15

Фокусирующая система Киркпатрика–Баеза для синхротронных применений

© Д.Г. Реунов,[1] А.Д. Ахсахалян,[1] Е.И. Глушков,[1] И.П. Долбня,[2] И.Г. Забродин,[1] И.А. Каськов,[1] И.В. Малышев,[1] М.С. Михайленко,[1] Е.В. Петраков,[1] А.Е. Пестов,[1] В.Н. Полковников,[1] А.К. Чернышев,[1] Н.И. Чхало[1]

[1]Институт физики микроструктур РАН,
603087 Афонино, Кстовский р-н, Нижегородская обл., Россия
[2]Diamond Light Source, United Kingdom,
OX11 0DE, Oxfordshire, Didcot, Harwell Science and Innovation Campus
e-mail: reunov_dima@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2025 г.
В окончательной редакции 29 мая 2025 г.
Принято к публикации 29 мая 2025 г.

Описана фокусирующая система Киркпатрика–Баеза для синхротронного источника поколения 4+ на базе Сибирского кольцевого источника фотонов. Система предназначена для работы в диапазоне энергий фотонов 10–30 keV и должна обеспечить пятно фокусировки субмикронного размера. Сообщено о принципах построения и составе фокусирующей системы, а также методике измерения размера пятна фокусировки. Дана краткая характеристика ключевых проблем и методов, использованных при создании этой системы. Приведены результаты тестирования фокусирующих свойств системы, полученные с использованием лабораторного стенда и первого экспериментального комплекта эллиптических зеркал. Минимальный размер пятна фокусировки составил около 5.2 μm, что с учетом размера лабораторного источника и качества коллимирующей оптики стенда на синхротроне соответствует пятну фокусировки примерно в 2.6 μm. Обсуждены причины расхождения расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: синхротрон, кольцевой источник фотонов, фокусировка, система Киркпатрика–Баеза.

DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61349.124-25n

Введение

В последние годы в России и мире идет активное развитие и строительство источников синхротронного излучения (СИ) нового поколения. В ближайшее время будет запущен Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) поколения 4+. На одном из его каналов будет реализована станция 1–1 „Микрофокус“, которая будет решать фундаментальные и прикладные задачи при помощи высокоинтенсивного рентгеновского пучка с субмикронной фокусировкой [1]. Для решения задачи фокусировки рентгеновского пучка была выбрана рентгеновская оптика скользящего падения в конфигурации Кирпатрика–Баеза (КБ). Фокусирующая система КБ [2–7] представляет собой эффективное решение для высокоточного управления СИ, находящее применение в экспериментах, требующих высокого пространственного разрешения в жестком рентгеновском диапазоне. В основе системы лежит комбинация двух перпендикулярно установленных (скрещенная система) эллиптических зеркал, что позволяет с высокой точностью фокусировать рентгеновские лучи, обеспечивая низкий уровень аберраций. Зеркала фокусирующей системы КБ представляют собой эллиптический цилиндр с платиновым покрытием для обеспечения работы в широком спектральном диапазоне.

При разработке и создании фокусирующей системы необходимо было решить ряд технических и технологических проблем, чтобы изготовить зеркала с эффективной шероховатостью на уровне 2 Å и среднеквадратичным отклонением формы ~ 1 nm, что дает угловую ошибку $\leq 1\,\mu$rad, необходимые для достижения субмикронной фокусировки жесткого рентгеновского излучения.

Первой серьезной проблемой является метрология крупногабаритных зеркал. Длина зеркал составила 200 mm, что обусловлено работой прибора в геометрии скользящего падения и необходимостью захватить значительную часть пучка СИ. В большинстве случаев размер изготавливаемых зеркал превышает апертуру интерферометра, при помощи которого производится измерение формы поверхности.

Второй проблемой является сложность интерпретации результатов интерферометрических измерений формы поверхности. Кривизна поверхности настолько большая, что интерференция наблюдается лишь от малой части поверхности. Обе эти проблемы решаются за счет применения технологии сшивки малых кадров от разных областей на подложке и последующем восстановлением всей карты поверхности.

Третья проблема — это изготовление таких зеркал с нанометровым или даже суб-нанометровым отклонением формы зеркала от необходимого расчетного профиля. Эту проблему мы решаем при помощи ионно-пучкового метода формообразования. В этом методе

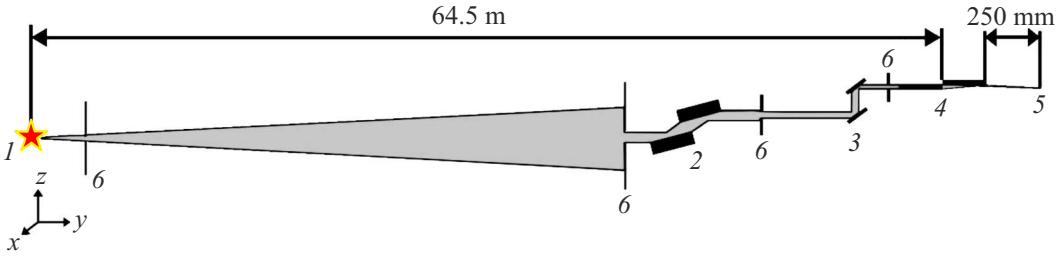

Рис. 1. Рентгенооптическая схема станции 1-1-1: *1* — источник СИ, ондулятор; *2* — двухзеркальный монохроматор с многослойными рентгеновскими зеркалами; *3* — прорезной кристалл-монохроматор; *4* — фокусирующая система КБ; *5* — область фокусировки СИ; *6* — щели.

реализован съем материала поверхности через апертурную маску, которая вырезает необходимую область пучка для создания равномерного профиля съема вдоль короткой стороны зеркала. А профиль зеркала вдоль длинной стороны формируется за счет неравномерного возвратно-поступательного движения обрабатываемой детали. На финальной стадии обработки производится коррекция локальных ошибок формы.

И четвертая проблема — это финальная юстировка и аттестация зеркал КБ системы как по отдельности, так и всего прибора целиком на рабочей длине волны, или близкой к ней. На этой стадии изготовления прибора решаются следующие задачи: юстировка прибора с целью достижения минимального размера пятна фокусировки; определение размера фокусного пятная; калибровка пьезоактуаторов, обеспечивающих финальную юстировку зеркал на синхротроне, и соответствующее программное обеспечение. Для этих целей мы используем разработанный нами ранее рентгенооптический лабораторный стенд с коллимированным рентгеновским пучком с длинной волны 0.154 nm (8047.8 eV). „Сердцем“ стенда являются коллимирующая системаКБ, которая дает сколлимированный пучок размером $244 \times 244\,\mu$m с расходимостью менее $\pm 10\,\mu$rad и микрофокусная рентгеновская трубка с размером источника $8 \times 8\,\mu$m. Применение коллимирующей системы после рентгеновской трубки позволило нам эффективно „удалить“ источник излучения примерно на 20 m с сохранением интенсивности на достаточном для прецизионных измерений уровне, тем самым приблизив условия лабораторного эксперимента к синхротронным.

В настоящей работе описываются концепция, исполнение и аттестация фокусирующей системы КБ.

1. Концепция построения и состав прибора

В рамках концепции станции 1-1-1 [8–10], рентгенооптическая схема, в которой будет использован прибор, приведена на рис. 1. Расстояние от источника рентгеновского излучения до центра КБ системы составило $L_{\text{КВ}} = 64.5$ m, до точки фокусировки от выходного торца зеркала М2 $L_{\text{PF}} = 250$ mm. Размер источника на полувысоте интенсивности составляет $32.9 \times 5.9\,\mu$m в рабочем диапазоне энергий фотонов 10–30 keV.

При разработке фокусирующей системы использовались следующие подходы.

1. Для обеспечения эффективной работы прибора в широком диапазоне энергий фотонов в качестве материала отражающего покрытия была выбрана платина, обеспечивающая наибольший рабочий угол, который составил $\vartheta = 0.15°$.

2. При выборе длины зеркал был найден компромисс между максимальным сбором излучения из источника, требующим увеличения длины зеркал, с одной стороны, и обеспечением субмикронного размера пятна фокусировки и уменьшения различия горизонтального и вертикального размеров пятня фокусировки, с другой. Эти цели достигаются уменьшением размера зеркал. Компромиссная длина зеркал составила 200 mm. Рентгенооптическая схема фокусирующей системы приведена на рис. 1.

3. Для уменьшения эллиптичности пятна фокусировки с учетом большого различия горизонтального и вертикального размера источника первое зеркало осуществляет фокусировку в вертикальной плоскости (горизонтальная ориентация), второе — в горизонтальной (вертикальная ориентация). Такая конфигурация зеркал в полтора раза уменьшает эллиптичность источника излучения.

4. Для точной подстройки размера пятна фокусировки держатели зеркал, помимо 4*D* механических юстировочных устройств, оснащены пьезоактуаторами [11], позволяющими *in-situ* изменять угол падения излучения на зеркала. Диапазон угловых перемещения составляет ± 0.13 mrad с минимальным шагом 66 nrad.

5. Для обеспечения размерной стабильности зеркал и оптической системы КБ в целом базовая плита и детали держателей зеркал изготовлены из материалов с низким коэффициентом температурного расширения и крепятся между собой и к корпусу прибора через полированные металлические шарики.

6. Корпус прибора выполнен в герметичном виде и может через специальные клапаны наполняться инертным газом или сухим азотом. При этом вакуумно-плотные

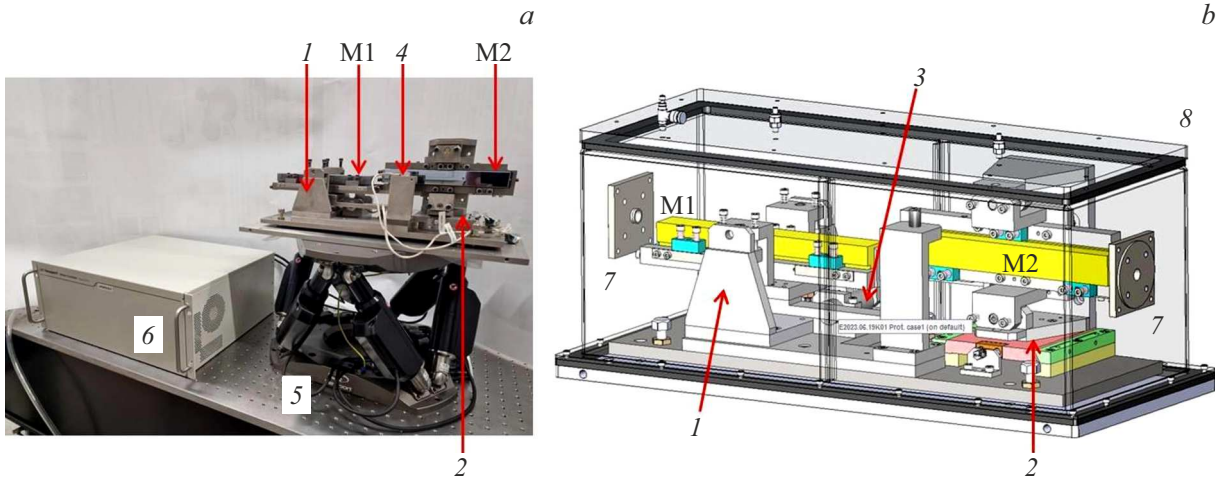

Рис. 2. Фотография со снятым корпусом (a) и 3D-модель фокусирующей системы в корпусе (b). M1, M2 — первое и второе зеркало фокусирующей КБ системы; *1, 2* — 4D-механические юстировочные устройства первого и второго зеркала соответственно; *3, 4* — пьезоактуаторы для точной подстройки углов первого и второго зеркал соответственно; *5* — гексапод Newport HXP200S-MECA; *6* — блок управления гексапода; *7* — вакуумно-плотные окна.

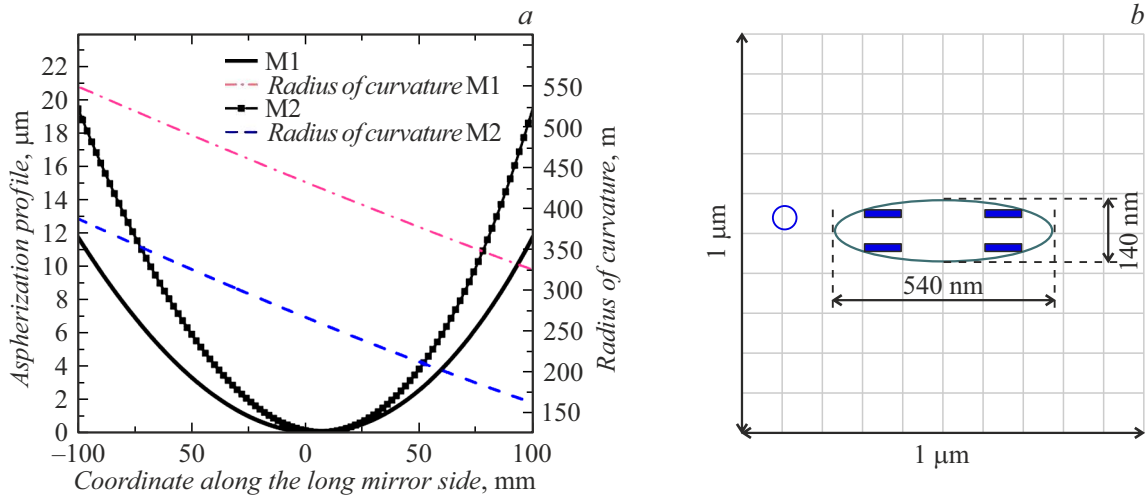

Рис. 3. Профили асферизации зеркал M1, M2 фокусирующей системы с расчетными радиусами кривизны для каждого зеркала (a) и расчетное значение пятна фокусировки на источнике СИ (b).

окна изготовлены из аморфной полиимидной пленки „Каптон“.

7. Для точной настройки оптической оси прибора на источник СИ прибор в корпусе устанавливается на высокоточный гексапод (Newport HXP200S-MECA) [12]. Диапазон линейных перемещений составляет: X, Y, $Z \pm 40$, ± 45, ± 27 mm с точностью $0.15\,\mu$m; диапазон угловых перемещений: θX, θY, θZ ± 0.157, ± 0.14, ± 0.262 rad с точностью $\pm 1.17\,\mu$rad. Финальная юстировка оси КБ системы на источник с субмикронной точностью производится за счет линейных перемещений вдоль осей X и Y.

8. Для гашения внешних вибраций гексапод с прибором устанавливается на гранитное основание.

Фотография со снятым корпусом и 3D-модель фокусирующей системы в корпусе приведены на рис. 2.

Согласно рентгенооптическим схемам канала СИ и фокусирующей системы, приведенным на рис. 1 и 2, а также заданным размерам источника ($32.9 \times 5.9\,\mu$m), были рассчитаны эллиптические профили зеркал и размеры пятна фокусировки. На рис. 3 приведены: результаты расчета профилей с радиусами кривизны для каждого зеркала (рис. 3, a) и пятно фокусировки (рис. 3, b). Как видно из рис. 3, максимальные отклонения профиля зеркал от плоскости составляют около 12 и $20\,\mu$m соответственно. Расчет фокусного расстояния эллипса производятся по формуле $c = \sqrt{a^2 - b^2}$, где a и b — полуоси эллипса. Зная профили изготовленных зеркал, мы можем рассчитать полуоси эллипса и соответствен-

но фокусное расстояние для каждого зеркала, которое составило 570 и 350 mm от середины M_1 и M_2 зеркал соответственно.

Размер пятна фокусировки составляет 140×540 nm. Существенный вклад вносит дифракционное уширение. Так, при энергии 10 keV результирующий размер пятна фокусировки составляет 250×580 nm вместо 140×540 nm, т.е. вклад в размер пятна фокусировки будет вносить геометрическое и дифракционное ограничения. При энергии 30 keV размер сфокусированного пятна равен 140×540 nm, что обусловлено исключительно геометрическими ограничениями.

2. Изготовление зеркал

Спецификой источников СИ является острая направленность излучения, большая средняя мощность и высокая пространственная когерентность излучения. Используемые рентгеновские зеркала должны удовлетворять ряду параметров: выдерживать большую поглощаемую мощность излучения, иметь эффективную шероховатость на уровне 2 Åи иметь среднеквадратичное отклонение формы ≤ 1 nm, что дает угловую ошибку ≤ 1 rad. С точки зрения сохранения размерной стабильности оптимальным материалом подложек является монокристаллический кремний [13–15].

При изготовлении таких зеркал ставится целый ряд задач, которые необходимо решить: формирование поверхности методиками ионно-пучковой обработки подложек [16–18]; измерение, методом „сшивки“ кадров, крупногабаритных и асферических зеркал с размерами, превышающими апертуру интерферометра [19–22]; фильтрация и учет ошибок измерений, связанных с качеством эталона [22]; аттестация рентгенооптических элементов на рентгеновском пучке [23].

Процесс изготовления подложек для зеркал можно разделить на три этапа: химико-механическая полировка [24], формообразование при помощи ионной обработки [25] и локальная коррекция ошибок формы [26].

На первоначальном этапе производится химико-механическая полировка (ХМП) плоской заготовки Si диаметром 220 mm для уменьшения эффективной шероховатости поверхности. ХМП производилась на трехшпиндельном станке 3ПД-350, который обрабатывает плоские и сферические детали размером до 350 mm в диаметре. Для обработки использовалась коллоидная суспензия оксида кремния O.P.S. Полировка осуществлялась с использованием полировальных сукон с мелким ворсом „Alupol“. Полировальник, изготовленный из ткани, снижает механическое воздействие на обрабатываемую заготовку. Результатом полировки является уменьшение эффективной шероховатости с 0.37 до 0.21 nm в диапазоне пространственных частот $0.025-65\,\mu\mathrm{m}^{-1}$. Шероховатость измерялась на стенде атомно-силовой микроскопии с возможностью работы с крупногабаритными подложками [27].

Далее вырезались бруски Si с нужными габаритами 200×25 mm при помощи гидроабразивной резки. И приступали к следующему этапу — формообразованию при помощи ионно-пучковой обработки широкоапертурным источником [28]. Предварительно обе заготовки измерялись на интерферометре с плоским эталонным фронтом Zygo Verifier с рабочей апертурой диаметром 100 mm с применением метода сшивки [22], так как форма поверхности отличается от плоскости, и длина зеркала больше, чем апертура интерферометра. Измерения происходили также в несколько этапов. Так как форма поверхности отличается от плоскости, интерферограмму можно получить лишь от небольшого участка зеркала. После измерения небольшого участка производилось линейное смещение зеркала и измерялся новый участок с перекрытием относительно предыдущего измерения. Получив набор измеренных областей, необходимо предварительно обработать полученные результаты. Сначала производилась фильтрация полученных изображений, чтобы избавиться от высокочастотных артефактов. На следующем этапа учитывались ошибки эталона интерферометра для получения более достоверного результата. После всей обработки производилась сшивка изображений по методике, описанной в работе [22].

Измерив карту поверхности и форму ионного пучка диаметром 100 mm, можно рассчитать маску, которая устанавливается между ионным источником и обрабатываемой деталью, которая при линейном и равномерном перемещении детали от края до края производит равномерный съем материала детали. А для того чтобы сформировать необходимый профиль эллиптической поверхности, движение детали делалось неравномерным. Происходит ускорение движения детали по краям и замедление в области большего съема материала. Процесс формообразования контролировался при помощи интерферометрических измерений.

После этого происходит финальный этап обработки — коррекция локальных ошибок формы при помощи малоразмерного ионного источника. Перед коррекцией производилось измерение формы поверхности при помощи интерферометра Zygo Verifier. По измеренной карте ошибок поверхности с учетом известной формы ионного пучка (почти гауссово распределение с шириной на полувысоте 2.5 mm) рассчитывалась пространственно-временная траектория движения детали относительно ионного пучка, и по ней осуществлялся съем материала. В процессе коррекции обрабатываемая область на заготовке поддерживает локальную нормаль к пучку, а глубина съема определялась временем нахождения пучка в точке.

Подробнее об установках ионно-пучкового травления, методах асферизации и коррекции локальных ошибок, измерений шероховатости и формы поверхности можно прочитать в работах [15,28].

Результатом этого технологического процесса стало достижение формы поверхности с отклонениями от расчетных значений по параметру RMS 2.3 и 2.8 nm

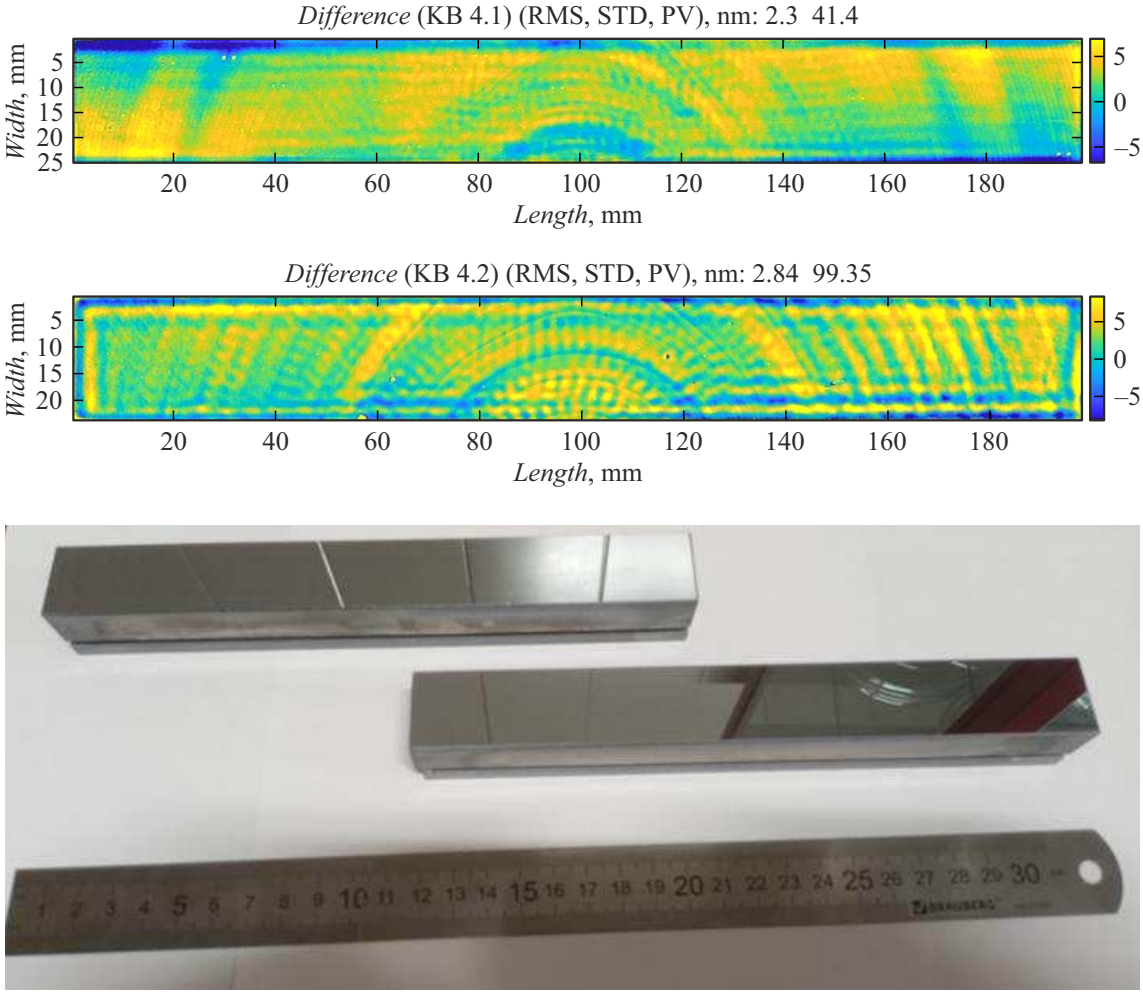

Рис. 4. Карты отклонения формы поверхности деталей от расчетной формы зеркал M1, M2 для фокусирующей системы КБ и фотография самих зеркал.

для первого и второго зеркал соответственно. Карты отклонения формы поверхности деталей от расчетной формы представлены на рис. 4.

Финальным этапом изготовления зеркала является нанесение отражающего покрытия на изготавливаемую подложку. Для указанного ранее спектрального диапазона 10–30 keV таким покрытием является платина (Pt). Нанесение платинового отражающего покрытия происходило методом магнетронного напыления. Установка оснащена шестью круглыми магнетронами планарного типа, расположенными по окружности вакуумной камеры диаметром 1 m (рис. 5). На поверхности магнетронов устанавливаются мишени из распыляемых материалов (диаметр 150–160 mm, толщины до 10 mm), служащие катодом. Охлаждение магнетронов производится за счет принудительной подачи воды с помощью помпы.

Подложка крепится на вращающемся диске, проходящем над магнетронами. Таким образом осуществляется послойное нанесение материалов в случае многослойной системы. Если же выращивается пленка лишь одного материала, то, как правило, работает один магнетрон. Расстояние от мишени до подложки составляет порядка 75 mm.

Над рабочими магнетронами загорается тлеющий разряд, ионы которого устремляются к мишени с отрицательным потенциалом, разгоняются и выбивают атомы вещества. Подложка располагается на подложкодержателе рабочей поверхностью вниз. Параметры тлеющего разряда в экспериментах с Pt были следующие. Ток разряда 300 mA, напряжение разряда 280 V. Скорость осаждения пленки порядка 0.12 nm/s.

Между подложкой и магнетроном, максимально приближенного к подложке, располагаются прецизионные фигурные диафрагмы. Они определяют распределение потока распыляемого вещества, попадающего на подложку. С помощью фигурных диафрагм обеспечивается равномерное, с точностью до 0.5%, распределение толщины выросшей пленки.

Конкретная форма диафрагм определяется экспериментально. Это итерационный процесс. На первом шаге математически определяется вид диафрагм, обеспечивающий равномерность на уровне 3%. Далее происходит

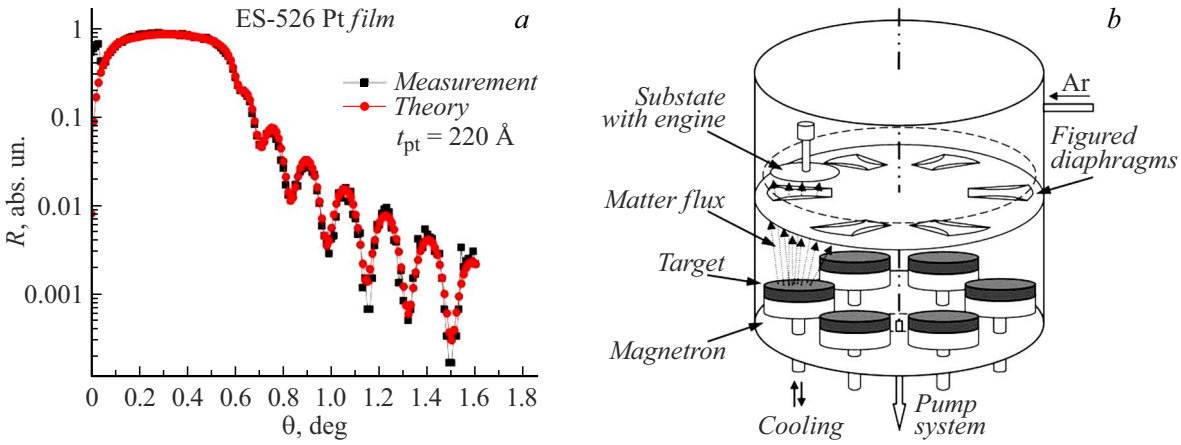

Рис. 5. Зеркальное отражение с теоретической подгонкой в программе „Multifittig“ для пленки Pt толщиной 22 nm (*a*) и схема вакуумной камеры с шестью магнетронами для процесса синтеза зеркала (*b*).

напыление пленки на тестовую подложку. Методом малоугловой рентгеновской рефлектометрии в разных точках подложки снимается кривая зеркального отражения.

С помощью программы „Multifittig“ [29] для каждой точки восстанавливаются параметры пленки. Таким образом, получается карта распределения толщин. При необходимости производится коррекция формы диафрагм, и процесс напыления–измерения повторяется до приемлемого уровня точности. После выведения формы диафрагм, обеспечивающих равномерность покрытия на уровне 0.5%, следует этап калибровки толщин. Толщина пленки Pt определялась временем нахождения подложки в зоне разряда соответствующего магнетрона. После напыления пленки со временем нахождения в разряде 15 min получены пленка, зеркальное отражение и его теоретическая подгонка, представленные на рис. 5.

Результат подгонки показал толщину пленки 22 nm. Следовательно, для напыления заданной толщины в 40 nm требуется 30 min. Именно в таком режиме наносилась пленка Pt на рабочую поверхность. Предварительно для улучшения адгезии между пленкой Pt и подложкой осаждалась пленка Cr толщиной 10 nm.

3. Финальная аттестация на лабораторном рентгеновском стенде

Финальным этапом аттестации изготовленных зеркал и системы КБ как готового устройства служит их аттестация на рентгеновском пучке. Проблема аттестации элементов рентгеновской оптики на рабочих длинах волн заключается в том, что лабораторные рентгеновские источники не имеют направленности излучения, в то время как для измерений с высоким угловым разрешением требуются длинные (метры — десятки метров) метрологические базы. Поэтому предварительно нами был разработан рентгенооптический стенд для таких целей [23]. Основная идея этого стенда состоит в том, что, имея микрофокусный источник рентгеновского излучения, коллимирующую оптическую систему и вакуумопроводы, можно сформировать слабо расходящийся пучок и транспортировать его на большие расстояния. Тем самым в лаборатории создаются условия, близкие к синхротрону. Угловая расходимость такого пучка определяется размером источника и фокусным расстоянием коллимирующей системы. В нашем случае минимальная расходимость составила $\Delta\vartheta \approx 8\,[\mu\text{m}]/1\,[\text{m}] = 8\,\mu\text{rad}$, что в ряде случаев близко к синхротронным пучкам.

Принцип работы состоит в следующем. Излучение от рентгеновского источника (XRT) засвечивает коллимирующую систему КБ (KB) (рис. 6). В качестве рентгеновского источника служит микрофокусная рентгеновская трубка MICROBOX 100 с медным анодом (характеристическая линия Cu Kα, $\lambda = 0.154$ nm или 8047.8 eV) и размером источника $8 \times 18\,\mu$m при мощности трубки 7.5 W. Зеркала коллимирующей системы имеют форму параболических цилиндров с платиновым покрытием. Зеркала изготавливались по методикам, описанным выше. Коллимирующая КБ система формирует коллимированный рентгеновский пучок размером $244 \times 244\,\mu$m как после КБ, так и на удалении более 3 m. Исследуемое фокусирующее зеркало или КБ (S) система в целом, с помощью гексапода, выводятся на зондовый пучок.

Для нахождения области каустики фокусировки, после фокусирующего зеркала мы устанавливали матричный детектор на разных (от 300 до 650 mm) расстояниях от зеркала. В качестве матричного детектора выступает сенсор GSENSE2020BSI [30] с размером пикселя $6.5 \times 6.5\,\mu$m и размером активной области 13.3×13.3 mm. В результате нам удалось прописать каустику пятна фокусировки (рис. 7, *a*). В область с наименьшим пятном фокусировки устанавливался нож по аналогии с [31]. Нож — это пластина кремния

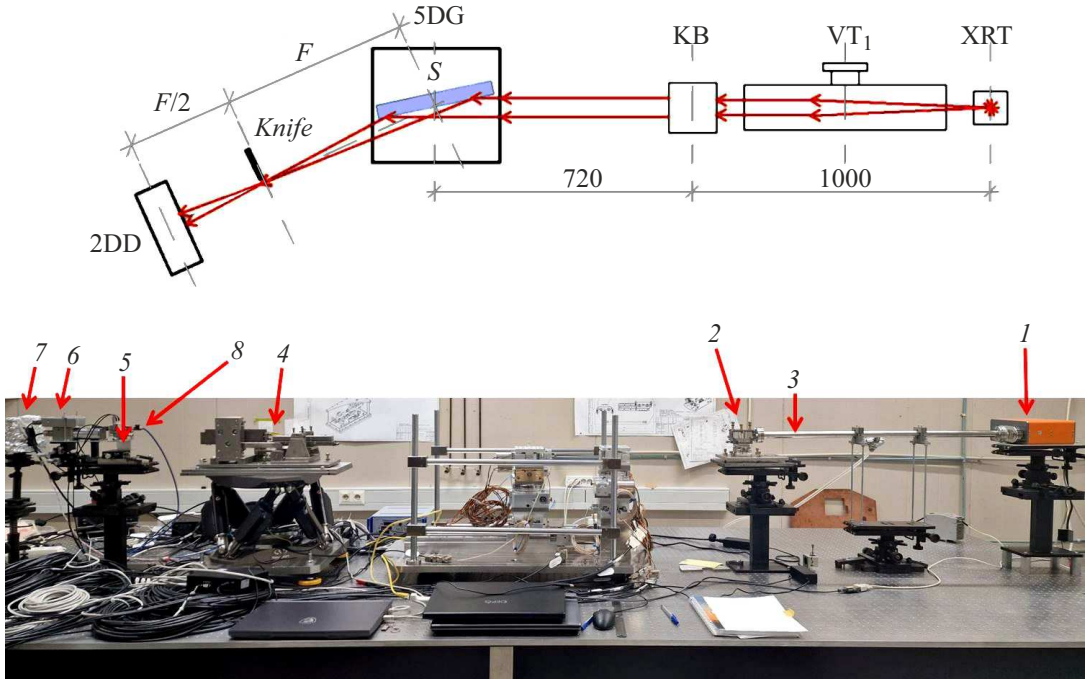

Рис. 6. Рентгенооптический измерительный стенд. XRT (*1*) — микрофокусный рентгеновский источник; KB (*2*) — коллимирующая система КБ; VT_1 (*3*) — вакуумный оптический тракт; 5DG — пятиосевой гониометр с измеряемой фокусирующей системой КБ (*4*); Knife (*5*) — нож с трех координатным пьезосканером; *6* — ФЭУ; 2DD (*7*) — двухкоординатный матричный детектор; *8* — микрометр.

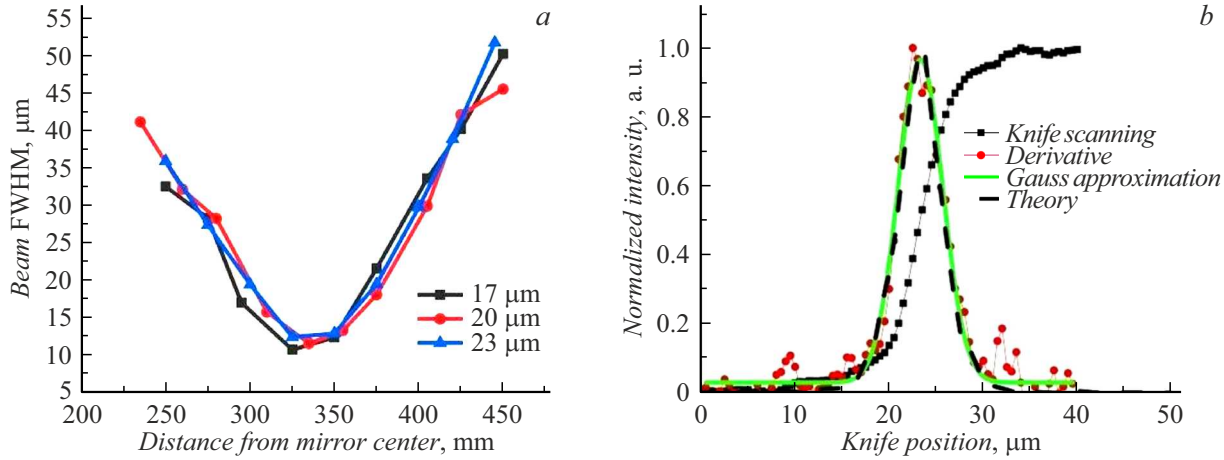

Рис. 7. *a* — скан каустики пятна фокусировки матричным детектором при разных положениях пьезоактуатора для точной подстройки зеркала; *b* — результаты измерения ножевым методом размера пятна фокусировки.

толщиной 0.3 mm, имеющая полированный торец. Торец был аттестован на шероховатость и сколы края при помощи сканирующего электронного микроскопа ZEISS EVO 10. Крупных артефактов с размером от 1 μm на рабочей длине 1 mm вдоль края, которые могут повлиять на определение размера пятна фокусировки, на торцевой части и на краю не были обнаружены (рис. 8). Белые небольшие вкрапления — это пылинки, которые с легкостью убираются. Нож закреплялся на 3*D*-столике с возможностью грубой ручной настройки и точной — пьезоактуаторами. Сканирование ножом пятна фокусировки осуществлялось с помощью пьезоактуаторов. Положение ножа дополнительно контролировалось при помощи индуктивного микрометра с чувствительностью 0.05 μm.

Ножом мы перекрываем пучок с шагом 0.5 μm и детектируем интегральную интенсивность пучка при помощи сцинтилляционного (CsI, допированный таллием)

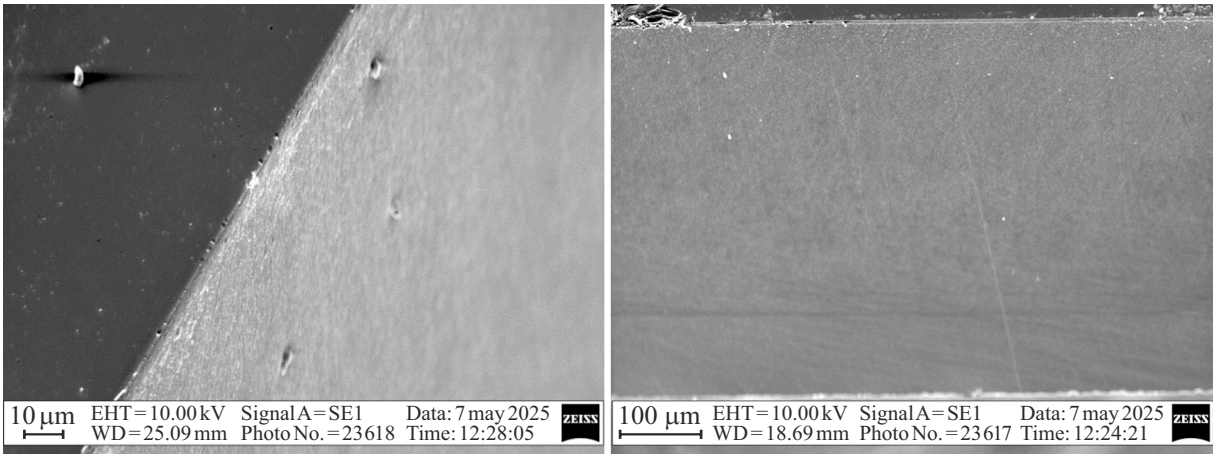

Рис. 8. Изображения торца ножа, полученные на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO 10. Более темная область соответствует лицевой стороне пластины, перпендикулярной пучку.

детектора с фотоэлектронным умножителем. Для уменьшения фонового сигнала перед детектором устанавливалась круглая диафрагма диаметром 1 mm. В результате мы получаем кривую спада интенсивности от положения ножа, который постепенно перекрывает пучок в направлении, перпендикулярном пучку. Эту кривую мы дифференцируем и аппроксимируем гауссианой. Тем самым ширина на полувысоте является размером пятна фокусировки от зеркала (рис. 7, *b*).

В результате измерения было получено пятно с минимальным размером $5.2\,\mu$m. Для проверки полученного результата был построен цифровой двойник измерительного стенда в программе трассировки лучей в пакете SHADOWOUI [32] на базе OASYS [33]. В цифровой модели задавались такие параметры, как размер и форма источника, его расходимость, форма зеркал и карта ошибок формы поверхности коллимирующей системы. Результаты расчета и эксперимента показаны на рис. 7, *b*. Результатом расчета является минимальный размер пятна фокусировки, равный $4.5\,\mu$m в случае идеальных зеркал фокусирующей КБ системы при экспериментально полученном $5.2\,\mu$m. Это уширение пятна фокусировки характеризует ошибки зеркал исследуемой фокусирующей КБ системы. В рамках модели гауссового распределения пятна фокусировки это уширение составляет $2.6\,\mu$m. Таким образом, в канале синхротрона размер пятна фокусировки составит около $2.6\,\mu$m.

Заключение

В рамках работы была разработана и изготовлена фокусирующая система КБ. При изготовлении системы был также разработан ряд измерительных и технологических методик, а также комплекс экспериментального оборудования. Все это в совокупности позволило решить задачу на высоком уровне.

Разработанные методы ионно-пучковой обработки обеспечивают эффективную шероховатость в диапазоне пространственных частот $0.025-65\,\mu\text{m}^{-1}$ порядка 2 Å и точность формы по параметру СКО 0.5–1 nm. Для измерения формы поверхности подложек, в том числе асферических и крупногабаритных, разработаны специальные методики, алгоритмы и программное обеспечение. Для финальной аттестации фокусирующих свойств зеркал был использован рентгенооптический стенд, который позволяет измерять отклонения волновых фронтов с чувствительностью менее $0.5\,\mu$rad.

Изучен фокусирующий свойства системы КБ, изготовленной для синхротрона СКИФ. На лабораторном стенде размер пятна фокусировки составил $5.2\,\mu$m при ожидаемом для идеальной КБ системы $4.5\,\mu$m. Наблюдаемое экспериментальное уширение пятна фокусировки объясняется ошибками зеркал разработанной КБ системы. Моделирование в программе SHADOWOUI указывает, что наблюдаемое в лаборатории уширение соответствует уширению пятная фокусировки на синхротроне до $2.6\,\mu$m. Если посмотреть на карты ошибок формы зеркал фокусирующей системы (рис. 4), то главным фактором является даже не столько RMS-ошибок, который составил 2–3 nm по всей поверхности зеркал и менее 2 nm в рабочей области, сколько высокочастотный характер этих ошибок. При характерной амплитуде этих ошибок 2–3 nm угловые ошибки составляют несколько микрорадиан.

В настоящее время природа этих ошибок установлена, в технологический процесс внесены соответствующие коррективы и начато производство нового комплекта зеркал, которые обеспечат субмикронное пространственное разрешение.

Разработанные методы и уже скорректированный по результатам исследований первого комплекта фокусирующих зеркал технологический процесс стали штатными при изготовлении рентгеновских зеркал в виде плоскости, эллиптических цилиндров, параболических

цилиндров и тороидов с (суб-) нанометровой точностью формы.

Финансирование работы

Работа была выполнена в рамках государственного задания ИФМ РАН FFUF-2024-0022, РНФ 21-72-30029-П.

Благодарности

В части тестирования фокусирующих свойств системы и изображения ножа результаты получены при помощи оборудования ЦКП ИФМ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] V.A. Chernov, I.A. Bataev, Ya.V. Rakshun, Yu.V. Khomyakov, M.V. Gorbachev, A.E. Trebushinin, N.I. Chkhalo, D.A. Krasnorutskiy, V.S. Naumkin, A.N. Sklyarov, N.A. Mezentsev, A.M. Korsunsky, I.P. Dolbnya. Rev. Sci. Instrum., **94**, 013305 (2023). DOI: 10.1063/5.0103481
[2] P. Kirkpatric, A.V. Baez. J. Opt. Soc. Am., **38** (9), 766 (1948). DOI: 10.1364/JOSA.38.000766
[3] В.В. Лидер. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **8**, 3 (2019). DOI: 10.1134/S0207352819080092
[4] E. Nazaretski, D.S. Coburn, W. Xu, J. Ma, H. Xu, R. Smith, X. Huang, Y. Yang, L. Huang, M. Idir, A. Kissa, Y.S. Chua. J. Synchrotron Radiat., **29** (5), 1284 (2022). DOI: 10.1107/S1600577522007056
[5] O. Hignette, G. Rostaing, P. Cloetens, A. Rommeveaux, W. Ludwig, A.K. Freund. Proc. SPIE, **4499**, 105 (2001). DOI: 10.1117/12.450227
[6] Ch.-Y. Huang, Ch.-Sh. Ku, Sh.-N. Hsiao, L. Lee, Sh.-J. Chiu, H.-Y. Lee, Ch.-Ch. Chen, Sh.-Ch. Chung, D.J. Wang. Energy, **1** (10), 100 (2013). DOI: 10.13140/RG.2.2.29095.55209
[7] A. Takeuchi, Y. Suzuki, H. Takano, Y. Terada. Rev. Sci. Instrum., **76** (9), 093708 (2005). DOI: 10.1063/1.2052595
[8] Я.В. Зубавичус. *Технологическая инфраструктура Сибирского кольцевого источника фотонов „СКИФ“. Т. 1. Экспериментальные станции первой очереди и Лабораторный комплекс* (Ин-т катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Новосибирск, 2022)
[9] 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. Ращенко, В.А. Чернов, Н.И. Чхало, М.Р. Шарафутдинов. Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов, **336** (5), 229 (2025). DOI: 10.18799/24131830/2025/5/5122
[10] S.V. Rashchenko, M.A. Skamarokha, G.N. Baranov, Ya.V. Zubavichus, I.V. Rakshun. AIP Conf. Proc., **2299**, 060001 (2020). DOI: 10.1063/5.0030346
[11] Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.coremorrow.com/en/proshow-11-225-1.html
[12] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.newport.com/p/HXP200S-MECA
[13] D.H. Bilderback, A.K. Freund, G.S. Knapp, D.M. Mills. J. Synchrotron Radiat., **8**, 22 (2001).
[14] H. Thiess, H. Lasser, F. Siewert. Nucl. Instrum. Meth. A., **616**, 157 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2009.10.077
[15] A. Erko, M. Idir, Th. Krist, A.G. Michette (editors). *Modern Developments in X-ray and Neutron Optics* (Springer, 2008)
[16] N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. Precision Engineering, **48**, 338 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
[17] M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, M.V. Zorina, A.K. Chernyshev, N.N. Salashchenko, I.I. Kuznetsov. Appl. Opt., **61** (10), 2825 (2022). DOI: 10.1364/AO.455096
[18] N. Kumar, V.A. Volodin, S.V. Goryainov, A.K. Chernyshev, A.T. Kozakov, A.A. Scrjabin, N.I. Chkhalo, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, M.V. Zorina. Nucl. Instrum. Meth. B, **534**, 97 (2023). DOI: 10.1016/j.nimb.2022.11.016
[19] F. Polack, M. Thomasset, S. Brochet, A. Rommeveaux. Nucl. Instrum. Meth. A, **616**, 207 (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2009.10.166
[20] J. Nicolas, M.L. Ng, P. Pedreira, J. Campos, D. Cocco. Opt. Express, **26** (21), 27212 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.027212
[21] J. Nicolas, P. Pedreira, I. Šics, C. Ramírez, J. Campos. Adv. Metrol. X-Ray and EUV Optics VI, **9962**, 996203 (2016).
[22] E.V. Petrakov, E.I. Glushkov, A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo. J. Surf. Invest. X-Ray Synchrotron Neutron Techn. Suppl., **18**, S58 (2024). DOI: 10.1134/S1027451024701878
[23] 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. Invest., **18** (S1), S38 (2025). DOI: 10.1134/S1027451024701842
[24] Н.И. Чхало, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, М.Н. Торопов. УФН, **190** (1), 74 (2020). DOI: 10.3367/UFNr.2019.05.038601
[25] A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov, N. Salashchenko, M. Toropov. Appl. Opt., **61** (33), 9879 (2022). DOI: 10.1364/AO.472504
[26] A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov. Precision Eng., **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006
[27] N.I. Chkhalo, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina. Rev. Sci. Instrum., **86**, 016102 (2015). DOI: 10.1063/1.4905336
[28] A.E. Pestov, A.K. Chernyshev, M.S. Mikhailenko, M.V. Zorina, E.I. Glushkov, E.V. Petrakov, I.V. Malyshev, N.I. Chkhalo, D.G. Reunov. Appl. Opt., **64** (4), 837 (2015). DOI: 10.1364/AO.542363
[29] M. Svechnikov. J. Appl. Cryst., **57**, 848 (2024). DOI: 10.1107/S1600576724002231
[30] Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.gpixel.com/en/pro_details_1194.html
[31] H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, H. Hara, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, K. Yamauchi. Rev. Sci. Instrum., **76** (6), 063708 (2005). DOI: 10.1063/1.1922827
[32] L. Rebuffi, M. Sanchez del Rio. J. Synchrotron Rad., **23**, 1357 (2016). DOI: 10.1107/S1600577516013837
[33] L. Rebuffi, M. Sanchez del Rio. Proc. SPIE, **10388**, 103880S (2017). DOI: 10.1117/12.2274263