

УДК 535-34

## ПРОСТАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА С АЛМАЗНЫМ КРИСТАЛЛОМ-МОНОХРОМАТОРОМ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОМИКРОСКОПИИ

© 2025 г. Ю. В. Хомяков<sup>a, b, \*</sup>, М. В. Горбачев<sup>c</sup>, В. А. Чернов<sup>a</sup>, Ф. А. Дарьин<sup>b</sup>,  
Я. В. Ракшун<sup>a, d</sup>

<sup>a</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>b</sup>Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”, Кольцово, 630559, Россия

<sup>c</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 630073 Россия

<sup>d</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: [yu.v.khomyakov@yandex.ru](mailto:yu.v.khomyakov@yandex.ru)

Поступила в редакцию 12.12.2024 г.

После доработки 10.01.2025 г.

Принята к публикации 10.01.2025 г.

Предложена концепция ондуляторной станции на источнике синхротронного излучения для сочетания методов конфокальной рентгеновской флуоресцентной микроскопии (Confocal  $\mu$ XRF) и микроскопии с поточечным анализом тонкой структуры спектров поглощения рентгеновского излучения вблизи края ( $\mu$ XANES). Оптическая схема станции основана на применении компактного алмазного прорезного монохроматора (channel-cut) вблизи фокуса пучка ондуляторного излучения. Проведены оценка тепловой нагрузки на алмазный монохроматор и моделирование стационарного распределения температур и термоиндуцированных деформаций кристалла в условиях его водяного охлаждения. Показано, что в режиме с максимальной тепловой нагрузкой на монохроматор разброс углов деформированной поверхности первой ламели кристалла существенно меньше разброса углов сходящегося пучка ондуляторного излучения, его углового размера на образце и ширины кривой качания кристалла. Оценено энергетическое разрешение алмазного монохроматора C(111) с учетом сходимости пучка излучения и разницы температур ламелей кристалла. Результаты расчетов свидетельствуют о возможности применения алмазного монохроматора вблизи фокуса мощного ондуляторного пучка на источнике синхротронного излучения четвертого поколения и, следовательно, о реализуемости предложенной схемы.

**Ключевые слова:** синхротронное излучение, ондуляторное излучение, спектроскопия, микроскопия, тонкая структура спектров поглощения излучения вблизи края, рентгеновский флуоресцентный анализ, микрозонд, алмазный монохроматор, прорезной монохроматор, тепловые нагрузки, термоиндуцированные деформации.

**DOI:** 10.7868/S3034573125090014

### ВВЕДЕНИЕ

Постоянное увеличение яркости источников синхротронного излучения вызывает необходимость развития специализированной рентгеновской оптики, отвечающей повышенным тепломеханическим требованиям. Ввод в эксплуатацию источников синхротронного излучения четвертого поколения (MAX IV, Sirius, ESRF

EBS, APS-U, ЦКП “СКИФ”) и рентгеновских лазеров на свободных электронах (EuXFEL, SLAC) приводит к уменьшению размеров источника, сужению диаграммы направленности излучения и, как следствие, к значительному увеличению локальных тепловых нагрузок на оптические элементы. Особо высокие требования предъявлены к стабильности ключевых рент-

генооптических элементов — монохроматоров. Для каждой рабочей длины волны излучения термоиндуцированные угловые деформации кристаллов монохроматоров должны быть задано меньше ширины кривой качания (а еще лучше — меньше углового размера источника). Кроме того, их системы охлаждения не должны являться источником вибраций, как это бывает, например, в криогенных системах при кипении жидкого азота или в системах водяного охлаждения при турбулентном потоке.

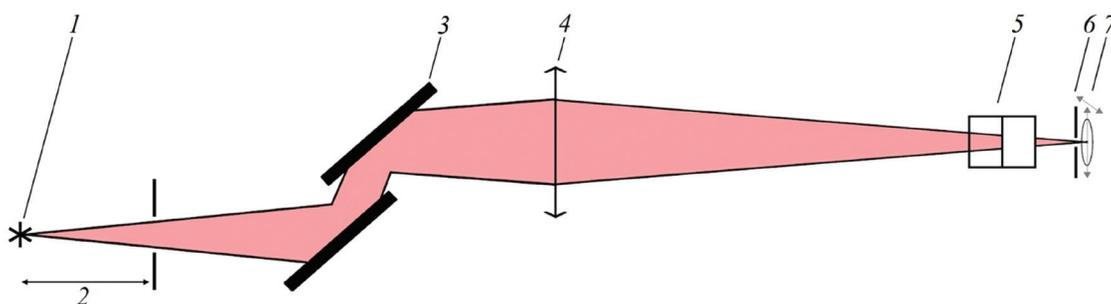
Развитие технологии синтеза при высоких температуре и давлении (High Pressure High Temperature) позволило выращивать крупные монокристаллы алмаза с относительно малым числом дефектов и тем самым сделало возможным изготовление алмазных рентгенооптических элементов, в том числе монохроматоров. Переход от традиционных кремниевых кристаллов-монохроматоров к алмазным существенно упрощает термостабилизацию в условиях экстремальных тепловых нагрузок благодаря рекордно высокой теплопроводности и низкому коэффициенту теплового расширения алмаза. Размеры алмазных кристаллов гораздо меньше кремниевых, однако свойства алмаза позволяют применять такие монохроматоры вблизи фокуса ондуляторного пучка, что делает доступной простую и эффективную оптическую схему для использования в спектроскопии и микроскопии.

### ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Предлагаемая оптическая схема приведена на рис. 1. Генерируемое ондулятором излучение проходит через первичные коллиматоры и фильтры во фронтенде станции и попадает на двухзеркальный многослойный монохроматор с фиксированным выходом. Ширина полосы

пропускания двухзеркального многослойного монохроматора  $\Delta E/E \sim 10^{-2}$  ( $E$  — энергия излучения) обеспечивает выделение “рабочей” гармоники ондулятора. Наличие поперечного сдвига (“офсета”) выходного пучка синхротронного излучения позволяет отделить жесткие гамма-кванты, возникающие из-за рассеяния электронов на остаточном газе в накопителе (bremsstrahlung), и поглотить их в ловушке тормозного излучения. Посередине между центром ондулятора и образцом расположена составная преломляющая линза, фокусирующая рентгеновские лучи, с плечами  $2f-2f$  ( $f$  — фокусное расстояние). Такое расположение составной преломляющей линзы позволяет минимизировать количество линз в ее составе. Окончательное формирование размеров и формы рентгеновского пучка на образце обеспечено прецизионными щелями непосредственно перед ним. Перечисленных элементов достаточно для создания базовой конфигурации оптической системы для конфокальной флуоресцентной микроскопии (Confocal  $\mu$ XRF) [1], позволяющей получить распределение концентраций исследуемых элементов в образце с пространственным разрешением  $\sim 10$  мкм при использовании энергодисперсионного детектора с линзой Кумахова.

Высокое энергетическое разрешение схемы  $\Delta E/E \sim 10^{-5}-10^{-4}$  обеспечивается вводом прорезного (channel-cut) алмазного кристалла-монохроматора перед образцом. В этом случае становится доступно применение микроскопии с поточечным анализом тонкой структуры спектров поглощения вблизи края (Pre-edge + XANES) [2, 3]. Для монохроматизации излучения с энергией в широком диапазоне (5–24 кэВ) могут быть использованы два алмазных кристалла-монохроматора с плоскостями C(111) и C(220), где C(111) будет использован в условиях наиболее высоких теп-



**Рис. 1.** Оптическая схема для спектромикроскопии с алмазным кристаллом-монохроматором на ондуляторной станции источника синхротронного излучения (в скобках указано расстояние до источника излучения): 1 — источник; 2 — фронтенд станции (0–25 м); 3 — двухзеркальный многослойный монохроматор (34 м); 4 — составная преломляющая линза  $cf = 17.9$  м (35.8 м); 5 — прорезной алмазный монохроматор (70.6 м); 6 — прецизионные щели (71.6 м); 7 — образец (71.6 м).

ловых нагрузок при энергии излучения до 8 кэВ. Малый поперечный размер сходящегося пучка ~100 мкм на алмазном монохроматоре позволяет использовать кристаллы размером в несколько миллиметров, а близость монохроматора к образцу ослабляет требования к плоскостности рабочих ламелей кристалла: углы изгиба ламелей не должны превышать угловой размер пятна излучения на образце. Кроме того, малое расстояние между отражающими плоскостями приводит к малости изменения офсета при перестройке по энергии излучения (подробнее ниже), что позволяет обеспечить фиксированный выход пучка синхротронного излучения щелями после кристалла-монохроматора. Современные методы синтеза при высоких температуре и давлении дают возможность выращивать кристаллы алмаза с необходимой бездефектной областью размером ~1 мм [4].

В экспериментах с использованием  $\mu$ XANES при сканировании по энергии внутри спектральной ширины одной гармоники ондуляторного излучения при неподвижном двухзеркальном многослойном монохроматоре достаточно лишь изменять угол Брэгга, соответствующий плоскостям кристалла-монохроматора, поскольку образец остается в пределах глубины фокуса составной линзы (подробнее ниже). Единственность подвижного оптического элемента существенно упрощает проведение экспериментов с высоким временным разрешением (quick-XANES). Для переключения между рабочими гармониками ондулятора в составную преломляющую линзу, находящуюся в пучке излучения, вводят или выводят отдельные линзы. Тонкую настройку положения фокуса осуществляют вводом/выводом слабофокусирующих линз. В качестве альтернативы может быть выбрана ахроматическая оптическая схема, в которой вместо составной преломляющей линзы использованы фокусирующие зеркала полного внешнего отражения. Следует, однако, отметить, что такая схема существенно дороже.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки тепловых нагрузок на алмазный кристалл-монохроматор взяты параметры накопительного кольца строящегося источника синхротронного излучения четвертого поколения ЦКП “СКИФ” [5] и сверхпроводящего ондулятора станции “Микрофокус” [6]: энергия электронов 3 ГэВ; ток пучка 400 мА; натуральный эмиттанс 75 пм·рад; горизонтальная и вертикальная бета-функции в центре прямолинейного промежутка источника 15.6 и 2.4 м соответственно;

ондулятор состоит из 128 магнитных периодов длиной 15.6 мм; максимальное значение магнитной индукции 1.25 Тл.

Сверхпроводящий ондулятор позволяет сдвигать энергии гармоник излучения посредством изменения тока в катушках. Энергия фотонов  $E_{ph}$  очень яркой, более  $10^{21}$  фотонов/с/мм<sup>2</sup>/мрад<sup>2</sup> (0.1% BW), третьей гармоники излучения, создаваемой ондулятором, может быть установлена в диапазоне от 6.2 до 10.3 кэВ. Работа с использованием этой гармоники приводит к наибольшей тепловой нагрузке на оптические элементы станции. Указанный диапазон включает  $K$ -края поглощения элементов Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn и  $L$ -края лантаноидов, что покрывает большое число задач геологии, решаемых с помощью XANES. По этой причине дальнейшие расчеты вели для третьей гармоники ондулятора, настроенной на  $K$ -край поглощения Mn ( $E_{ph} = 6539$  эВ, индукция магнитного поля  $B = 1.19$  Тл).

При моделировании полагали, что во фронтенде станции осуществляется первичная коллимация и фильтрация ондуляторного излучения: угловую апертуру пучка задавали равной 70 мкрад  $\times$  70 мкрад и считали, что на пути излучения стоит графитовый фильтр толщиной 0.5 мм для подавления первой гармоники излучения.

Для работы двухзеркального многослойного монохроматора в вышеуказанном энергетическом диапазоне выбрано многослойное покрытие Mo/B<sub>4</sub>C (образец RS-193 в [7]). Длины зеркал полагали достаточными для геометрического захвата всей рабочей гармоники. Тепловые нагрузки и термоиндуцированные деформации зеркал не рассматривали, поскольку цель моделирования состояла в проверке работоспособности алмазного кристалла-монохроматора в случае максимальной тепловой нагрузки на него. В действительности при чрезмерных тепловых нагрузках на двухзеркальный многослойный монохроматор в пучок ондуляторного излучения следует вводить аттенюаторы. Кроме того, искривление зеркал в условиях работы с мощными рентгеновскими пучками может быть уменьшено при использовании подложек с пропилами (smart-cut) [8, 9] или подложек из перспективного композита алмаз–карбид кремния [10] вместо традиционно монокристаллического кремния.

Составную преломляющую линзу при моделировании полагали состоящей из  $N = 7$  двоякогнутых бериллиевых параболических линз с радиусом кривизны при вершине  $R = 2$  мм, фокусное расстояние составной линзы  $f = 17.9$  м. Макси-

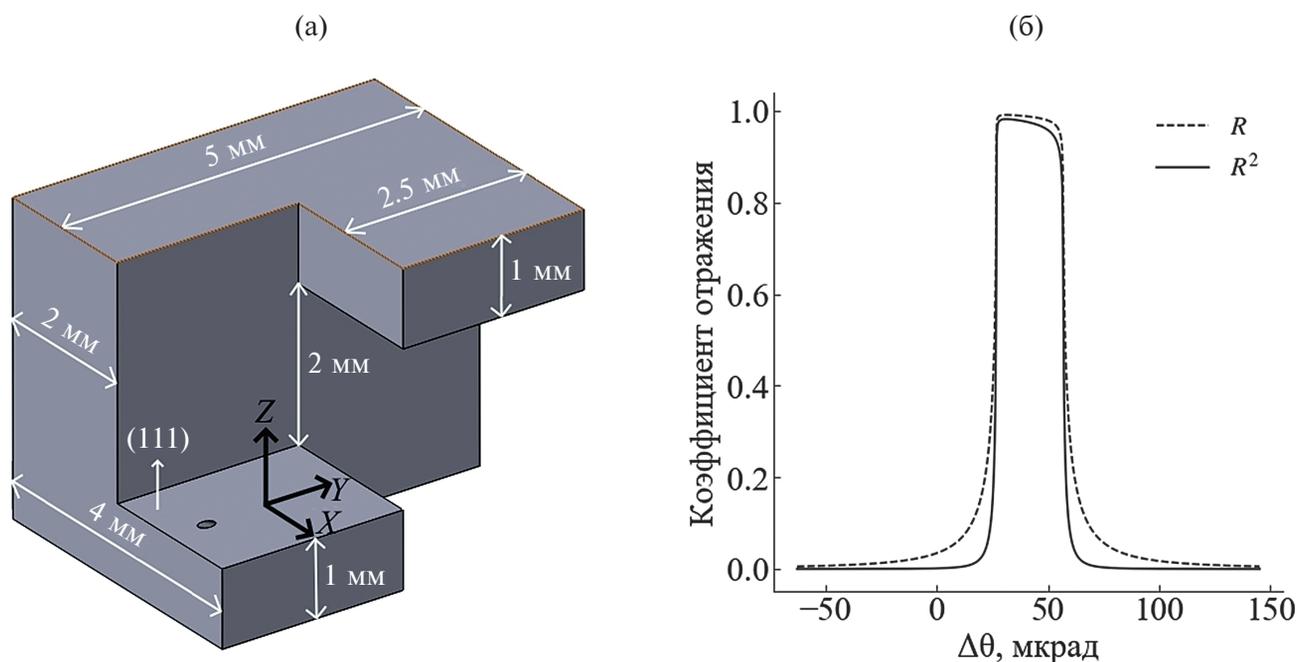
мальная толщина линз (на краях геометрической апертуры) задавали равной 1 мм, минимальная (между вершинами параболоидов) — 0.03 мм. Геометрическая апертура составной преломляющей линзы  $A = 2.786$  мм, эффективная апертура  $A_{\text{эфф}} = 2.064$  мм. Глубину фокуса  $t$  можно выразить через полную ширину на полувысоте (FWHM) размера фокального пятна  $\omega$  и числовую апертуру линзы  $NA$ :  $t = \omega/NA$ . Зная, что  $\omega = 20$  мкм, и полагая  $NA = A_{\text{эфф}}/(4f) \approx 2.9 \times 10^{-5}$  (схема работает без увеличения, расстояние от линзы до изображения равно  $2f$ ), получаем оценку для глубины фокуса  $t \approx 0.69$  м.

Теперь оценим продольный сдвиг плоскости изображения при изменении длины волны излучения  $\lambda$  в ходе эксперимента, выполненного методом  $\mu$ XANES. Считая, что фазосдвигающая часть показателя преломления бериллия  $\delta \propto \lambda^2$  и дифференцируя по  $\lambda$  выражение фокусного расстояния  $f = R/(2N\delta)$ , получим  $df/f = -2d\lambda/\lambda$ . Запишем формулу тонкой линзы:  $1/p + 1/q = 1/f$ , где  $p = 2f$  — расстояние между источником и линзой,  $q = 2f$  — между линзой и изображением. При уменьшении длины волны на  $d\lambda = 0.5 \times 10^{-2}\lambda$  увеличиваются фокусное расстояние и расстояние до изображения:  $f_1 = 1.01 f$ ,  $q_1 \approx 2.04f$ . Величина сдвига плоскости изображения  $q_1 - q \approx 0.04f \approx 0.72$  м, что сопоставимо с глубиной фокуса  $t$ . Отметим, что итоговые размеры пятна

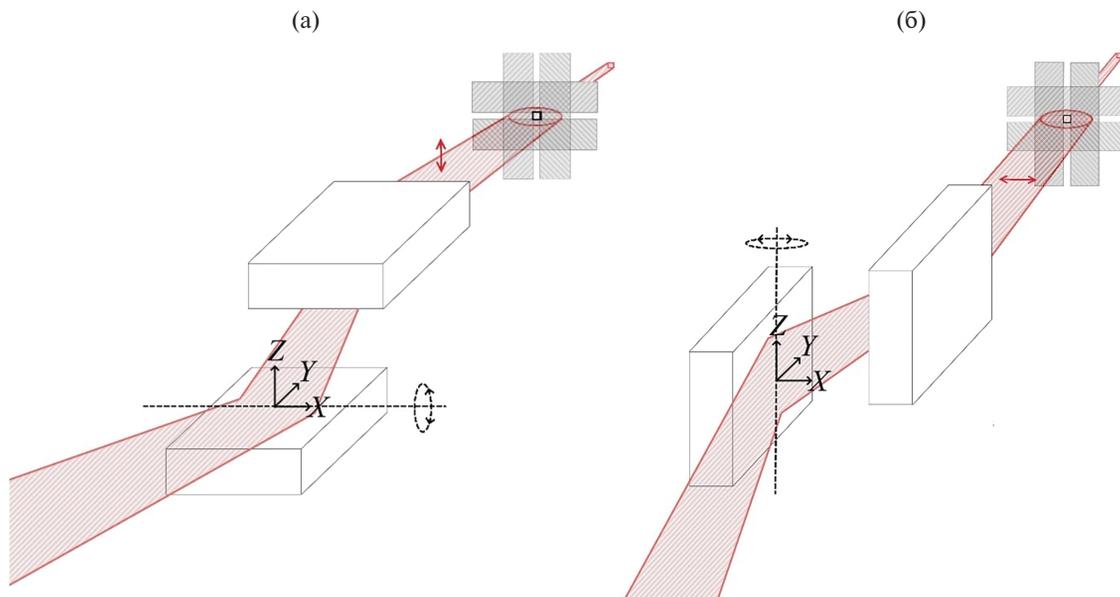
излучения на образце задают прецизионными щелями перед ним, поэтому расфокусировка пучка излучения приводит лишь к уменьшению интенсивности зонда.

В моделировании использовали прорезной монохроматор из идеального монокристалла алмаза C(111), его геометрия представлена на рис. 2а. Пример кривой качания приведен на рис. 2б.

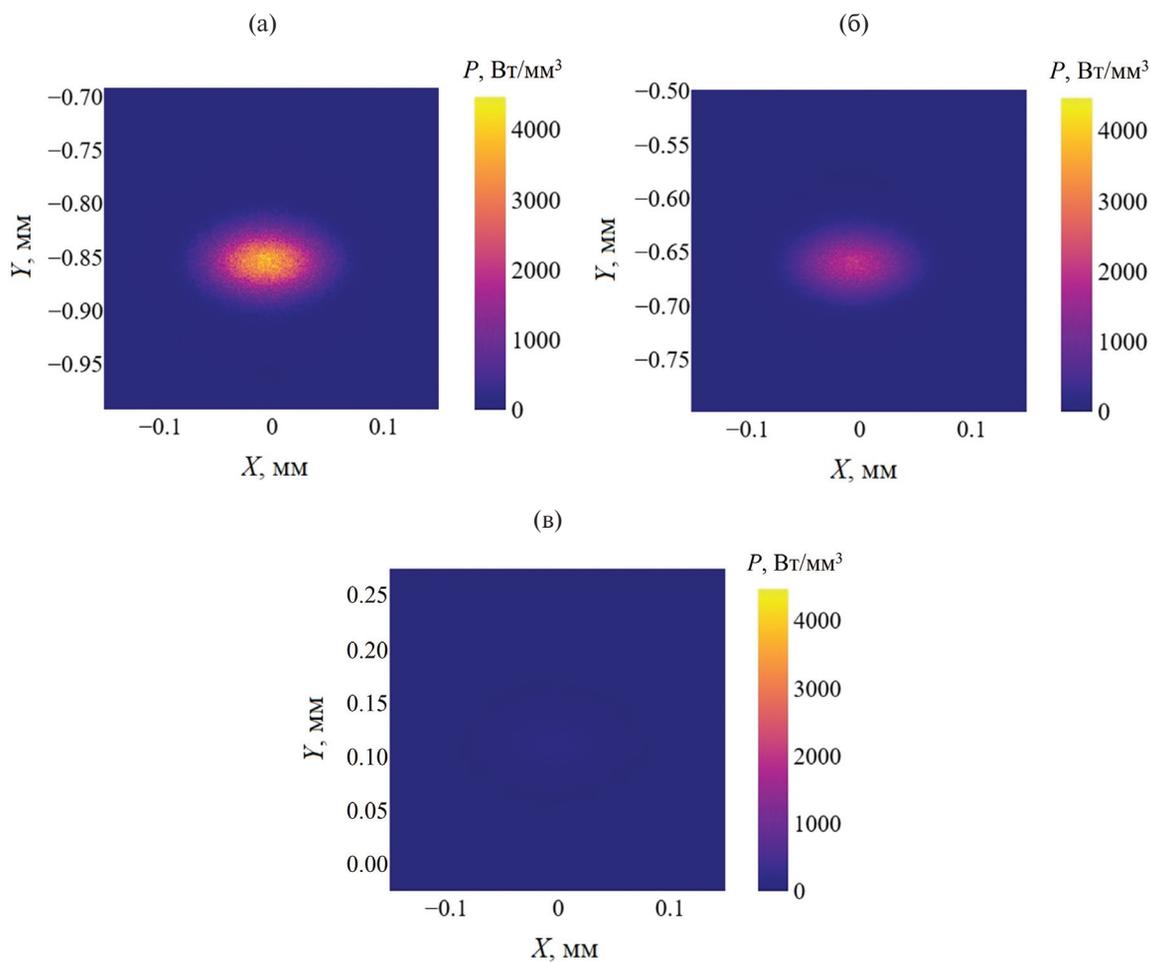
Оценим изменение оффсета пучка синхротронного излучения при изменении энергии. Из закона Вульфа–Брэгга  $2d\sin\theta = \lambda$  дифференцированием по  $\theta$  получим  $d\lambda/\lambda = d\theta/\tan\theta$ , где  $d$  — межплоскостное расстояние;  $\theta$  — угол Брэгга;  $\lambda$  — длина волны излучения. Величина оффсета  $\Delta_z = 2h\cos\theta$ , где  $h = 2$  мм — расстояние между ламелями монохроматора. Изменение  $\Delta_z$  при перестройке монохроматора на  $d\lambda$ :  $d\Delta_z = -2h\sin\theta d\theta = 2h\sin\theta \tan\theta d\lambda/\lambda$ . При сканировании по энергии излучения в пределах спектральной ширины гармоники ондулятора  $d\lambda/\lambda \approx 10^{-2}$ . Тогда соответствующее изменение оффсета  $d\Delta_z \approx 10$  мкм, что меньше FWHM вертикального размера фокального пятна ондуляторного излучения  $\omega = 20$  мкм. Таким образом, прецизионные щели перед образцом позволяют задать размеры пучка-зонда  $\sim 10$  мкм, сохраняя его положение при регистрации XANES спектров (рис. 3а).



**Рис. 2.** Геометрия алмазного монохроматора (а) и кривые качания для двух отражений C(111) в случае идеально-го монокристалла алмаза (б).  $R$  — коэффициент отражения; поляризация типа  $s$ ;  $E_0 = 6539$  эВ;  $\theta_0 = 27.41^\circ$ ; FWHM  $\Delta E = 0.38$  эВ; FWHM  $\Delta\theta = 30$  мкрад. База данных X-ray DB [11].



**Рис. 3.** Схема организации фиксированного выхода пучка ондуляторного излучения при горизонтальной (а) и вертикальной (б) оси вращения алмазного монохроматора. Красными стрелками обозначены направления сдвига пятна ондуляторного излучения на прецизионных щелях при изменении энергии излучения.



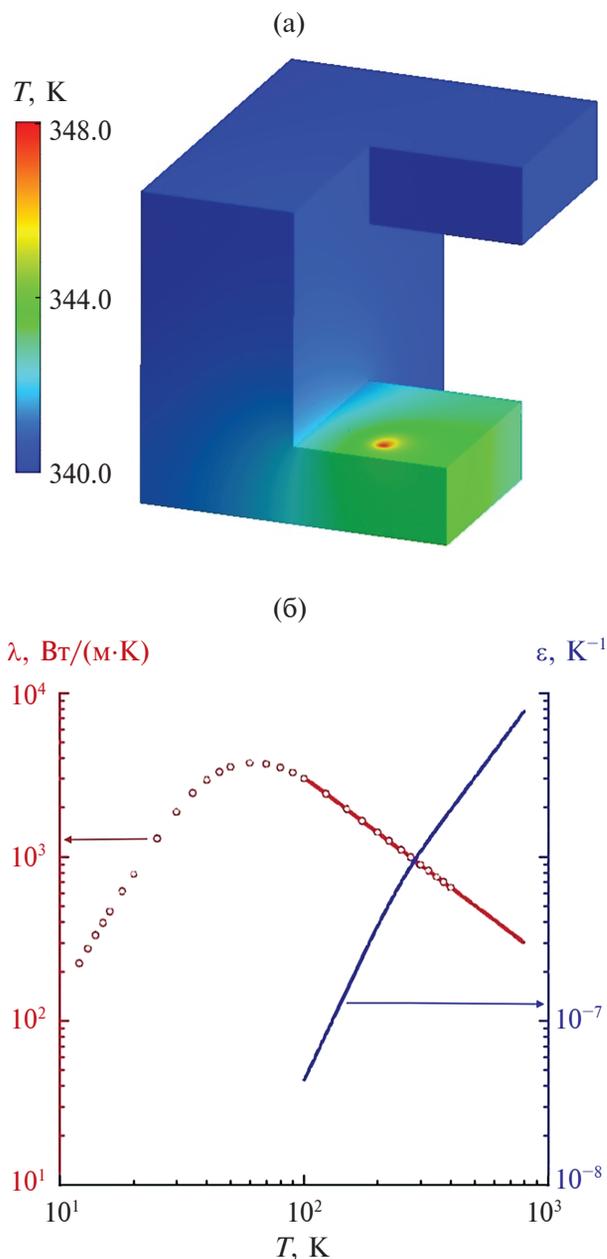
**Рис. 4.** Расчетная объемная плотность мощности поглощаемого ондуляторного излучения  $P$  на глубине 0 (а); 0.1 (б) и 0.5 мм (в) в первой ламели.

Отдельного рассмотрения заслуживает случай вертикального расположения оси вращения монохроматора. Большой размер источника по горизонтали (~80 мкм) позволяет изменять энергию излучения в большем диапазоне при фиксированном выходе (рис. 3б). Кроме того, использование монохроматора С(111) в энергетическом диапазоне до 8 кэВ позволяет уменьшить  $h$  до 1 мм и тем самым уменьшить изменение офсета до  $d\Delta_z \approx 5$  мкм.

Оценка тепловых нагрузок на кристалл проведена с помощью трассировки лучей в программе XRT [12]. В расчете учитывали изменение объемной плотности мощности поглощенного ондуляторного излучения, обусловленное аттенуацией рентгеновских лучей при прохождении сквозь кристалл. Сечения объемной плотности мощности ондуляторного излучения, поглощаемого первой ламелью монохроматора, на разных глубинах алмаза приведены на рис. 4, пиковое значение плотности превышает 3500 Вт/мм<sup>3</sup>. Полная мощность ондуляторного излучения, поглощаемого первой ламелью, составляет 2.75 Вт.

В предположении, что в системе использовано водяное охлаждение кристалла-монохроматора, выполнен расчет стационарного распределения температуры кристалла алмаза с помощью модуля Fluent программы ANSYS 2020R2 [13] (рис. 5а). Внутри первой ламели кристалла задавали объемный источник теплоты с распределением плотности мощности, полученным на предыдущем шаге моделирования. На боковой поверхности YZ ( $X = -3$  мм, рис. 2а) задавали условие конвективного охлаждения при постоянном по поверхности значении коэффициента теплоотдачи на уровне 3000 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и температуре 295.15 К. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности монокристаллического алмаза показана на рис. 5б.

Для полученного распределения температуры выполнен расчет термоиндуцированных деформаций поверхностей алмазного монохроматора с помощью модуля StaticStructural ANSYS 2020R2. Соответствующие профили для поверхности первой ламели приведены на рис. 6. В расчете учитывали зависимость коэффициента теплового расширения алмаза от температуры (рис. 5б), а также анизотропность свойств кристалла. Значения наклона поверхности упруго деформированной ламели лежат в диапазоне от -2.5 до 4 мкрад. Таким образом, разброс углов наклона этой поверхности (6.5 мкрад) существенно меньше FWHM разброса углов сходящегося пучка 40 мкрад, ширины кривой качания 30 мкрад и уг-



**Рис. 5.** Результаты расчета стационарного распределения температуры кристалла-монохроматора (а), теплопроводность [14] и коэффициент теплового расширения [15] монокристаллического алмаза как функции температуры (б). Сплошной линией отмечена аппроксимация зависимостью  $\lambda = 5.213 \times 10^5 T^{-1.116}$ .

лового размера зонда на образце 10 мкм/1 м = 10 мкрад.

Нагрев кристалла вызывает изменение параметра решетки  $a(T)$  и межплоскостного расстояния  $d(T)$ :  $a(T) = a_0 \exp\left[\int_{T_0}^T \varepsilon(t) dt\right]$ , где  $a_0 = 3.56712 \times 10^{-10}$  м при  $T_0 = 298$  К [16],  $\varepsilon$  — коэффициент теплового расширения алмаза;

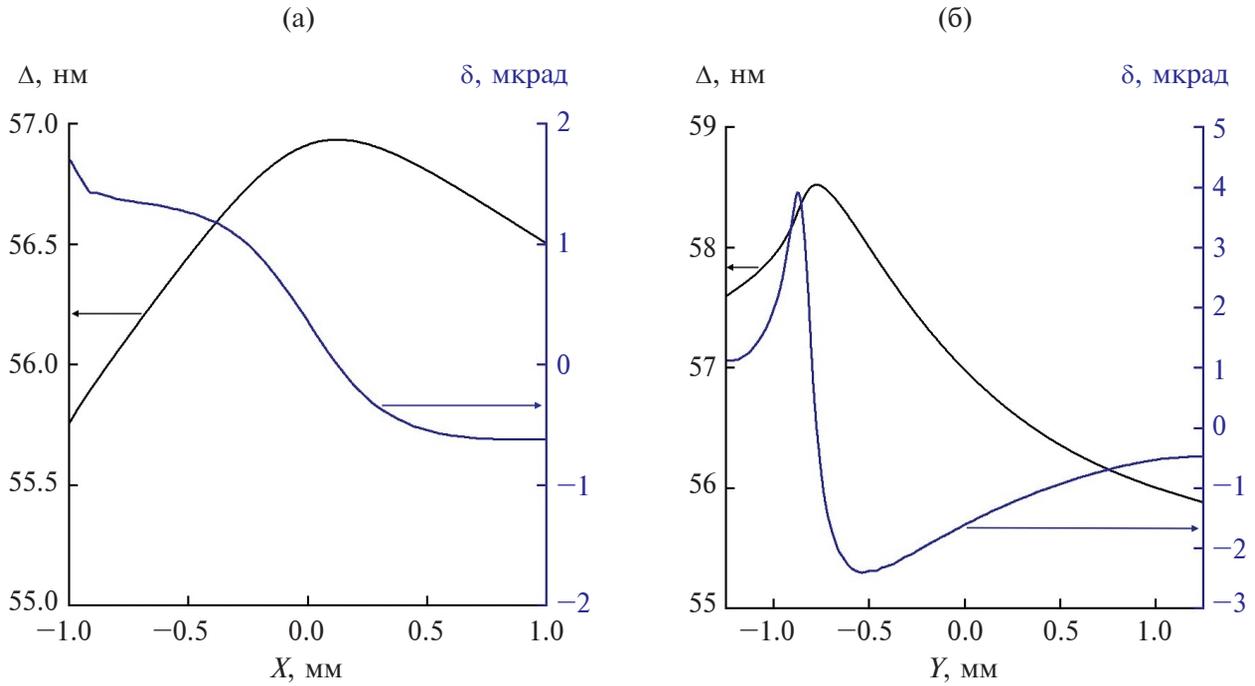


Рис. 6. Результат расчета термоиндуцированных деформаций рабочей плоскости XY (Z = 0) первой ламели кристалла-монохроматора: профиль деформаций при Y = 0 (а) и при X = 0 (б).

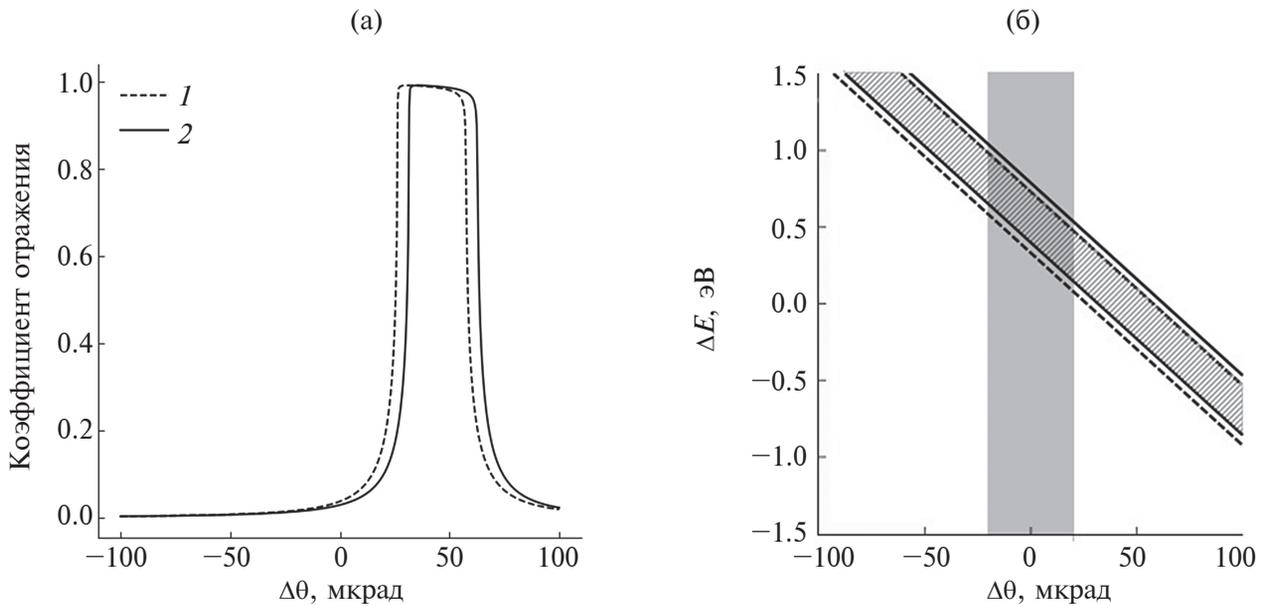


Рис. 7. Расстройка ламелей алмазного монохроматора из-за разницы температур: сдвиг кривых качания для первой (1) и второй (2) ламелей (а); диаграмма ДюМонда (б). Вертикальная серая полоса на диаграмме соответствует значению FWHM разброса углов сходящегося пучка ондуляторного излучения, косая заштрихованная полоса является пересечением акцептансов двух ламелей и составляет акцептанс монохроматора. Расчет выполнен с помощью XRT.

$d(T) = \frac{a(T)}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$ , где  $h, k, l$  — индексы Миллера. Для первой ламели монохроматора  $a(348 \text{ К}) \approx 3.567331 \times 10^{-10} \text{ м}$ , для второй —  $a(340 \text{ К}) \approx$

$3.567295 \times 10^{-10} \text{ м}$ , соответствующая расстройка кривых качания двух ламелей показана на рис. 7а. Влияние сходимости пучка ондуляторного излучения и разницы температур ламелей кристалла

на спектральную ширину излучения на образце представлено на диаграмме ДюМонда, рис. 76. Итоговое энергетическое разрешение, получаемое при использовании монохроматора C(111) при  $E_{ph} = 6.5$  кэВ, составляет 0.82 эВ.

Поверхность первой ламели кристалла-монохроматора вследствие нагрева становится выпуклой, что приводит к слабой расфокусировке пучка ондуляторного излучения. Поскольку форма и размер зонда на образце определяются прецизионными щелями, расфокусировка вызывает лишь уменьшение интенсивности излучения на образце. Более того, расфокусирующее действие деформированного алмазного монохроматора нивелируется малым расстоянием между ним и образцом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена простая оптическая схема на основе прорезного алмазного монохроматора для рентгеновской спектромикроскопии на ондуляторных станциях источников синхротронного четвертого поколения. В указанной схеме фокусировка ондуляторного излучения осуществляется набором преломляющих линз, первичная монохроматизация выполняется двухзеркальным многослойным монохроматором, а финальная — алмазным монохроматором размером в несколько миллиметров, вводимым вблизи фокуса пучка. Сдвиг плоскости изображения при сильной перестройке энергии возбуждающего излучения (например, при переключении между гармониками ондуляторного излучения для исследования краев поглощения разных элементов) компенсируется вводом/выводом отдельных линз набора. При сканировании по энергии в узком спектральном диапазоне  $\Delta E/E \approx 0.5 \times 10^{-2}$  (в пределах одной гармоники в ходе эксперимента методом  $\mu$ XANES) сдвиг плоскости изображения сопоставим с глубиной фокуса. Окончательное формирование размеров и формы рентгеновского пучка обеспечивается прецизионными щелями непосредственно перед образцом, поэтому расфокусировка приводит лишь к контролируемому уменьшению интенсивности возбуждающего излучения.

Для алмазного кристалла-монохроматора в наиболее теплонагруженном случае проведены расчеты тепловых нагрузок, стационарного распределения температур при водяном охлаждении и термоиндуцированных деформаций. Оценено энергетическое разрешение монохроматора с учетом сходимости пучка излучения и разницы температур ламелей кристалла. Результаты расчетов

свидетельствуют о возможности применения алмазного монохроматора вблизи фокуса мощного ондуляторного пучка и, следовательно, о реализуемости предложенной схемы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для ЦКП “СКИФ” ИК СО РАН (FWUR-2024-0042).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность С.А. Терентьеву и С.Н. Полякову (ТИСНУМ) за предоставленные сведения об алмазных кристаллах-монохроматорах.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дарьин Ф.А.* Развитие метода конфокальной рентгеновской микроскопии для исследования микровключений в различные геологические матрицы: Дисс. канд. техн. наук. Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2022. 141 с.
2. *Lühl L., Hesse B., Mantouvalou I., Wilke M., Mahlkow S., Aloupi-Siotis E., Kanngiesser B.* // *Anal. Chem.* 2014. V. 86. № 14. P. 6924. <https://www.doi.org/10.1021/ac500990k>
3. *Darin F., Sorokoletov D., Rakshun I., Darin A., Volodin A., Kriventsov V.* // *AIP Conf. Proc.* 2020. V. 2299. № 1. P. 080005. <https://www.doi.org/10.1063/5.0030495>
4. *Tasca K.R., Petrov I., Deiter C., Martyushov S., Polyakov S., Rodriguez-Fernandez A., Shayduk R., Sinn H., Terentyev S., Vannoni M., Zholudev S., Samoylova L.* // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022. V. 2380. № 1. P. 012053. <https://www.doi.org/10.1088/1742-6596/2380/1/012053>
5. *Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E.* // *Phys. Rev. Accel. Beams* 2021. V. 24. № 12. P. 120704. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704>
6. *Shkaruba V.A., Bragin A.V., Volkov A.A., Erokhin A.I., Zorin A.V., Kazantsev F.P., Kanonik P.V., Mezentsev N.A., Safronov A.N., Sedov A.A., Tarasenko O.A., Khrushchev S.V., Tsukanov V.M.* // *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2023. V. 20. № 4. P. 904. <https://www.doi.org/10.1134/S1547477123040623>

7. Шапошников Р.А., Гарахин С.А., Дуров К.В., Полковников В.Н., Чхало Н.И. // ЖТФ 2023. № 93. С. 931.  
<https://www.doi.org/10.21883/JTF.2023.07.55748>
8. Glushkov E.I., Malyshev I.V., Petrakov E.V., Chkhalo N.I., Khomyakov Yu.V., Rakshun Ya.V., Chernov V.A., Dolbnya I.P. // J. Surf. Investig. 2023. V. 17. №. Suppl. 1. P. S233.  
<https://www.doi.org/10.1134/S1027451023070133>
9. Chernov V.A., Bataev I.A., Rakshun Ya.V., Khomyakov Yu.V., Gorbachev M.V., Trebushinin A.E., Chkhalo N.I., Krasnorutskiy D.A., Naumkin V.S., Sklyarov A.N., Mezentsev N.A., Korsunsky A.M., Dolbnya I.P. // Rev. Sci. Instrum. 2023. V. 94. № 1.  
<https://www.doi.org/10.1063/5.0103481>
10. Pestov A.E., Lopatin A.Y., Volkov P.V., Zorina M.V., Lukyanov A.Y., Malyshev I.V., Mikhailenko M.S., Toropov M.N., Semikov D.A., Chernyshev A.K., Chkhalo N.I., Yunin P.A., Glushkov E.I., Gordeev S.K., Korchagina S.B. // J. Synchrotron Radiat. 2024. V. 31. № 5.  
<https://www.doi.org/10.1107/S1600577524006088>
11. X-ray DB (2024).  
<https://xraypy.github.io/XrayDB/index.html>
12. Klementiev K., Chernikov R. // SPIE. 2014. V. 9209. P. 60.  
<https://www.doi.org/10.1117/12.2061400>
13. Madenci E., Guven I. The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS. Springer, 2015. 657 p.  
<https://www.doi.org/10.1007/978-1-4899-7550-8>
14. Ho C.Y., Powell R.W., Liley P.E. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1972. V. 1. № 2. P. 279.
15. Hedayat A., Khounsary A., Mashayek F. // SPIE. 2012. V. 8502. P. 167.  
<https://www.doi.org/10.1117/12.929362>
16. Jacobson P., Stoupin S. // Diam. Relat. Mater. 2019. V. 97. P. 107469.  
<https://www.doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107469>

## Simple Optical Layout with a Diamond Crystal Monochromator for X-Ray Spectromicroscopy

**Yu. V. Khomyakov<sup>1,2,\*</sup>, M. V. Gorbachev<sup>3</sup>, V. A. Chernov<sup>1</sup>, F. A. Darin<sup>2</sup>,  
Ya. V. Rakshun<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>2</sup>*SRF SKIF, Koltsovo, 630559, Russia*

<sup>3</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia*

<sup>4</sup>*V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, 630090 Russia*

\**e-mail: yu.v.khomyakov@yandex.ru*

The study introduces a concept for an undulator beamline at a synchrotron radiation facility designed to combine confocal X-ray fluorescence microscopy (confocal  $\mu$ XRF) with micro-X-ray absorption near edge structure spectroscopy ( $\mu$ XANES). The optical layout employs a compact diamond channel-cut monochromator positioned near the focus of the undulator beam. The analysis includes an evaluation of the thermal load on the diamond monochromator and a simulation of the steady-state temperature distribution and thermally induced deformations in the crystal under water-cooling conditions. In maximum thermal load regime, the slope error of the deformed surface of the crystal's first lamella remains significantly smaller than the angular convergence of the undulator beam, its angular size at the sample, and the rocking curve width of the crystal. The study also estimates the energy resolution of the diamond monochromator C(111), considering both the beam convergence and the temperature difference between the crystal lamellae. The results demonstrate that a diamond monochromator can operate near the focus of a high-power undulator beam at a fourth-generation synchrotron source, confirming the feasibility of the proposed beamline design.

**Keywords:** synchrotron radiation, undulator radiation, spectromicroscopy, X-ray Absorption Near Edge Structure, X-ray Fluorescence, microprobe, diamond monochromator, channel-cut monochromator, thermal loads, thermally induced deformations.