучок СИ в горизонтальном (ось X) и вертикальном (ось Z) направлениях осуществляется с помощью линейных трансляторов Linear Stage 5101.20 и Z-Stage 5103.A10 соответственно. Вертикальные трансляторы 3.1 также осуществляют переход с одного стрипа МРЗ на другой. Угол падения излучения на зеркала устанавливается с помощью вращательных платформ Goniometer 409, осуществляющих поворот вокруг оси Z. Для обеспечения взаимной параллельности зеркал M1 и M2 при начальной юстировки и в процессе сканирования по длинам волн, второе зеркало оснащено наклонной платформой, 1-Circle Segment 5202.60, обеспечивающей наклон вокруг оси Y. Также зеркало M2 с описанными уже механическими подвижками устанавливается на линейной подвижке, Linear Stage 5101.30, обеспечивающей попадание в центр M2 отраженного от M1 монохроматического пучка в процессе сканирования по длинам волн. Точность позиционирования подвижек обеспечивается энкодерами. Система будет откалибрована на синхротроне. В качестве обратной связи будет использоваться положение и интенсивность пучка при отражении от зеркал монохроматора.

2.3. Модуль виброзащиты

Модуль виброзащиты предназначен для подавления вибраций и образован блоком из габбро-диабаза, эффективно подавляющего низкочастотные вибрации, и набора

пружин для подавления высокочастотных вибраций. Для предотвращения поперечной раскачки блока из габбро-диабаза под ним установлены резиновые амортизаторы, нагрузка на которые регулируется натяжением пружин. Тем самым обеспечиваются оптимальные условия для подавления вибраций в каждом конкретном случае.

2.4. 6D-механическое основание

6D-механическое основание на виброопорах предназначено для грубой настройки ДЗМ на синхротронный пучок, которое обеспечивает три линейных перемещения и три вращательных. Выставка по высоте и двум угловым координатам осуществляется за счет регулировки виброопор ОВ-31М. Поперечные перемещения и вращение вокруг вертикальной оси осуществляется за счет кареток на рельсах.

2.5. Откачка монохроматора

Откачка монохроматора осуществляется двумя магниторазрядными насосами марки НМД-К-0,3-CF150 со скоростью откачки 230 л/с каждый.

3. Основные характеристики элементов двухзеркального монохроматора

Монохроматизация рентгеновского излучения осуществляется с помощью пары многослойных зеркал, на каждом из которых нанесено три идентичных стрипа.

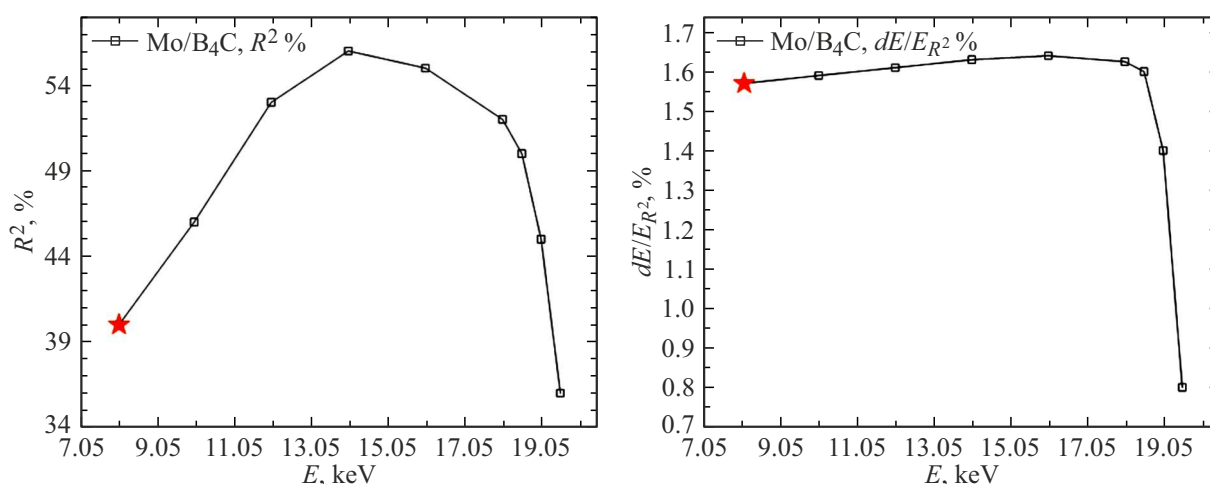


Рис. 4. Измеренные (звездочки) и расчетные (линии с символами) спектральные зависимости коэффициента отражения R и спектральной селективности $\Delta E/E$ после двукратного отражения. Поддиапазон № 1, Mo/B₄C МРЗ с параметрами: число периодов $N = 150$, период $d = 36.15$ Å, доля молибдена в периоде $\beta = 0.4$, шероховатость пленок Mo $\sigma_{\text{Mo}} = 2$ Å и B₄C $\sigma_{\text{B}_4\text{C}} = 3$ Å.

Напыление МРЗ производилось с использованием магнетронного распыления в атмосфере аргона. Подробнее об установках, методиках напыления и первичной характеристики МРЗ можно узнать из [8].

Первый стрип работает в диапазоне 10–19 keV. В качестве МРЗ была выбрана пара материалов Mo/B₄C, часто используемая для этого диапазона из-за отсутствия в нем краев поглощения молибдена [9,10]. Основные параметры синтезированных МРЗ Mo/B₄C: число периодов $N = 150$, период $d = 36.15$ Å, доля молибдена в периоде $\beta = 0.4$, шероховатость пленок Mo $\sigma_{\text{Mo}} = 2$ Å и B₄C $\sigma_{\text{B}_4\text{C}} = 3$ Å, диапазон скользящих углов падения $\theta = 0.5 - 0.95^\circ$. На рис. 4 приведены измеренные (звездочки) и расчетные (линии с символами) спектральные зависимости коэффициента отражения R и спектральной селективности $\Delta E/E$ после двух отражений. Расчетная кривая получена с использованием структурных параметров МРЗ, восстановленных по угловой зависимости $R(\theta)$ на длине волны 1.54 Å по методике, описанной в [11]. Подробнее о свойствах Mo/B₄C МРЗ, изготавливаемых в ИФМ РАН, в том числе и с ультракороткими периодами, можно ознакомиться в [12].

В поддиапазоне 19–31 keV традиционно используются МРЗ W/B₄C [13,14]. В нашем случае были нанесены МРЗ с параметрами: $N = 300$, $d = 21$ Å, $\beta = 0.38$, $\sigma_{\text{W}} = 2.5$ Å, $\sigma_{\text{B}_4\text{C}} = 4.9$ Å, $\theta = 0.55 - 0.9^\circ$ и Cr/Be $N = 300$, $d = 20$ Å, $\beta = 0.5$, $\sigma_{\text{Cr}} = 4.3$ Å, $\sigma_{\text{Be}} = 4.3$ Å, $\theta = 0.55 - 0.95^\circ$. На рис. 5 и 6 приведены соответствующие кривые. Использование второго стрипа с Cr/Be МРЗ в данном диапазоне обусловлено его высоким спектральным разрешением, что востребовано при решении ряда задач, в том числе по малоугловому рассеянию. Возможность изготовления высокоотражающих Cr/Be МРЗ с ультракороткими периодами была продемонстрирована в [17].

Отметим, что многослойные зеркала подвергаются значительной радиационной нагрузке. Благодаря охлаждению рабочая температура зеркал не превышает 30 °С. Тем не менее в работе [12] показано, что коэффициент отражения Mo/B₄C-покрытия не деградирует до температуры 300 °С. Покрытие W/B₄C выдерживает нагрев до 500 °С [16]. Радиационная стойкость Cr/Be не исследовалась. Для очистки поверхности зеркал от продуктов разложения гидрокарбонатов на станции планируется интеграция в ДЗМ УФ ламп, которые будут освещать поверхность зеркал через смотровые окна.

Как отмечалось ранее, угловые ошибки зеркал должны быть не более 1 μrad. Это условие потребовало, во-первых, развития методов изготовления высокоточных подложек, во-вторых, проведения анализа наведенных в подложке термоиндуцированных искажений отражающей поверхности, вызванных поглощенной > 100 W мощностью СИ. Учитывая мировой опыт, в качестве материала подложки взят монокристаллический кремний [17–19]. В качестве заготовок использовались цилиндрические детали диаметром 220 mm и толщиной 25 mm. Изготовление производилось в несколько этапов. На первом этапе методом механического притира осуществлялась глубокая шлифовка-полировка. Целью этого этапа было придание поверхности плоскостности на уровне 10 nm. На следующем этапе применялась химико-механическая полировка, обеспечивающая эффективную шероховатость в диапазоне пространственных частот 0.025–70 μm⁻¹ на уровне 0.2 nm. Подробнее о методах изготовления и метрологии шероховатостей можно найти в [20–22].

На следующем этапе методом гидроабразивной резки вырезались прямоугольные заготовки 200×25×25 mm, и с помощью алмазного инструмента на фрезерном станке на боковых поверхностях вырезались продольные пазы. Нижние два паза предназначены для прижима зеркала в

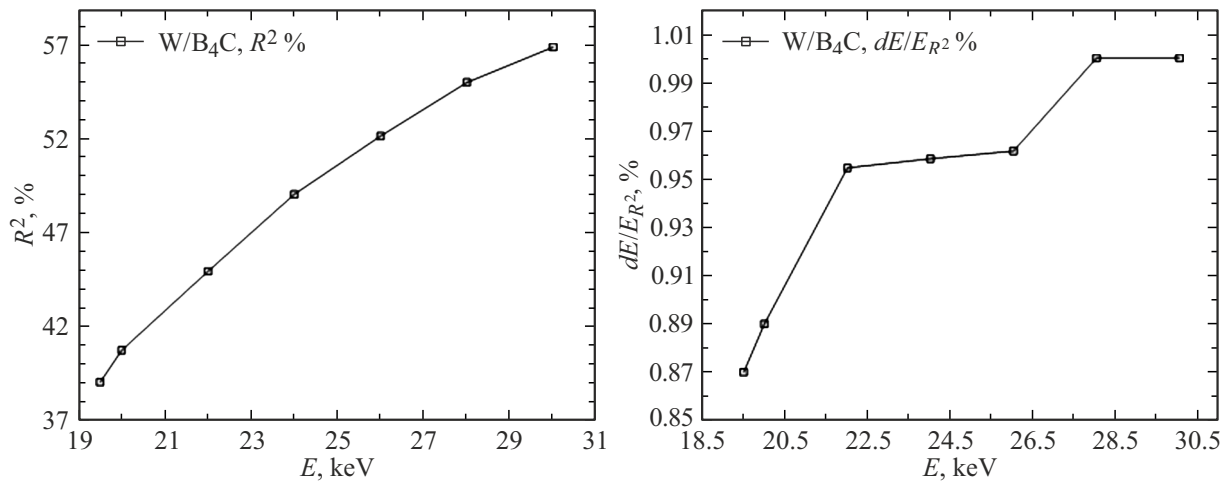


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента отражения R и спектральной селективности $\Delta E/E$ после двукратного отражения. Поддиапазон № 2, W/B₄C МРЗ с параметрами: число периодов $N = 300$, период $d = 21 \text{ \AA}$, доля вольфрама в периоде $\beta = 0.38$, шероховатость пленок W $\sigma_W = 2.5 \text{ \AA}$ и B₄C_{B₄C} = $4.9 \text{ \AA}$.

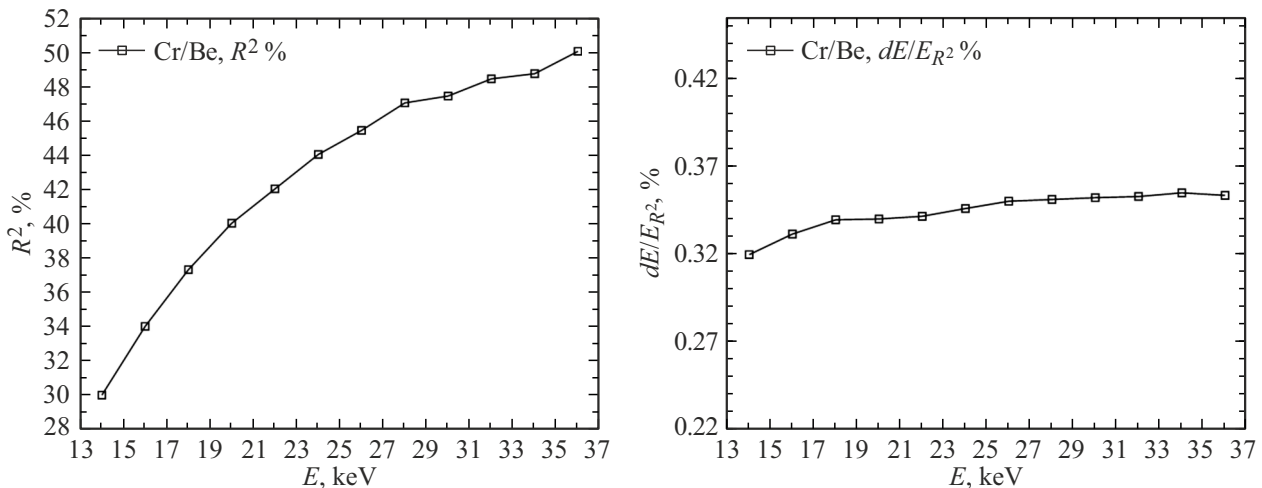


Рис. 6. Спектральные зависимости коэффициента отражения R и спектральной селективности $\Delta E/E$ после двукратного отражения. Поддиапазон № 2, Cr/Be МРЗ с параметрами: число периодов $N = 300$, период $d = 20 \text{ \AA}$, доля хрома в периоде $\beta = 0.5$, шероховатость пленок Cr $\sigma_{Cr} = 4.3 \text{ \AA}$ и Be $\sigma_{Be} = 4.3 \text{ \AA}$.

приборе на 3 шарика. Верхние пазы выполняли функцию компенсаторов термоиндуцированных искажений, о чем будет сказано ниже. Такой подход минимизирует шероховатость и высокочастотные ошибки формы поверхности.

На завершающем этапе изготовления подложек с использованием малоразмерного ионного пучка производилась коррекция локальных ошибок формы. Оборудование и методика коррекции описаны в [24–29].

Измерения формы поверхности подложек производилось с помощью интерферометра Zygo Verifier 100 с плоским эталоном. Большие размеры зеркал, превышающие рабочую апертуру интерферометра, и высокая, на уровне 1 nm , точность формы потребовали разработки специальных методик обработки интерферограмм, учета

ошибок эталона [28–37] и сшивки результатов измерений по малым кадрам [38–46]. Подробнее о методиках измерений и обработки интерферограмм, разработанных в рамках настоящей работы можно найти в [47,48]. Фотография подложек и карты ошибок приведены на рис. 7.

Описанная методика изготовления зеркал, как показывает наша практика, позволяет регулярно получать элементы рентгеновской оптики с шероховатостью лучше 0.2 nm и ошибкой формы лучше 2 nm для зеркал длиной более 100 mm и точностью $\pm 0.6 \text{ nm}$.

Наибольшая тепловая нагрузка приходится на Mo/B₄C-стрип, который для эффективного охлаждения нанесен по центру подложки. Стрипы W/B₄C и Cr/Be нанесены по краям подложки. Расстояния между

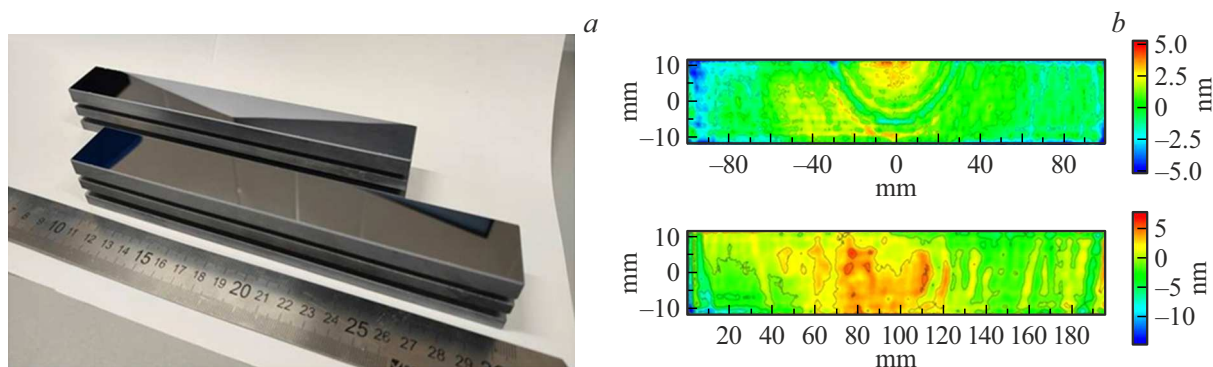


Рис. 7. *a* — фотография зеркал, *b* — карты ошибок подложек для двухзеркального монохроматора.

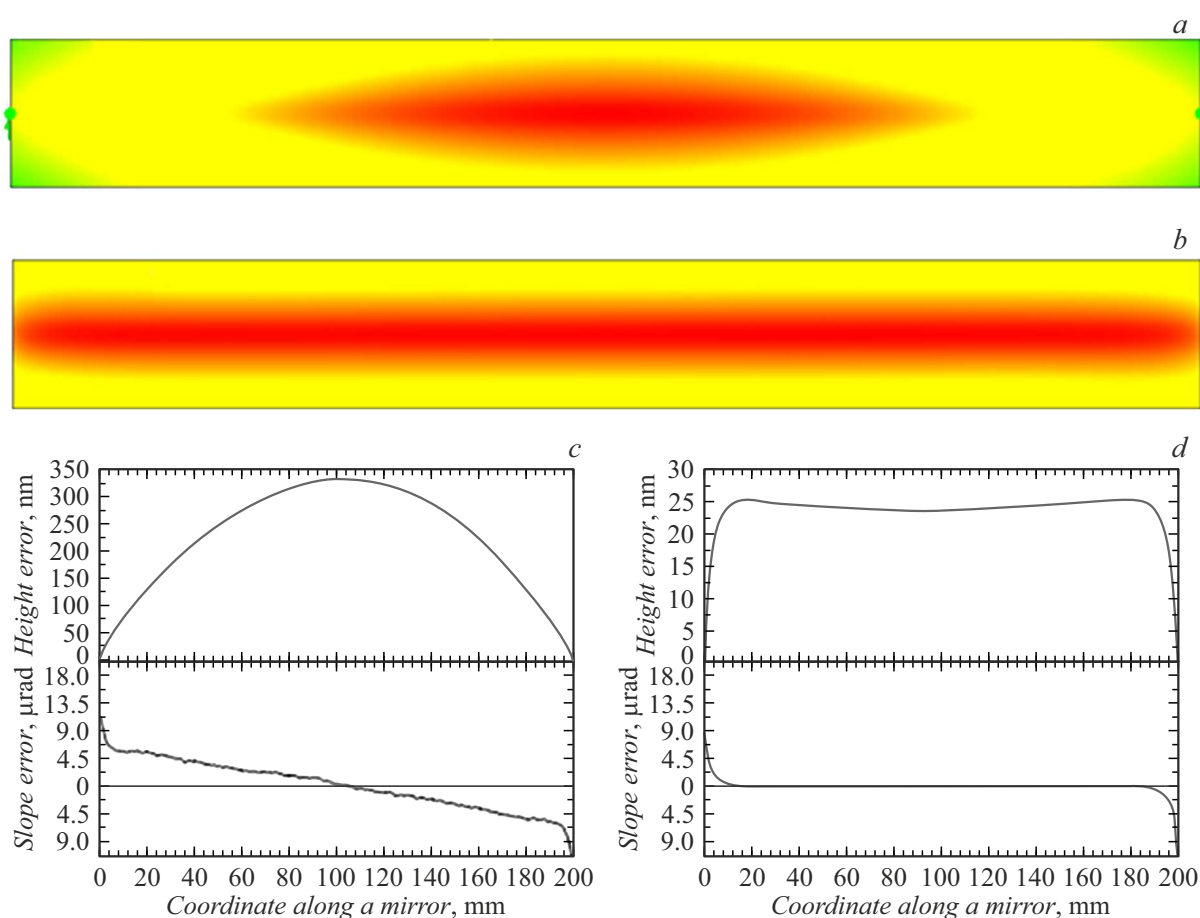


Рис. 8. Карта термоиндуцированной деформации кремниевой подложки без проточек (*a*); центральное продольное сечение и угловая ошибка кремния без проточек. СКО угловой ошибки $3.81 \mu\text{rad}$ (*c*); карта термоиндуцированной деформации кремниевой подложки с проточками (*b*); центральное продольное сечение и угловая ошибка кремния с проточками. СКО угловой ошибки $0.26 \mu\text{rad}$ (*d*).

центрами стрипов были выбраны равными 6 mm. Максимальная поглощенная мощность излучения составила 137 W при угле падения 0.95° . Подложки охлаждаются водой, текущей по медным радиаторам, приложенным к подложке в верхней части через индиевую прокладку. Как было показано в ряде работ, такой способ охлаждения обеспечивает минимальные

термоиндуцированные ошибки формы [7,49,50]. Расчет охлаждения проводился в программе SolidWorks Fluent, которая позволяет учитывать скорость и направление охлаждающей жидкости. В ходе расчета были найдены оптимальные параметры: ширина радиатора 8 mm, диаметр канала 6 mm, расход воды 4 l/min, температура воды на входе 21°C . Охлаждение подложки

Основные характеристики ДЗМ

Характеристика	Значение
Рабочий диапазон, keV	10–30
Пиковый коэффициент двукратного отражения в диапазоне 10–19 keV для Mo/B ₄ C, %	57
Спектральная селективность при двукратном отражении в диапазоне 10–19 keV для Mo/B ₄ C, %	1.4–1.6
Пиковый коэффициент двукратного отражения в диапазоне 19–30 keV для W/B ₄ C, %	57
Спектральная селективность при двукратном отражении в диапазоне 19–30 keV для W/B ₄ C, %	0.87±1
Пиковый коэффициент двукратного отражения в диапазоне 19–30 keV для Cr/Be, %	50
Спектральная селективность при двукратном отражении в диапазоне 10–19 keV для Cr/Be, %	0.32–0.35
Угловое разрешение сканирования по энергиям, μrad	0.9
Охлаждение подложек зеркал	Водяное
Предельное остаточное давление в вакуумной камере, Torr	5 · 10 ⁸

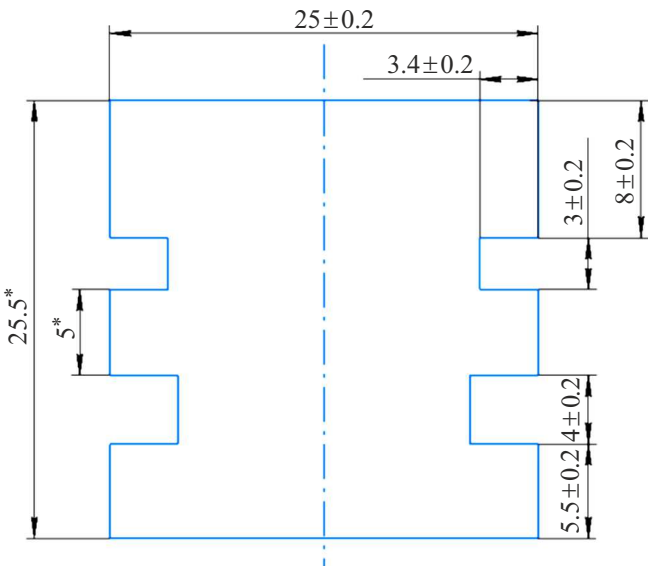


Рис. 9. Чертеж охлаждаемых в верхней части подложек ДЗМ. Нижние проточки используются для крепления подложки в оправе.

с двух сторон осуществлялось противоположно направленными независимыми потоками.

Для детали без продольных проточек сверху на рис. 8, а, с приведены карта термоиндуцированной деформации поверхности и продольные сечения деформации и угловой ошибки соответственно. Как видно из рисунка, максимальная высота профиля поверхности составила около 350 nm, а угловая ошибка находится на уровне 4 μrad.

Для минимизации влияния термоиндуцированных искажений формы подложки зеркал изготавливались по технологии „smart-cut“ [7,50]. Технология заключается в протачивании вдоль подложки канавок определенных

габаритов, при которых угловая ошибка формы будет минимальной. В процессе расчета были найдены оптимальные параметры проточек, которые составили: глубина 3.4 mm, ширина 3 mm (рис. 9). Как видно из рис. 8, b, d, деформационный след от пучка в продольном направлении стал более однородным, а величина деформации уменьшилась почти на порядок. Более того, если исключить узкую предкраевую область, то угловые ошибки составили 0.1–0.2 μrad.

Нижние проточки в кремнии используются для крепления подложки в оправе с помощью прижима „шарик“–на–„шарик“. Согласно расчетам в SolidWorks, такой способ крепления гарантирует деформации формы на уровне 0.1 nm по параметру среднеквадратического отклонения (СКО) при силе прижима на шарик 1 kgf.

Финальные измерения угловых ошибок волновых фронтов после отражения от зеркал проводились на рентгенооптическом стенде, моделирующим пучок СИ. В качестве источника рентгеновского излучения выступает микрофокусная рентгеновская трубка Microbox с размером пятна фокусировки 10 μm, мощностью 7.5 W и медным анодом. Для двумерной коллимации выходящего из рентгеновской трубки излучения использована система Киркпатрика-Баеза [51–53] с зеркалами в форме параболических цилиндров с платиновым покрытием. Для исключения поглощения и рассеяния в воздухе рентгеновского излучения стенд оснащен вакуумировочными окошками из полиамидной фольги. Такая конструкция позволяет отодвинуть детектор на расстояние более 5 m от исследуемого зеркала, тем самым обеспечивая субмикрорадианную чувствительность к угловым ошибкам волновых фронтов. Подробное описание стенда можно найти в [54]. Рентгеновские измерения на стенде полностью подтвердили результаты измерений оптической интерферометрии. Таким образом, зеркала, которыми оснащен двух-зеркальный монохроматор, обеспечивают

ошибки отраженных фронтов на уровне не более $1\text{ }\mu\text{rad}$. Основные характеристики ДЗМ приведены в таблице.

Заключение

В ИФМ РАН создан двухзеркальный монохроматор для синхротрона поколения 4+ „СКИФ“. Монохроматор работает в диапазоне $10\text{--}30\text{ keV}$. Монохроматизация пучка СИ осуществляется двумя блоками стриповых зеркал. Монохроматизация в диапазоне $10\text{--}19\text{ keV}$ осуществляется $\text{Mo}/\text{W}_4\text{C}$ -покрытием с пиковым коэффициентом двукратного отражения 57% и селективностью $1\%\text{--}1.6\%$. В диапазоне $19\text{--}30\text{ keV}$ работают $\text{W}/\text{W}_4\text{C}$ -покрытия с пиковым коэффициентом двукратного отражения 57% и селективностью $0.86\%\text{--}1\%$ и Cr/Be -стрип с пиковым коэффициентом отражения 50% и селективностью $0.3\%\text{--}0.35\%$.

Для компенсации термоиндуцированных деформаций подложки изготовлены из монокристаллического кремния по технологии „smart-cut“ с водяным охлаждением. Расчетная термоиндуцированная деформация вдоль зеркала составляет $0.2\text{ }\mu\text{rad}$.

Методами химико-механической полировки и ионно-пучковой обработки поверхности удалось достичь значения эффективной шероховатости $\sigma = 0.18\text{ nm}$. СКО формы подложек от плоскости не превышает 2 nm .

Измеренная на коллимированном рентгеновском пучке расходимость, наведенная неровностями кремниевых подложек, составила менее $1\text{ }\mu\text{rad}$.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гос. задания № FFUF-2024-0022. Изготовление и тестирование МРЗ производилось при поддержке гранта РНФ № 21-72-20108.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Я.В. Зубавичус. *Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов „СКИФ“*. Том 1. Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс (Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 2022)
- [2] Я.В. Ракшун, Ю.В. Хомяков, Е.И. Глушков, А.С. Гоголев, М.В. Горбачев, А.В. Дарьин, Ф.А. Дарьин, И.П. Долбня, С.В. Рашченко, В.А. Чернов, Н.И. Чхало, М.Р. Шарафутдинов. *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов*, **336** (5), 229 (2025). DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122
- [3] S.V. Rashchenko, M.A. Skamarokha, G.N. Baranov, Y.V. Zubavichus, I.V. Rakshun. *AIP Conf. Proceed.*, **2299** (1), 060001 (2020). DOI: 10.1063/5.0030346
- [4] P. Deschamps, P. Engström, S. Fiedler, C. Riekel, S. Wakatsuki, P. Høghøj, E. Ziegler. *Synchrotron Radiation*, **2** (3), 124 (1995). DOI: 10.1107/S0909049595001592
- [5] T. Koyama, Ya. Senba, H. Yamazaki, T. Takeyuchi, M. Tanaka, Ya. Shimizu, K. Tsubota, Ya. Matsuzaki, H. Kishimoto, T. Miura, S. Shimizu, T. Saito, H. Yumoto, K. Uesugi, M. Hoshino, J. Yamada, T. Osaka, M. Sugahara, N. Nariyama, Ya. Ishizawa, H. Nakano, C. Saji, Kyo Nakajima, K. Motomura, Ya. Joti, M. Yabashi, H. Ohashi. *Synchrotron Radiation*, **29** (5), 1265 (2022). DOI: 10.1107/S1600577522006610
- [6] K.J.S. Sawhney, I.P. Dolbnya, S.M. Scott, M.K. Tiwari, G.M. Preece, S.G. Alcock, A.W. Malandain. In: *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components VI*, **813908** (SPIE, 2011), p. 79–86. DOI: 10.1117/12.894920
- [7] P. Brumund, J. Reyes-Herrera, C. Morawe, T. Dufrane, H. Isern, T. Brochard, M. Sánchez del Río, C. Detlefs. *J. Synchrotron Radiation*, **28**, 1423 (2021). DOI: 10.1107/S160057752100758X
- [8] А.Д. Ахсаляян, Е.Б. Ключенков, А.Я. Лопатин, В.И. Лучин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.В. Свечников, М.Н. Торопов, Н.Н. Цыбин, Н.И. Чхало, А.В. Щербаков. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, **1**, 5 (2017). DOI: 10.7868/S0207352817010048
- [9] D.-G. Liu, C.-H. Chang, C.-Y. Liu, S.-H. Chang, J.-M. Juang, Y.-F. Song, K.-L. Yu, K.-F. Liao, C.-S. Hwang, H.-S. Fung, P.-C. Tseng, C.-Y. Huang, L.-J. Huang, S.-C. Chung, M.-T. Tang, K.-L. Tsang, Y.-S. Huang, C.-K. Kuan, Y.-C. Liu, K.S. Liang, U.-S. Jeng. *J. Synchrotron Radiation*, **16**, 97 (2009). DOI: 10.1107/S0909049508034134
- [10] М.А. Блохин, И.Г. Швейцер. *Рентгеноспектральный справочник* (Наука, М., 1982)
- [11] M. Svechnikov. *J. Appl. Crystallogr.*, **53** (1), 244 (2020). DOI: 10.1107/S160057671901584X
- [12] R. Shaposhnikov, V. Polkovnikov, S. Garakhin, Y. Vainer, N. Chkhalo, R. Smertin, K. Durov, E. Glushkov, S. Yakunin, M. Borisov. *J. Synchrotron Radiation*, **31** (2), 268 (2024). DOI: 10.1107/S1600577524000419
- [13] C.C. Walton. *PhD thesis* (University of California, Berkeley, USA, 1997)
- [14] P.C. Pradhan, A. Majhi, M. Nayak. *J. Appl. Phys.*, **123**, 095302 (2018). DOI: 10.1063/1.5018266
- [15] A. Rack, Ch. Morawe, L. Mancini, D. Dreossi, D.Y. Parkinson, A.A. MacDowell, F. Siewert, T. Rack, T. Holz, M. Krämer, R. Dietsch. In: *Advances in X-Ray/EUV Optics and Components IX*, **92070V** (SPIE, 2014), p. 213–219. DOI: 10.1117/12.2060801
- [16] R. Pleshkov, N. Chkhalo, V. Polkovnikov, M. Svechnikov, M. Zorina. *J. Appl. Crystallogr.*, **54** (6), 1747 (2021). DOI: 10.1107/S160057672101027X
- [17] B. Huang, W. Le, Y. Wang, X. Luo, Y. Yang. *Appl. Surf. Sci.*, **464**, 10 (2019). DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.09.077
- [18] W.K. Lee, K. Fezzaa, P. Fernandez, G. Tajiri, D.M. Mills. *Synchrotron Radiation*, **8** (1), 22 (2001). DOI: 10.1107/S0909049500013868
- [19] H. Thiess, H. Lasser, F. Siewert. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **616** (2–3), 157 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2009.10.077

- [20] A. Erko, M. Idir, Th. Krist, A.G. Michette. *Modern Developments in X-ray and Neutron Optics*. (Springer, NY., Berlin, Heidelberg, 2008)
- [21] Н.И. Чхало, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салашенко, М.Н. Торопов. УФН, **190** (1), 74 (2020).
- [22] U. Dinger, F. Eisert, H. Lasser, M. Mayer, A. Seifert, G. Seitz, S. Stacklies, F. Stickel, M. Weiser. In: *Soft X-Ray and EUV Imaging Systems*. **4146**, 35–46 (SPIE, 2000). DOI: 10.1117/12.406674
- [23] E. Ziegler, L. Peverini, N. Vaxelaire, A. Cordon-Rodriguez, A.V. Rommeveaux, I.V. Kozhevnikov, J. Susini. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, **616** (2–3), 188 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2009.12.062
- [24] A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov. *Precision Engineer.*, **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006
- [25] S.R. Wilson, D.W. Reicher, J.R. McNeil. In: *Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics*, **996**, 74 (SPIE, 1989). DOI: 10.1117/12.948051
- [26] T.W. Drueding, S.C. Fawcett, S.R. Wilson, T.G. Bifano. *Opt. Engineer.*, **34** (12), 3565 (1995). DOI: 10.1117/12.215648
- [27] M. Xu, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou, W. Liao. *Appl. Opt.*, **54** (27), 8055 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.008055
- [28] M. Zeuner, S. Kiontke. *Opt. Photonik*, **7** (2), 56 (2012). DOI: 10.1002/opph.201290051
- [29] T. Franz, T. Hänsel. In: *Optical fabrication and testing*. OThC7 (Optica Publishing Group, 2008), DOI: 10.1364/OFT.2008.OThC7
- [30] B.S. Fritz. *Opt. Engineer.*, **23** (4), 379 (1984). DOI: 10.1117/12.7973304
- [31] G. Zhou, W. Lei, X. Dong, J. Wang. *Laser Optoelectron. Progress*, **60** (23), 2312001 (2023). DOI: 10.3788/LOP222992
- [32] G. Zhou, J. Wang, W. Lei, X. Dong, J. Wang. *Appl. Opt.*, **63** (8), 2086 (2024). DOI: 10.1364/AO.516190
- [33] U. Griesmann. *Appl. Opt.*, **45** (23), 5856 (2006). DOI: 10.1364/AO.45.005856
- [34] I. Powell, E. Goulet. *Appl. Opt.*, **37** (13), 2579 (1998). DOI: 10.1364/AO.37.002579
- [35] P.B. Keenan. Pseudo-shear interferometry. In: *Precision Surface Metrology*, **429**, 2–7 (SPIE, 1983). DOI: 10.1117/12.936333
- [36] Y.C. Chen, C.W. Liang, H.S. Chang, P.C. Lin. *Opt. Express*, **26** (22), 29123 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.029123
- [37] A. Kochetkov, A. Shaykin, I. Yakovlev, E. Khazanov, A. Cheplakov, B. Wang, Y. Jin, S. Liu, J. Shao. *Opt. Express*, **33** (6), 13673 (2025). DOI: 10.1364/OE.551097
- [38] M. Otsubo, K. Okada, J. Tsujiuchi. *Opt. Engineer.*, **33** (2), 608 (1994). DOI: 10.1117/12.152248
- [39] M.B. Da Silva, S.G. Alcock, I.T. Nistea, K. Sawhney. *Opt. Lasers Engineer.*, **161**, 107192 (2023). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107192
- [40] L. Huang, J. Xue, B. Gao, M. Idir. *Opt. Express*, **26** (8), 9882 (2018). DOI: 10.1364/oe.26.009882
- [41] H. Yumoto, T. Koyama, S. Matsuyama, K. Yamauchi, H. Ohashi. *Rev. Scientific Instruments*, **87** (5), (2016). DOI: 10.1063/1.4950714
- [42] P. Murphy, J. Fleig, G. Forbes, D. Miladinovic, G. DeVries, S. O'Donohue. In: *Interferometry XIII: Applications*, **6293**, 150–159 (SPIE, 2006). DOI: 10.1117/12.680473
- [43] C. Supranowitz, J.P. Lormeau, C. Maloney, P. Murphy, P. Dumas. In: *Optics and Measurement International Conference 2016*, **10151**, 81–92 (SPIE, 2016). DOI: 10.1117/12.2257279
- [44] P. Zhang, H. Zhao, X. Zhou, J. Li. *Opt. Express*, **18** (14), 15216 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.015216
- [45] M. Bray. In: *Optical Fabrication and Testing*, **3739**, 259–273 (SPIE, 1999). DOI: 10.1117/12.360153
- [46] J. Fleig, P. Dumas, P.E. Murphy, G.W. Forbes. In: *Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies*, **5188**, 296–307 (SPIE, 2003). DOI: 10.1117/12.506254
- [47] E.V. Petrakov, N.I. Chkhalo, A.K. Chernyshev, E.I. Glushkov. *Opt. Engineer.*, **63** (11), 114104–1 (2024). DOI: 10.1117/1.OE.63.11.114104
- [48] E.V. Petrakov, E.I. Glushkov, A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo. *J. Surf. Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **18** (Suppl 1), S58 (2024). DOI: 10.1134/S1027451024701878
- [49] L. Zhang, R. Barrett, K. Friedrich, P. Glatzel, T. Mairs, P. Marion, G. Monaco, C. Morawe, T. Weng. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **425** (5), 052029 (2013). DOI: 10.1088/1742-6596/425/5/052029
- [50] E.I. Glushkov, I.V. Malyshev, E.V. Petrakov, N.I. Chkhalo, Yu.V. Khomyakov, Ya.V. Rakshun, V.A. Chernov, I.P. Dolbnya. *J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **17** (Suppl 1), S233 (2023). DOI: 10.1134/S1027451023070133
- [51] P. Kirkpatrick, A.V. Baez. *J. Opt. Society America*, **38** (9), 766 (1948). DOI: 10.1364/JOSA.38.000766
- [52] P.J. Eng, M. Newville, M.L. Rivers, S.R. Sutton. In: *X-Ray Microfocusing: Applications and Techniques*, **3449**, 145–156 (SPIE, 1998). DOI: 10.1117/12.330342
- [53] Y.S. Uchida. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (5R), 1127 (1991). DOI: 10.1143/JJAP.30.1127
- [54] D.G. Reunov, A.D. Akhsakhalyan, E.I. Glushkov, I.G. Zabrodin, I.V. Malyshev, M.S. Mikhailenko, E.V. Petrakov, A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo. *J. Surf. Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **18** (Suppl 1), S38 (2024). DOI: 10.1134/S1027451024701842