

15 Проект двухзеркального монохроматора на диапазон энергий фотонов 8–36 keV для синхротрона „СКИФ“

© Н.И. Чхало,¹ С.А. Гарахин,¹ И.В. Малышев,¹ В.Н. Полковников,¹ М.Н. Торопов,¹ Н.Н. Салащенко,¹ Б.А. Уласевич,¹ Я.В. Ракшун,² В.А. Чернов,² И.П. Долбня,³ С.В. Ращенко⁴

¹ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

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

³ Diamond Light Source Ltd, Diamond House, Harwell Science and Innovation Campus, OX11 0DE,
Didcot, Oxfordshire, United Kingdom

⁴ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: chkhalo@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2022 г.
В окончательной редакции 14 апреля 2022 г.
Принято к публикации 14 апреля 2022 г.

Сообщено о проекте монохроматора рентгеновского излучения для синхротрона „СКИФ“ на основе двух плоских зеркал с многослойными отражающими покрытиями. Концепция монохроматора основана на отсутствии в вакууме прецизионных механических систем и вводов движения в вакуум, что существенно уменьшает загрязнение поверхности зеркал и повышает точность сканирования. Помимо этого, вся конструкция устройства таким способом значительно упрощается, что в свою очередь, ведет к существенному сокращению общей стоимости и трудозатрат на изготовление. Скользящий угол падения излучения на зеркала в процессе сканирования по энергии фотонов изменялся в пределах 0.5–1.3°. Длина зеркал составила 120 mm, предполагаемый размер входного пучка 1 × 1 mm². Широкий рабочий диапазон энергий, 8–36 keV, достигнут за счет использования трех стрипов-зеркал с покрытиями различного химического состава, а именно Mo/W₄C, W/W₄C и Cr/Be. Приведены рентгенооптическая схема, ожидаемые коэффициенты отражения и спектральная селективность монохроматора, результаты расчета термоиндуцированных деформаций поверхности и соответствующие угловые ошибки (slope errors) первого зеркала.

Ключевые слова: синхротронное излучение, многослойное зеркало, монохроматор, поверхность.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52794.100-22

Введение

Благодаря умеренной спектральной селективности ($\Delta\lambda/\lambda \sim 1\%$), высоким (порядка 60–90%) коэффициентам отражения, большим геометрическим размерам и возможности создания градиентных отражающих покрытий многослойные рентгеновские зеркала (МРЗ) широко используются в современной научной, технической и технологической аппаратуре. По сравнению с кристаллами монохроматоры на основе МРЗ увеличивают интенсивность излучения вплоть до двух порядков, что делает их крайне перспективными для рентгеновской микроскопии, литографии и целого ряда других приложений, где требуется „собрать“ как можно больше фотонов [1–3].

В условиях синхротронов 3-го и 4-го поколений, а также рентгеновских лазеров на свободных электронах, в ряде случаев МРЗ позволяют перейти от криогенного к водяному охлаждению рабочих отражающих элементов соответствующих монохроматоров, так как из-за меньших углов падения плотность мощности падающего излучения на поверхности МРЗ более чем на порядок меньше, чем на кристалле [4,5].

На разрабатываемом в настоящее время в ИЯФ СО РАН источнике синхротронного излучения (СИ) 4-го поколения „СКИФ“ [6] также планируется использование МРЗ для различных приложений. В частности, на экспериментальной Станции 1–1 „Микрофокус“ для монохроматизации СИ предполагается использование двухзеркального монохроматора с перестраиваемой рентгеновской длиной волны.

В настоящей работе приводится описание предложенного авторами двухзеркального монохроматора, принципов его устройства и основных технических характеристик.

1. Требования к монохроматору и принципы устройства

Согласно научной программе и техническому заданию, двухзеркальный монохроматор должен удовлетворять следующим требованиям:

- рабочий диапазон энергий фотонов 8–36 keV, разделенный на поддиапазоны:
- „мягкий“ — энергия 8–14 keV;

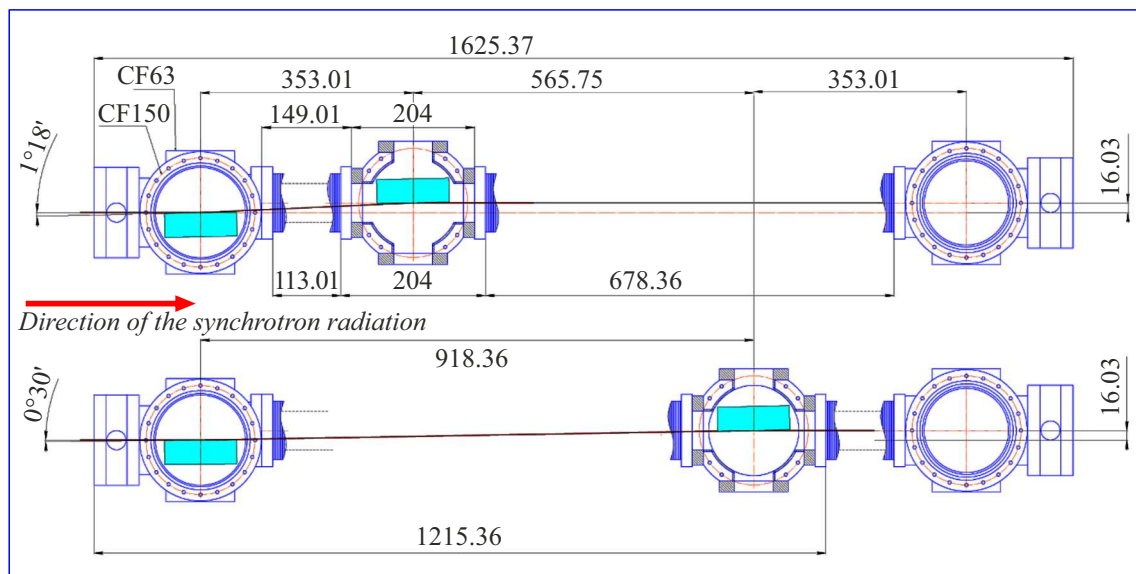


Рис. 1. Конструкционная схема с указанием основных геометрических характеристик монохроматора для двух предельных значений энергии: минимальной (вверху) 8 keV, и максимальной (внизу) 36 keV.

- „основной“ — 14–36 keV;
- „жесткий, повышенного разрешения“ — 30–36 keV;
- спектральная селективность в „мягком“ и „основном“ диапазонах $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.7\text{--}1\%$, и $\Delta\lambda/\lambda < 0.5\%$ в „жестком, повышенного разрешения“;
- коэффициенты отражения МРЗ $> 60\%$;
- захватываемый размер синхротронного пучка при всех энергиях $\leq 1 \times 1 \text{ mm}^2$;
- диапазон рабочих углов МРЗ $0.5\text{--}1.3^\circ$;
- поглощенная первым зеркалом мощность рентгеновского излучения 20 W;
- допустимые термоиндуцированные искажения волнового фронта после первого зеркала $< 1.7 \mu\text{rad}$;
- охлаждение зеркал: водяное;
- смещение осей падающего и отраженного вторым зеркалом пучков (офсет — разница между положениями пучков в пространстве) $\geq 10 \text{ mm}$.

О выборе значения максимального рабочего угла в 1.3° будет сказано ниже. Из геометрических размеров пучка и рабочих углов не трудно определить, что длина зеркал должна быть не менее 115 mm. В проекте длина зеркал выбрана равной 120 mm.

Конструкционная схема монохроматора с основными геометрическими характеристиками для офсета в 16 mm приведена на рис. 1. Верхняя часть рисунка соответствует настройке на минимальную, а нижняя на максимальную энергию фотонов.

В основе монохроматора лежит следующая основополагающая концепция. Для обеспечения неизменного положения и направления монохроматического пучка на выходе монохроматора для любой энергии используются два идентичных по параметрам МРЗ. Так как в процессе

сканирования по энергии отраженный от первого зеркала луч в соответствии с условием Брэгга изменяет направление, то второе зеркало, помимо подстройки брэгговского угла, совершает линейное перемещение с тем, чтобы отраженный от первого зеркала луч точно попал в центр второго зеркала. В этом случае вышедший из монохроматора луч сохранит как направление движения, параллельно входящему в монохроматор пучку, так и постоянную сдвигку в пространстве (офсет), практически независимо от рабочей энергии.

Традиционно, монохроматоры такого типа, например [7], конструируются и строятся таким образом, что все высокоточные приводы зеркал (наклоны, повороты, линейные перемещения) располагаются в единой вакуумной камере. Такая конструкция монохроматора имеет ряд недостатков. Во-первых, в случае широкого рабочего диапазона длин волн, например, в нашем случае, вакуумная камера будет иметь большие (более 1.5 m) размеры. Это приводит к двум негативным последствиям. Во-первых, для обеспечения сверхвысокого на уровне 10^{-9} Torr вакуума требуются весьма мощные средства откачки. Во-вторых, атмосферное давление приводит к сильным деформациям камеры, что может отрицательно сказаться на точности юстировки. В-третьих, наличие большого числа приводов в вакууме отрицательно сказывается на загрязнении зеркал продуктами разложения гидроуглеродов, которые обязательно присутствуют в изоляции проводов и смазке. В-четвертых, для минимизации загрязнений приходится использовать дорогостоящие и, как правило, менее надежные электромеханические компоненты.

Новизной нашей концепции является использование вакуумных камер сравнительно малых размеров и вынос всех критически значимых прецизионных подвижек из

вакуума наружу в атмосферу. В приборе используются три небольшие, диаметром около 150 mm, вакуумные камеры. Первая (слева по ходу падающего луча) и последняя камеры остаются неподвижными в направлении оптической оси прибора, а вторая перемещается в широких пределах. В первой и второй камерах установлены зеркала. Первая камера установлена на системе подвижек, обеспечивающих для юстировки и сканирования по энергии следующие типы движений:

— поперечное (перпендикулярно направлению распространения рентгеновского пучка) в пределах ± 10 mm с шагом 5 μ m;

— вертикальное перемещение в пределах ± 10 mm с шагом 10 μ m;

— поворот зеркала для установки брэгговского угла в пределах $\pm 2^\circ$ с шагом 0.0002 $^\circ$.

Вертикальное перемещение обусловлено не только прецизионной настройкой монохроматора на синхротронный пучок, но и позволяет оперативно менять тип многослойного покрытия при наличии нескольких стрипов с МРЗ на одной подложке.

Система подвижек второй камеры, помимо отмеченных выше, включает в себя гониометр для контроля наклона плоскости второго зеркала по отношению к первому и длинную линейную подвижку для сканирования по энергии. Гониометр обеспечивает наклон в диапазоне $\pm 2^\circ$ с шагом 0.001 $^\circ$. Продольная, линейная подвижка обеспечивает перемещение в диапазоне ≈ 1 m с шагом 0.05 mm.

Для обеспечения требуемой кинематики прибора центральная камера соединена с неподвижными камерами с помощью сварного силфона, обеспечивающего диапазон перемещений около 4крат по отношению к сжатому состоянию. Прибор будет смонтирован на толстой размерно-стабильной гранитной плите. Предварительная откачка будет производиться сухими форвакуумным и турбомолекулярным насосами с возможностью последующего их отсоединения от прибора. Сверхвысокий вакуум будет поддерживаться магниторазрядными насосами производительностью 25 l/s, установленными на первой и последней вакуумных камерах.

2. Тепловые расчеты

С учетом высоких интенсивностей пучков СИ одним, среди прочих, немаловажным обстоятельством/фактором, ограничивающим максимальный рабочий угол многослойных зеркал, является поглощенная мощность на единицу площади зеркала, приводящая к термоиндуцированной деформации поверхности и соответственно отраженного волнового фронта. Для решения этой задачи были проведены тепловые расчеты. Зеркало представляло собой кремниевую подложку длиной 120 mm, высотой 15 mm и толщиной 50 mm. Охлаждение сверху и снизу первого зеркала осуществлялось водой с температурой 25 $^\circ$ C через медные радиаторы,

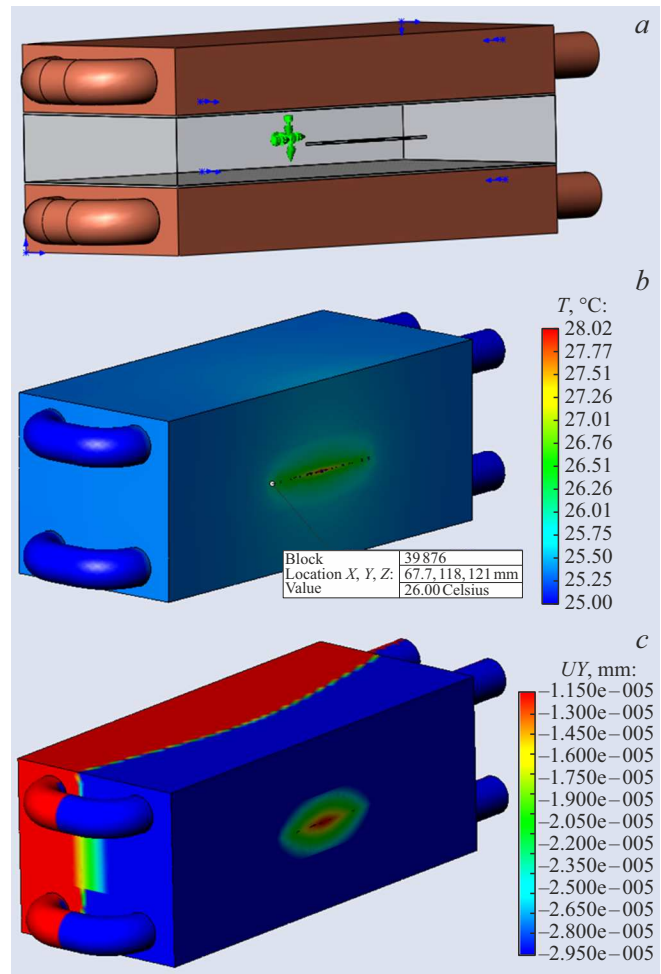


Рис. 2. Система охлаждения первого зеркала (a), температурное поле (b) и деформация поверхности (c) при скользящем угле падения излучения на зеркало 1.5 $^\circ$, размере пучка 1 \times 1 mm 2 и мощности СИ 20 W.

прижатые к верхней и нижней граням, через индиевые прокладки толщиной 0.2 mm. Рис. 2, a поясняет схему охлаждения. На рис. 2, b, c приведены температурное поле и деформация поверхности при скользящем угле падения излучения на зеркало 1.5 $^\circ$, размере пучка 1 \times 1 mm 2 и мощности СИ 20 W. На рис. 3 приведены профили температуры, деформации и угловой ошибки вдоль зеркала в центральной части следа пучка. Для наглядности локальные угловые ошибки, выраженные в μ rad, на рис. 3 увеличены в 10 раз. То есть величине 1 μ rad на графике соответствует ошибка в 1.5 μ rad. Так как для угла падения 1.5 $^\circ$ след пучка на зеркале составляет ± 19 mm, то максимальная угловая ошибка составляет около 1.6 μ rad. Это сравнимо с требованиями технического задания на прибор. Поэтому для обеспечения запаса при проектировании прибора максимальный угол был взят 1.3 $^\circ$. Минимальный угол определялся из соображений захвата всего пучка СИ и минимизации размера зеркал, и составил 0.5 $^\circ$.

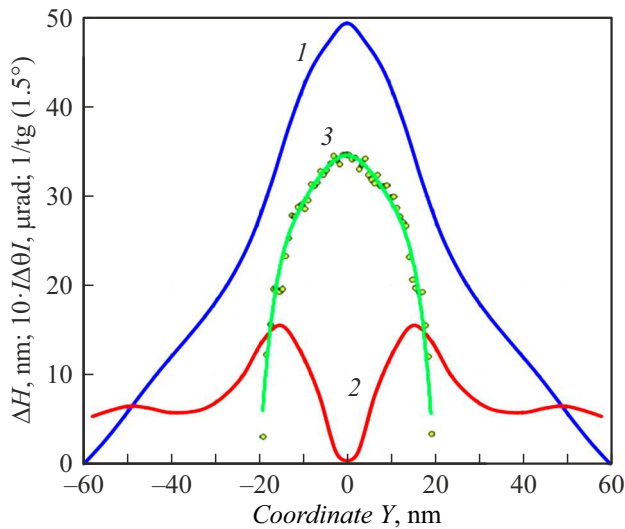


Рис. 3. Профили деформаций (1), термоиндуцированных локальных ошибок (2) и температурного поля (3), формы поверхности зеркала, соответствующие условиям, приведенным на рис. 2.

3. Выбор типов многослойных рентгеновских зеркал

Основными критериями при выборе состава и конструкции многослойных рентгеновских зеркал выступают коэффициенты отражения и спектральное разрешение в рабочем диапазоне. Для каждого диапазона длин волн с учетом рабочих углов были выбраны оптимальные материалы. Так, для диапазона энергий фотонов 8–14 keV была выбрана пара материалов Mo/W4C со следующими характеристиками: число периодов $N = 120$, период $d = 3.71$ nm, доля молибдена в периоде $\beta = 0.25$, межслоевая шероховатость $\sigma = 0.4$ nm. Для перекрытия всего диапазона по энергиям скользящий угол падения СИ на зеркало изменя-

ется в пределах $\theta = 0.65$ – 1.23° . На рис. 4 приведены спектральные зависимости ожидаемых коэффициентов отражения и селективности на выходе монохроматора с учетом идентичности зеркал и двукратного отражения. Как видно из рисунка, эффективность отражения монохроматора превышает 70% во всем рабочем диапазоне длин волн, однако спектральная селективность примерно в 1.5 раза превышает требуемую. Для решения этой проблемы на стадии изготовления зеркал планируется достичь требуемой спектральной полосы пропускания в 1% за счет оптимизации параметра β . В случае если при уменьшении β будет наблюдаться сильное падение коэффициента отражения, то в качестве альтернативы будет изучена пара V/W4C для которой, наоборот, характерна относительно высокая, на уровне 0.8%, спектральная селективность. При этом коэффициент отражения V/W4C при двукратном отражении в рабочем диапазоне изменяется в пределах 45–80%.

Для „основного“ диапазона 14–36 keV, как и в большинстве работ, см. например [8], выбрана структура W/W4C с параметрами: $N = 200$, $d = 2.0$ nm, $\beta = 0.33$, $\sigma = 0.3$ nm. По данным [9] при использовании ВЧ магнетронного разряда на W-мишени длина переходной области может быть уменьшена до $\sigma = 0.24$ nm. Таким образом, приведенный на рис. 5 результат расчета коэффициента отражения можно считать нижней оценкой. Из рисунка также видно, что эта пара материалов удовлетворяет требованию к спектральной полосе пропускания на уровне 1%.

Для так называемого „жесткого, повышенного разрешения“ поддиапазона, диапазон энергий фотонов 30–36 keV, требуется спектральное разрешение лучше 0.5%. При выборе наиболее эффективной пары материалов для этого диапазона анализировались МРЗ, состоящие из относительно легких материалов. Среди наиболее перспективных оказались системы Cr/Be, Cr/W4C. В литературе для короткопериодных МРЗ мы нашли данные по длине переходных областей только

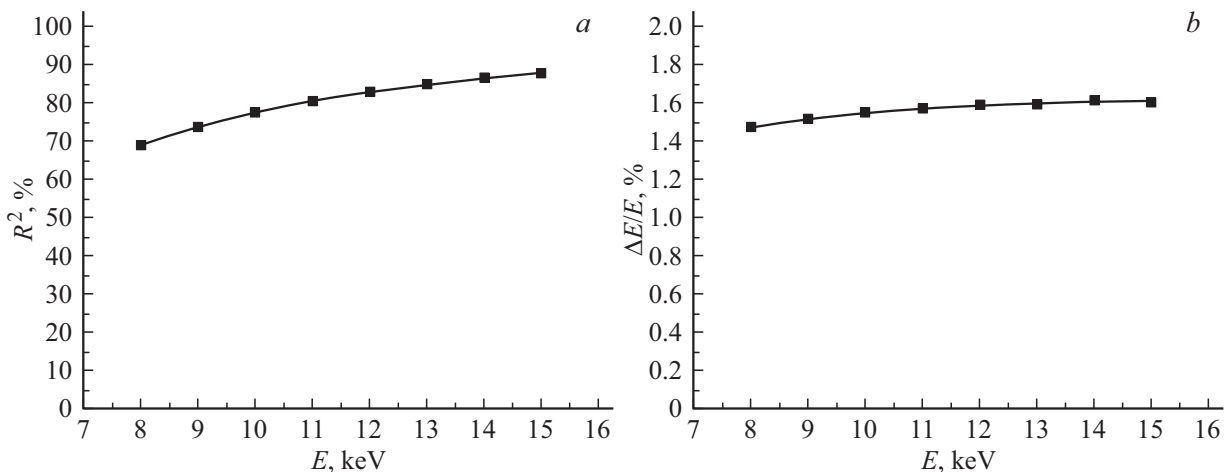


Рис. 4. Спектральные зависимости ожидаемых коэффициентов отражения (R^2) и селективности ($\Delta E/E$) на выходе монохроматора с учетом идентичности зеркал и двукратного отражения. МРЗ Mo/W4C: $N = 120$, $d = 3.71$ nm, $\beta = 0.25$, $\sigma = 0.4$ nm.

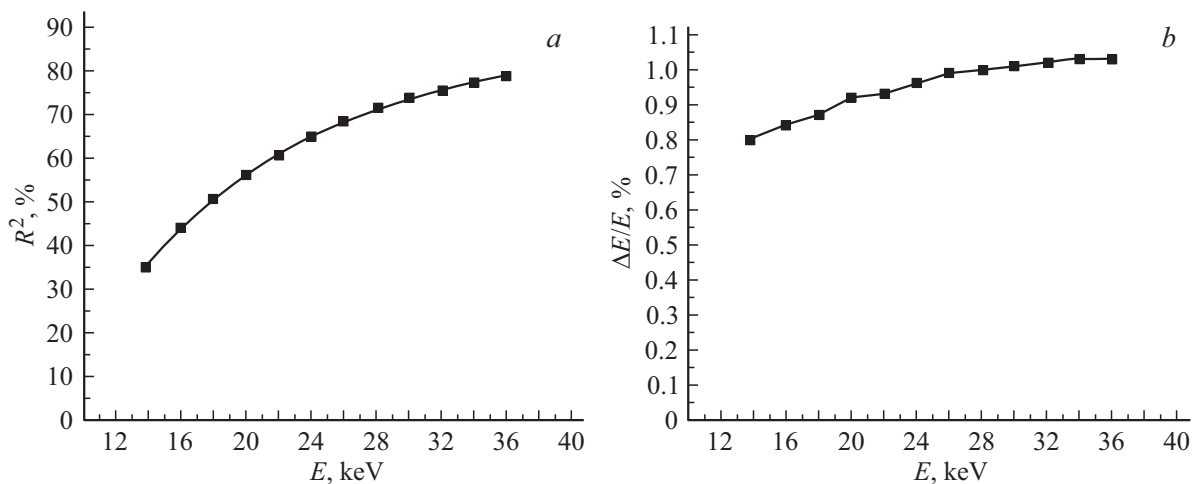


Рис. 5. Спектральные зависимости ожидаемых коэффициентов отражения и селективности на выходе монохроматора с учетом идентичности зеркал и двукратного отражения. МРЗ W/B4C: $N = 200$, $d = 2.0$ nm, $\beta = 0.33$, $\sigma = 0.3$ nm.

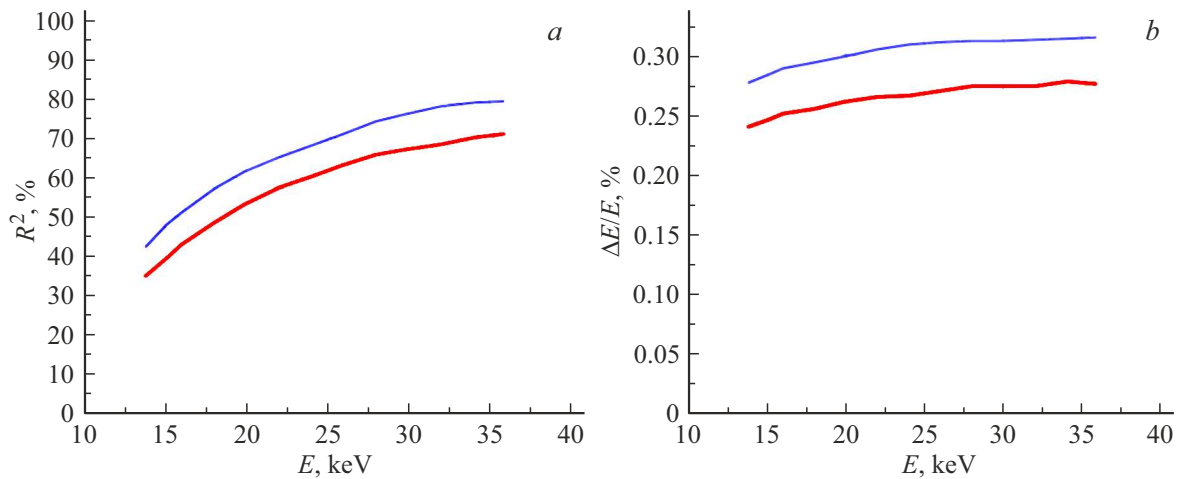


Рис. 6. Спектральные зависимости ожидаемых коэффициентов отражения и селективности на выходе монохроматора с учетом идентичности зеркал и двукратного отражения. МРЗ Cr/Ve (синие тонкие линии (в онлайн версии)) и Cr/B4C (красные толстые (в онлайн версии)): $N = 500$, $d = 2.0$ nm, $\beta = 0.5$, $\sigma = 0.43$ nm.

для Cr/Ve [10] и которая составила $\sigma = 0.43$ nm. В работе [1] обсуждалась пара Cr/B4C, однако данных о длине переходных областей не приводились. Поэтому расчеты для обеих систем были сделаны для следующих параметров: $N = 500$, $d = 2.0$ nm, $\beta = 0.5$, $\sigma = 0.43$ nm. На рис. 6 приведены результаты расчета. Синие тонкие линии (в онлайн версии) соответствуют Cr/Ve и толстые красные (в онлайн версии) — Cr/B4C.

Из рис. 6 можно сделать следующие основные выводы. Во-первых, обе структуры удовлетворяют требованиям технического задания и по коэффициенту отражения, и по спектральной селективности. Спектральное разрешение составило около 0.3%. Во-вторых, режим „повышенного разрешения“ наблюдается не только в области 30–36 keV, но и в более широком (14–36 keV) диапазоне. В-третьих, при величине межслойной переходной области 0.43 nm, которая была найдена в Cr/Ve МРЗ,

они выглядят более предпочтительными по сравнению с Cr/B4C. Однако окончательный выбор в пользу той или иной пары материалов будет сделан по результатам структурных и рефлектометрических измерений реальных короткопериодных Cr/B4C МРЗ.

Заключение

Разработан проект монохроматора с перестраиваемой рабочей энергией фотонов на диапазон 8–36 keV. В качестве диспергирующих элементов выступают два плоских многослойных зеркала с идентичными отражательными характеристиками. Монохроматор обеспечивает требуемый уровень качества отраженного фронта, угловая ошибка менее $1 \mu\text{rad}$ на выходе при падающей на первое зеркало мощности до 20 W. Весь диапазон рабочих энергий фотонов разбит на три поддиапазона. В каждом

поддиапазоне работает своя пара многослойных зеркал. Перестройка на поддиапазон осуществляется вертикальным смещением обоих зеркал. Для этого на каждом зеркале формируется три попарно идентичных стрипа. Для первых двух поддиапазонов выбраны материалы: Mo/W4C и W/W4C. Для третьего, высоко разрешающего поддиапазона выбраны и проанализированы две перспективные пары материалов Cr/Be и Cr/W4C. Окончательный выбор не сделан, так как в литературе отсутствуют данные по переходным слоям в короткопериодных Cr/W4C МРЗ. В ближайшем будущем планируются структурные и рефлектометрические исследования этой пары материалов. При равных величинах переходной области более предпочтительной выглядит система Cr/Be.

В работе описаны принципиальное устройство и конструктивные особенности прибора. Предполагается, что такой прибор будет реализован и установлен на синхротроне „СКИФ“ в рамках первой очереди разработки экспериментальных станций.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по гранту № 075-15-2021-1362.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.J. Leake, G.A. Chahine, H. Djazouli, T. Zhou, C. Richter, J. Hilhorst, L. Petit, M.-I. Richard, C. Morawe, R. Barrett, L. Zhang, R.A. Homs-Regojo, V. Favre-Nicolin, P. Boesecke, T.U. Schüllli. *J. Synchrotron Rad.*, **26**, 571–584 (2019). <https://doi.org/10.1107/S160057751900078X>
- [2] B. Wu, A. Kumar. *Appl. Phys. Rev.*, **1**, 011104 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4863412>
- [3] I.V. Malyshev, N.I. Chkhalo. *Ultramicroscopy*, **202**, 76–86 (2019). DOI: 10.1016/j.ultramic.2019.04.001
- [4] U.H. Wagner, Z.D. Pešić, A. De Fanis, C. Rau. *J. Phys. Conf. Ser.*, **425**, 182006 (2013). DOI: 10.1088/1742-6596/425/18/182006
- [5] M.N. Boone, F. Van Assche, S. Vanheule, S. Cipiccia, H. Wang, L. Vinczec, L. Van Hoorebeke. *J. Synchrotron Rad.*, **27**, 110–118 (2020). <https://doi.org/10.1107/S1600577519015212>
- [6] S.V. Rashchenko, M.A. Skamarokha, G.N. Baranov, Y.V. Zubavichus, I.V. Rakshun. *AIP Conf. Proc.*, **2299**, 060001 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0030346>
- [7] P. Brumund, J. Reyes-Herrera, C. Morawe, T. Dufrane, H. Isern, T. Brochard, M. Sanchez del Rio, C. Detlefs. *J. Synchrotron Rad.*, **28**, 1423–1436 (2021). DOI: 10.1107/S160057752100758X
- [8] A. Rack, Ch. Morawe, L. Mancini, D. Dreossi, D.Y. Parkinson, A.A. MacDowell, F. Siewert, T. Rack, T. Holz, M. Krämer, R. Dietsch. *Proc. SPIE*, **9207**, 92070V (2014). DOI: 10.1117/12.2060801
- [9] M.S. Bibishkin, N.I. Chkhalo, A.A. Fraerman, A.E. Pestov, K.A. Prokhorov, N.N. Salashchenko, Yu.A. Vainer. *Nucl. Instrum. Meth. A*, **543**, 333–339 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2005.01.251
- [10] R. Pleshkov, N. Chkhalo, V. Polkovnikov, M. Svechnikov, M. Zorina. *J. Appl. Crystallogr.*, **54**(6), 1747 (2021). <https://doi.org/10.1107/S160057672101027X>