

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ И ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ УПРУГО ИЗОГНУТЫХ АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН МЕТОДОМ ЛАУЭ

С.Ю. Мартюшов, В.Д. Бланк, В.Н. Денисов, Р.В. Дигуров, С.Н. Поляков

Степан Юрьевич Мартюшов (ORCID 0000-0002-0496-2982)*, Владимир Давыдович Бланк (ORCID 0000-0002-6070-4080), Виктор Николаевич Денисов (ORCID 0009-0004-4012-8188), Роман Валерьевич Дигуров (ORCID 0009-0002-7505-8314), Сергей Николаевич Поляков (ORCID 0000-0003-2933-4349)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, д.7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: mart@tisnum.ru*

*Недостаток информации о дифракционных и энергодисперсионных свойствах упруго изогнутых тонких монокристаллических алмазных пластин ограничивает область их применения в рентгеновской оптике. Для исследования этих свойств в цилиндрически изогнутой алмазной пластине толщиной 40 мкм и (110) ориентацией поверхности мы применили локальный дифракционный метод Лауэ. Данный метод обладает высокой информативностью, поскольку позволяет получать картину рассеяния в различных кристаллографических направлениях. Изгиб пластины приводит к возникновению астеризма пятен Лауэ за счет наклона брэгговских плоскостей и наличия деформации кристаллической решетки. Детальный анализ картины дифракции позволил сформулировать условия, при которых астеризм пятен Лауэ в равной степени зависит от наклона кристаллографических плоскостей и деформации. Это открывает перспективу использования метода Лауэ для визуализации полей деформации и определения их максимальных значений в различных кристаллографических направлениях в монокристаллах алмаза с цилиндрическим изгибом. Продемонстрировано, что участие в дифракции характеристических линий $AgK_{\alpha 1}$ и $AgK_{\alpha 2}$ позволяет определять радиус изгиба пластины в режиме *in situ*. Показано, что изогнутая алмазная пластина представляет собой диспергирующий элемент в широком диапазоне энергий. Установлено, что путем изменения радиуса изгиба пластины и диаметра рентгеновского пучка можно управлять энергодисперсионными характеристиками. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании элементов рентгеновской оптики, предназначенной для работы в мощных пучках современных синхротронных источников и рентгеновских лазеров. Высокое структурное совершенство монокристаллической пластины из алмаза делает ее пригодной для работы с когерентным рентгеновским излучением.*

Ключевые слова: метод Лауэ, алмаз, алмазная пластина, рентгеновская оптика

INVESTIGATION OF THE DIFFRACTIVE AND ENERGY-DISPERSIVE PROPERTIES OF THIN ELASTICALLY CURVED DIAMOND PLATES BY THE LAUE METHOD

S.Yu. Martyushov, V.D. Blank, V.N. Denisov, R.V. Digurov, S.N. Polyakov

Stepan Yu. Martyushov (ORCID 0000-0002-0496-2982)*, Vladimir D. Blank (ORCID 0000-0002-6070-4080), Viktor N. Denisov (ORCID 0009-0004-4012-8188), Roman V. Digurov (ORCID 0009-0002-7505-8314), Sergey N. Polyakov (ORCID 0000-0003-2933-4349)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: mart@tisnum.ru*

The lack of information on the diffraction and energy dispersive properties of elastically curved thin single-crystal diamond plates limits their application in X-ray optics. To study these properties in a cylindrically curved diamond plate with a thickness of 40 μm and (110) surface

orientation, we used the Laue microdiffraction method, which is highly informative, since it allows one to obtain a diffraction pattern in various crystallographic directions. Bending of the plate leads to the asterism of Laue spots due to the inclination of the Bragg planes and the presence of deformation of the crystal lattice. A detailed analysis of the diffraction pattern made it possible to formulate the conditions under which the asterism of the Laue spots equally depends on the inclination of the crystallographic planes and deformation. This opens up the prospect of using the Laue method to visualize strain fields and determine their maximum values in various crystallographic directions in diamond single crystals with a cylindrical bend. It has been demonstrated that the participation of the $AgK_{\alpha 1}$ and $AgK_{\alpha 2}$ characteristic lines in the diffraction makes it possible to determine in situ the bending radius of the plate. It is shown that a curved diamond plate is a dispersing element in a wide energy range. It has been established that by changing the bending radius of the plate and the diameter of the X-ray beam, it is possible to control the energy-dispersive characteristics. The results of the studies carried out can be used to create elements of X-ray optics intended for operation in high-power beams of modern synchrotron sources and X-ray lasers. The high structural perfection of a single-crystal diamond plate makes it suitable for work with coherent X-rays.

Key words: Laue microdiffraction, diamond, diamond plate, x-ray optics

Для цитирования:

Мартюшов С.Ю., Бланк В.Д., Денисов В.Н., Дигуров Р.В., Поляков С.Н. Исследование дифракционных и энергодисперсионных свойств тонких упруго изогнутых алмазных пластин методом Лауэ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 10. С. 32–37. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.2y.

For citation:

Martyushov S.Yu., Blank V.D., Denisov V.N., Digurov R.V., Polyakov S.N. Investigation of the diffractive and energy-dispersive properties of thin elastically curved diamond plates by the Laue method. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2023. V. 66. N 10. P. 32–37. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.2y.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия был достигнут значительный прогресс в выращивании высококачественных синтетических алмазов с низким уровнем дефектности, а также в технологии их обработки методом лазерной абляции [1-3]. Учитывая свойства алмаза, это привело к широкому использованию высокосоввершенных алмазных изделий в различных узлах современных ускорителей высокоэнергетических частиц и алмазной электроники [4-6]. Отличные перспективы для развития дифракционной рентгеновской оптики имеют изогнутые тонкие алмазные пластины, которые используются при конструировании спектрометров, в основе которых лежит явление дисперсии рентгеновских лучей с различной спектральной шириной [7-10]. Толщина пластин имеет принципиальное значение, так как алмаз имеет высокое значение модуля Юнга $E \sim 1,1 - 1,2 \cdot 10^3$ ГПа. Следовательно, для изгиба алмаза требуются тонкие пластины. При толщине алмазной пластины в несколько десятков микрометров радиус изгиба может составлять миллиметры. Учитывая вышеизложенное, пластины такой толщины имеют большой потенциал, особенно с точки зрения создания элементов рентгеновской оптики с широким спектром применения.

Однако методы исследования рентгенооптических свойств таких элементов еще недостаточно развиты.

Целью данной работы является детальное исследование дифракционных и энергодисперсионных свойств упруго изогнутой алмазной пластины толщиной 40 мкм с радиусом изгиба 2-10 см и ориентацией поверхности (110) локальным дифракционным методом Лауэ. Полученные экспериментальные данные могут стать основой для создания рентгеновской оптики, имеющей широкую область применения. В частности, на основе изогнутых алмазных пластин могут быть созданы широкодиапазонные рентгеновские спектрометры, работающие в геометрии пропускания, фокусирующие монохроматоры Лауэ, расширители пучка и рентгеновские коллиматоры [11-19].

Локальный дифракционный метод Лауэ удобен для изучения дифракционных свойств изогнутого алмаза, так как позволяет строить карты деформаций, возникающих в результате приложения внешней нагрузки к кристаллу и определять радиус изгиба пластины [20-22]. Среди других достоинств метода – возможность определения ориентации и возможность сопоставления данных, полученных этим методом, с данными других методов исследования и теоретических расчетов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Алмазная пластина была вырезана из кристалла типа Па, выращенного методом температурного градиента. Форма пластины выбрана в виде равнобедренного треугольника, с целью обеспечить равномерный цилиндрический изгиб [23-25]. Пластина фиксировалась у основания в специальной рамке из поликристаллического алмаза, выращенного методом химического осаждения из газовой фазы (CVD), и нагружалась со стороны вершины треугольника ползунком из поликристаллического алмаза. У рамки есть открытая апертура в виде треугольного окна для прохождения рентгеновских лучей. Рамку с изогнутой пластиной помещали в гониометр рентгеновской топографической системы Rigaku XRT-100. Positionирование треугольной алмазной пластины относительно оси падающего рентгеновского луча показано на рис. 1.

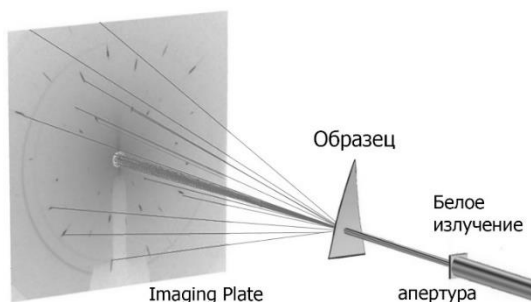


Рис. 1. Схема регистрации лауэграммы от цилиндрически изогнутого алмаза

Fig. 1. Laue image registration scheme from a cylindrically curved diamond

Съемка картины Лауэ осуществлялась на рентгеновском топографическом комплексе Rigaku XRT-100 CCM с использованием белого излучения серебряного анода. Излучение серебряного анода подобрано специально для того, чтобы в дифракцию вовлекались характеристические линии $AgK_{\alpha 1}$ и $AgK_{\alpha 2}$, энергия которых близка к энергии некоторых Лауэ рефлексов. Через пластину перпендикулярно поверхности направлялся пучок сплошного «белого» рентгеновского излучения от серебряного вращающегося анода с присутствующими в спектре характеристическими линиями $AgK_{\alpha 1}$ и $AgK_{\alpha 2}$. Рентгенограммы Лауэ получали при различных радиусах изгиба пластины и диаметрах рентгеновского пучка 400 мкм, 100 мкм и 50 мкм. Картина дифракции фиксировалась на пластину с оптической памятью IP, располагавшейся перпендикулярно рентгеновскому пучку на расстоянии 26 мм от алмазной пластины. На рис. 2 представлена рентгенограмма Лауэ изогнутой алмазной пла-

стины с радиусом изгиба $R = 21$ мм. Диаметр рентгеновского пучка $D = 400$ мкм.

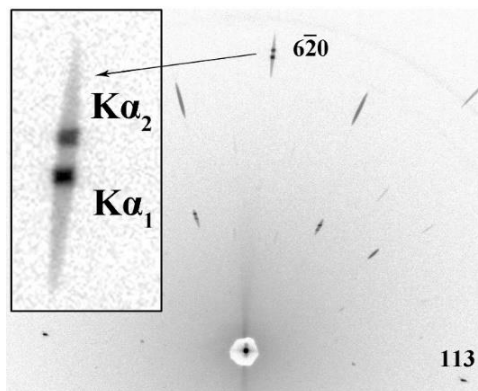


Рис. 2. Частичная рентгенограмма Лауэ напряженной алмазной пластины. На вставке слева вынесен рефлекс ($6\bar{2}0$), включающий пятна Лауэ, возникающие из-за отражения от кристаллографических плоскостей ($3\bar{1}0$) и радиальной дисперсии характеристических линий $AgK_{\alpha 1}$ и $AgK_{\alpha 2}$

Fig. 2. Partial Laue X-ray image of a stressed diamond plate. The inset on the left shows the reflection ($6\bar{2}0$), which includes Laue spots arising due to reflection from the crystallographic planes ($3\bar{1}0$) and the radial dispersion of the characteristic lines $AgK_{\alpha 1}$ and $AgK_{\alpha 2}$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из дифрактограммы, длина пятен в разных направлениях различна. Горизонтальное направление соответствует ненапряженному кристаллу и характеризуется наличием пятен небольшого размера, а в вертикальном – наблюдается вытянутость пятен в радиальном направлении (астеризм), что соответствует сагитальному изгибу пластины. При этом поперечный размер вытянутых пятен значительно меньше их длины в радиальном направлении. Отметим, что интенсивность вытянутых пятен по всей длине практически одинакова, что свидетельствует о непрерывном искривлении решетки исходного кристалла при наличии градиента деформации в объеме, что полностью согласуется с теорией чистого изгиба [26].

Индексирование картины Лауэ было сделано при помощи программы LauePt [27], которая предназначена для симуляции и анализа рентгеновских дифракционных паттернов Лауэ, снятых на белом излучении. После индексации стало понятно, что наиболее удлиненные Лауэ рефлексы находятся ближе к направлению $[1\bar{1}0]$, которое совпадает с осью изгиба (вдоль биссектрисы равнобедренного треугольника). Общая картина Лауэ с некоторыми индексами представлена на рис. 3. При индексах отражений проставлены соответствующие им энергии рентгеновского излучения.

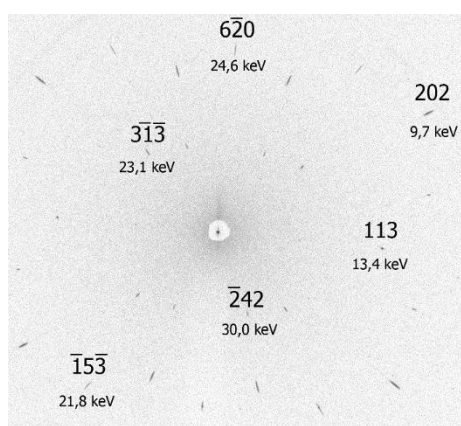


Рис. 3. Рентгенограмма Лауэ слабо напряженной алмазной пластины. Указаны некоторые индексы Лауэ рефлексов, а также соответствующие им энергии рентгеновского спектра
Fig. 3. Laue X-ray diffraction pattern of a less stressed diamond plate. Some indices of Laue reflections are indicated, as well as the energies of the X-ray spectrum corresponding to them

Можно увидеть, что в картину дифракции вовлекаются энергии падающего белого излучения от 8,5 КэВ до 35 КэВ, при этом на конкретную энергию отражения в этом диапазоне можно настроиться путем наклона и поворота дифрагирующего кристалла. Астеризм Лауэ рефлексов, близких к аксиальному направлению $[1\bar{1}0]$, больше, чем рефлексов, близких к горизонтальному направлению $[001]$.

Также было экспериментально показано, что удлинение Лауэ пятен линейно зависит от радиуса изгиба пластины – чем меньше радиус изгиба, тем больше астеризм пятен в направлении, соответствующему изгибу, см. рис. 4а. Кроме того, размеры Лауэ пятна прямо зависят от диаметра рентгеновского пучка, см рис. 4б.

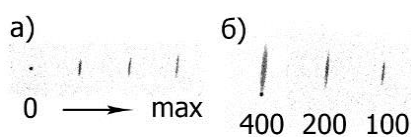


Рис. 4. а) Увеличение астеризма рефлекса $[6\bar{2}0]$ с увеличением изгиба алмазной пластины, максимальный изгиб соответствует радиусу изгиба 21 мм, б) изменение размеров Лауэ пятна с уменьшением диаметра рентгеновского пучка от 400 до 100 мкм

Fig. 4. а) An increase in the asterism of the $[6\bar{2}0]$ reflection with an increase in the bending of the diamond plate, the maximum bending corresponds to a bending radius of 21 mm, б) a change in the dimensions of the Laue spot with a decrease in the diameter of the X-ray beam from 400 to 100 μm

При съемке картины дифракции белого рентгеновского излучения на упруго изогнутой монокристаллической пластине на просвет, то есть съемке лауэграммы, на удлинение пятен Лауэ влияют два фактора – разворот кристаллографических

плоскостей в пределах диаметра падающего рентгеновского излучения вследствие изгиба пластины и деформация кристаллической решетки по глубине пластины за счет сжимающих-растягивающих напряжений от изгиба кристалла. Возможно сформулировать условие, названное нами «условием равного влияния», при котором вклад этих составляющих в астеризм будет одинаков.

При помощи программы индицирования LauePt было определено, что Лауэ рефлексы $[620]$ и $[\bar{2}60]$ соответствуют отражениям с энергией 24,6 кэВ, что близко к энергиям характеристических линий серебра $\text{AgK}_{\alpha 1}$ и $\text{AgK}_{\alpha 2}$ ($E_{\text{AgK}_{\alpha 1}} = 22,163494$ кэВ, $E_{\text{AgK}_{\alpha 2}} = 21,990898$ кэВ). Разница этих энергий составляет 173 эВ, что позволяет наблюдать соответствующие Лауэ пятна от кристаллографических плоскостей $(3\bar{1}0)$ в одном рефлексе, (см. вкладку на рис. 2). Чтобы эти пятна попали в отражающее положение, дифрагирующий кристалл был немного отклонен от перпендикулярного положения. Анализ относительной насыщенности пятен подтверждает предположение о том, что это отражения характеристических длин волн $\text{AgK}_{\alpha 1}$ и $\text{AgK}_{\alpha 2}$, так как их интенсивность различается в 2 раза. Так как длины волн характеристического излучения известны с хорошей точностью, это позволяет рассчитать радиус кривизны пластины R по формуле [5]:

$$R = \frac{\cos\theta}{\sin^2\theta} \times \frac{D \times \lambda}{\Delta\lambda},$$

где $\Delta\lambda = \lambda_{\text{K}\alpha 2} - \lambda_{\text{K}\alpha 1}$, θ – угол Брэгга, D – диаметр пучка.

Если подобрать наклон дифрагирующей пластины и выбрать размер рентгеновского пучка, чтобы пятна Лауэ от характеристических длин волн находились по краям рефлекса, то по этой формуле при диаметре пучка $D = 50$ мкм и угле Брэгга $\theta = 26.56^\circ$ получается радиус изгиба $R = 21$ мм, что совпало с радиусом, определенным предварительно методом оптической интерференционной микроскопии.

ВЫВОДЫ

Продемонстрированы высокофункциональные возможности локального дифракционного метода Лауэ при исследовании дисперсионных и дифракционных свойств тонкой цилиндрически изогнутой алмазной пластины толщиной 40 мкм и (110) ориентацией поверхности, проведенные в лабораторных условиях с использованием мощного источника рентгеновского излучения с серебряным вращающимся анодом. Показано, что астеризм пятен Лауэ зависит от наклона брэгговских плоскостей вследствие изгиба пластины и от деформации кристаллической решетки. Выполнение

условия равного влияния этих факторов требует использования относительно узких рентгеновских пучков диаметром < 10 мкм, что легко реализуется на синхротронных источниках (СИ) и лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) нового поколения. К важным результатам следует отнести возможность определения радиуса кривизны пластины за счет участия в дифракции характеристических линий $AgK_{\alpha 1}$ и $AgK_{\alpha 2}$, и эта процедура может осуществляться в режиме *in situ*. В итоге это позволяет использовать метод Лауэ для визуализации полей деформации в пластинах с цилиндрическим изгибом. Метод обладает общностью и может быть использован для исследования дисперсионных характеристик и дифракционных свойств любых других монокристаллов с цилиндрическим изгибом с учетом их прозрачности к рентгеновскому излучению и анизотропии упругих свойств. С помощью метода Лауэ показано, что изогнутая алмазная пластина представляет собой диспергирующий элемент, с помощью которого можно создавать широкодиапазонные рентгеновские спектрографы, работающие в геометрии на просвет. Универсальность конструкции для изгиба пластин позволяет их использовать для создания высокоэффективных фокусирующих Лауэ монохроматоров для работы в сверхъярких пучках современных СИ и ЛСЭ.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 20-12-00097-П от 12 мая 2023 г.). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФГБНУ ТИСНУМ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation in the framework of the scientific project No. 20-12-00097-P from May 12, 2023. The work was carried out using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal State Budgetary Scientific Institution TISNUM.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Burns R., Chumakov A., Connell S., Dube D., Godfried H., Hansen J., Härtwig J., Hoszowska J., Masiello F., Mkhonza L., Rebak M., Rommevaux A., Setshedi R., Van Vaerenbergh P. // *J. Phys. Condens. Matter.* 2009. 21. 364224. DOI: 10.1088/0953-8984/21/36/364224.

2. Polyakov S., Denisov V., Kuzmin N., Kuznetsov M., Martyushov S., Nosukhin S., Terentyev S., Blank V. // *Diamond Relat. Mater.* 2011. 20. P. 726–728. DOI: 10.1016/j.diamond.2011.03.012.
3. Pradhan P., Wojcik M., Huang X., Kasman E., Assoufid L., Anton J., Shu D., Terentyev S., Blank V., Kim K., Shvyd'ko Y. // *J. Synchrotron Rad.* 2020. 27. P. 1553-1563. DOI: 10.1107/S1600577520012746.
4. Буга С.Г., Галкин А.С., Кузнецов М.С., Корнилов Н.В., Лупарев Н.В., Приходько Д.Д., Тарелкин С.А., Бланк В.Д. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 27-33. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y. 4.
Buga S.G., Galkin A.S., Kuznetsov M.S., Kornilov N.V., Luparev N.V., Prikhodko D.D., Tarelkin S.A., Blank V.D. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N11. P. 27-33. (in Russian) DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.7y
5. Трощев С.Ю., Большедворский С.В., Трофимов С.Д., Лупарев Н.В., Носухин С.А., Буга С.Г. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 16-21.
Troschiev S.Yu., Bolshedvorskii S.V., Trofimov S.D., Luparev N.V., Nosukhin S.A., Buga S.G. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 16-21 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.12y.
6. Сорокин Б.П., Квашнин Г.М., Лупарев Н.В., Асафьев Н.О., Щербаков Д.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 63-70.
Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Luparev N.V., Asafiev N.O., Scherbakov D.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 63-70 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.10y.
7. Terentyev S., Blank V., Kolodziej T., Shvyd'ko Y. // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. 87. P. 125117. DOI: 10.1063/1.4973326.
8. Boesenberg U., Samoylova L., Roth T., Zhu D., Terentyev S., Vannoni M., Feng Y., Driel T., Song S., Blank V., Sinn H., Robert A., Madsen A. // *Opt. Express.* 2017. 25(3). P. 2852-2862. DOI: 10.1364/OE.25.002852.
9. Amann J., Berg W., Blank V., Decker F.-J., Ding Y., Emma P., Feng Y., Frisch J., Fritz D., Hastings J., Huang Z., Krzywinski J., Lindberg R., Loos H., Lutman A., Nuhn H.-D., Ratner D., Rzepliela J., Shu D., Shvyd'ko Y., Spampinati S., Stoupin S., Terentyev S., Trakhtenberg E., Walz D., Welch J., Wu J., Zholents A., Zhu D. // *Nat. Photonics.* 2012. 6. P. 693-698. DOI: 10.1038/nphoton.2012.180.
10. Xing L., Zhang K., Liu P., Yi S., Weng T.-C. // *Proc. SPIE.* 2022. 12169. 1216982. DOI: 10.1117/12.2625095.
11. Qi P., Shi X., Samadi N., Chapman D. // *Proc. SPIE.* 2019. 11108. 111080E. DOI: 10.1117/12.2525449.
12. Nam I., Min C.-K., Oh B., Kim G., Na D., Suh Y., Yang H., Cho M., Kim C., Kim M.-J., Chi Hyun Shim, Ko J., Heo H., Park J., Kim J., Park S., Park G., Kim S., Chun S., Hyun H., Lee J., Kim K., Eom I., Rah S., Shu D., Kim K.-J., Terentyev S., Blank V., Shvyd'ko Y., Lee S., Kang H.-S. // *Nat. Photonics.* 2021. 15. P. 435–441. DOI: 10.1038/s41566-021-00777-z.
13. Shvyd'ko Y., Stoupin S., Blank V., Terentyev S. // *Nat. Photonics.* 2011. 5. P. 539–542. DOI: 10.1038/nphoton.2011.197.
14. Stoupin S., Blank V., Terentyev S., Polyakov S., Denisov V., Kuznetsov M., Shvyd'ko Y., Shu D., Emma P., Maj J., Katsoudas J. // *Diamond Relat. Mater.* 2013. 33. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.diamond.2012.12.00.
15. Stoupin S., Shvyd'ko Y., Shu D., Blank V., Terentyev S., Polyakov S., Kuznetsov M., Lemesh I., Mundboth K., Collins S., Sutter J., Tolkiehn M. // *Opt. Express.* 2013. 21(25). P. 30932-30946. DOI: 10.1364/OE.21.030932.

16. Kolodziej T., Vodnala P., Terentyev S., Blank V., Shvyd'ko Y. // *J. Appl. Cryst.* 2016. 49. P. 1240-1244. DOI: 10.1107/S1600576716009171.
17. Shvyd'ko Y., Blank V., Terentyev S. // *MRS Bull.* 2017. 42. P. 437-444. DOI: 10.1557/mrs.2017.119.
18. Shvyd'ko Y., Terentyev S., Blank V., Kolodziej T. // *J. Synchrotron Rad.* 2021. 28(6). P. 1720-1728. DOI: 10.1107/S1600577521007943.
19. Tasca K., Petrov L., 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. 2380. 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/2380/1/012053.
20. Chung J.-S., Ice G. // *J. Appl. Phys.* 1999. 86. P. 5249-5255. DOI: 10.1063/1.371507.
21. Abboud A., Kirchlechner C., Keckes J., Conka Nurdan T., Send S., Micha J.S., Ulrich O., Hartmann R., Strüder L., Pietsch U. // *J. Appl. Cryst.* 2017. 50. P. 901-908. DOI: 10.1107/S1600576717005581.
22. Tardif S., Gassenq A., Guilloy K., Pauc N., Osvaldo Dias G., Hartmann J.-M., Widiez J., Zabel T., Marin E., Sigg H., Faist J., Chelnokov A., Reboud V., Calvo V., Micha J.-S., Robach O., Rieutord F. // *J. Appl. Cryst.* 2016. 49. P. 1402-1411. DOI: 10.1107/S1600576716010347.
23. Larson B.C., Wenge Yang, Ice G.E., Budai J.D., Tischler J.Z. // *Nature.* 2002. 415. P. 887-890. DOI: 10.1038/415887a.
24. Хейкер Д.М., Шишков В.А., Шилин Ю.Н., Русаков А.А., Дороватовский П.В., Жаворонков Н.В. // *Кристаллография.* 2007. Т. 52. № 4. С. 767-769.
25. Kheiker D.M., Shishkov V.A., Shilin Yu.N., Rusakov A.A., Dorovatovski P.V., Zhavoronkov N.V. // *Crystallogr. Rep.* 2007. 52. P. 740-742. DOI: 10.1134/S1063774507040244.
26. Samoylova L., Boesenberg U., Chumakov A., Kaganer V., Petrov I., Roth T., Rüffer R., Sinn H., Terentyev S., Madsen A. // *J. Synchrotron Rad.* 2019. 26. P. 1069-1072. DOI: 10.1107/S1600577519004880.
27. Morita M., Umezawa O. // *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.* 2011. 5. P. 91-96. DOI: 10.1007/978-1-4614-0228-2_13.
28. Huang X. // *J. Appl. Cryst.* 2010. 43. P. 926-928. DOI: 10.1107/S0021889810015013.

Поступила в редакцию 26.05.2023

Принята к опубликованию 03.07.2023

Received 26.05.2023

Accepted 03.07.2023