

Система визуализации плазменного факела бетатронного источника рентгеновского излучения

© Е.С. Антюшин,¹ А.А. Ахсахалян,¹ С.Ю. Зуев,¹ А.Я. Лопатин,¹ И.В. Малышев,¹ А.Н. Нечай,¹ А.А. Перекалов,¹ А.Е. Пестов,¹ Н.Н. Салащенко,¹ М.Н. Торопов,¹ Б.А. Уласевич,¹ Н.Н. Цыбин,¹ Н.И. Чхало,¹ А.А. Соловьев,² М.В. Стародубцев²

¹ Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия

² Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 5 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 5 апреля 2022 г.

Принято к публикации 5 апреля 2022 г.

Описана конструкция микроскопа для изучения бетатронного источника излучения на базе фемтосекундного лазерного комплекса PEARL в мягком рентгеновском (МР) и экстремально ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне длин волн. Основной оптический элемент микроскопа — сферический объектив Шварцшильда с пятикратным увеличением. Прибор позволил исследовать размеры и пространственную структуру области взаимодействия лазерного излучения с веществом, на выбранной длине волны в ЭУФ или МР диапазоне с разрешением $\delta x = 2.75 \mu\text{m}$. Рабочая длина волны ($\lambda = 13.5 \text{ nm}$) задается многослойными рентгеновскими зеркалами. Для подавления фоновой составляющей сигнала использованы тонкопленочные абсорбционные фильтры.

Ключевые слова: МР и ЭУФ излучение, изображающая рентгеновская оптика, МР микроскоп, бетатронное излучение.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52784.80-22

Введение

Значительный интерес к экстремальным световым полям, в перспективе способным дать информацию о пространственно-временной структуре и нелинейно-оптических свойствах вакуума, и физике их воздействия на вещество заставляет исследователей изучать механизмы взаимодействия сверхмощных лазерных импульсов с различными мишенями (газовые струи, газовые кластеры, твердое тело). При взаимодействии лазерного импульса экстремальной интенсивности с веществом происходит генерация рентгеновского излучения. Простейшим механизмом генерации является тормозной механизм, поскольку энергии электронов оказывается достаточно для излучения оптических квантов вплоть до рентгеновского диапазона длин волн. Тормозной механизм подразумевает широкий, спадающий с повышением энергии кванта, спектр излучения без каких-либо выраженных особенностей. Однако область взаимодействия может являться источником не только тормозного, но и характеристического излучения. Характеристическое излучение обладает ярко выраженными спектральными пиками, вид которых определяется составом, концентрацией и температурой образующейся плазмы. Причем оболочки атомов могут возбуждаться как из-за соударений с электронами, так и из-за поглощения высокоэнергетичных тормозных квантов [1]. В то же время существуют и более эффективные лазерно-плазменные

механизмы генерации коротковолнового излучения, связанные в основном с коллективным движением заряженных частиц, вызванным остро сфокусированным лазерным импульсом. С коллективными механизмами связана рентгеновская генерация из бетатронного источника [2–5]. Бетатронное излучение — это излучение заряженных частиц при осцилляции в электромагнитном поле. В данном случае происходит лазерно-индуцированное ускорение электронов (Laser Wake-Field Acceleration — LWFA) при взаимодействии лазерных импульсов фемто- и наносекундной длительности с лазерной мишенью. Природа такого эффекта состоит в следующем. При взаимодействии с мощными импульсами короткой длительности ионизация плазмы происходит уже на переднем фронте лазерного луча, а его основная часть возбуждает в газе кильватерную волну, электроны кильватерной волны совершают осцилляции в поле электромагнитной волны лазера, в результате происходит генерация излучения. Спектральные характеристики таких источников лишены резонансных особенностей, присущих характеристическим спектрам. Однако, в силу резонансного характера взаимодействия с лазерным импульсом, такие источники могут быть очень локализованными. Косвенные оценки геометрических размеров продемонстрированного в эксперименте бетатронного источника [6] показали, что его размер не превышает 2 мм. Излучение бетатронного источника обладает довольно широким спектром от единиц eV до десятков

keV (в зависимости от параметров лазерного импульса и профиля концентрации прозрачной плазмы) [7]. С другой стороны, известно, что соответствующая структура электронного пучка на выходе из области взаимодействия может быть довольно сложной. Например, в работе [8] показано, что в зависимости от соотношения P/P_{сг} (отношение мощности лазерного импульса к критической мощности для релятивистской самофокусировки), электронные пучки могут быть как единичными, так и „кластеризованными“. В связи с этим большой интерес представляет непосредственная визуализация источника, который предоставит информацию о его пространственной структуре и позволит получить новые знания о физике взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом. Такие исследования планирует производить на базе фемтосекундного лазерного комплекса PEARL (ИПФ РАН) [9].

Поскольку генерация происходит в рентгеновском диапазоне длин волн, то основными методами диагностики процессов, происходящих в результате взаимодействия лазерного излучения с веществом, являются рентгеновские. Однако задача экспериментального исследования области лазерной искры является достаточно сложной. Для ее решения необходимо использование высокоразрешающих изображающих систем на основе многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ). В настоящей работе описана конструкция и принципы работы специально разработанного микроскопа, позволяющего измерить геометрические размеры и исследовать структуру лазерной искры с микронным пространственным разрешением.

1. Конструкция микроскопа

Прибор построен по схеме объектива Шварцшильда с двумя сферическими зеркалами и увеличением $\times 5$. Расчет оптической схемы микроскопа осуществлялся в программном пакете Zemax [10]. Расчетные геометрические параметры прибора приведены на рис. 1.

В качестве регистрирующего элемента в приборе применена ПЗС матрица Andor DX440-BN, с размером пикселя $13.5 \times 13.5 \mu\text{m}$, площадь матрицы $27.6 \times 6.9 \text{mm}^2$ (2048×512 пикселей). Расчетное „пиксельное“ разрешение (источник излучения в плоскости объекта размером до $2.75 \times 2.75 \mu\text{m}$ будет фокусироваться в 1 пиксель матрицы размером $13.5 \times 13.5 \mu\text{m}$) прибора достигается при абберационных искажениях волнового фронта по параметру RMS не более 4.5nm и составляет $2.75 \mu\text{m}$ в плоскости объекта при поле зрения $1.2 \times 1.2 \text{mm}$.

Физические размерные параметры подложек для МРЗ составили: *M1* (вогнутое) внешний диаметр — 46mm , внутренний — 14mm , радиус кривизны — 27.0mm ; *M2* (выпуклое) диаметр — 12mm , радиус кривизны — 405.5mm . Конструкция объектива представлена на рис. 2.

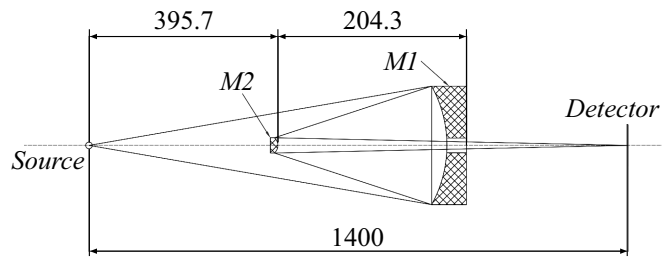


Рис. 1. Рентгенооптическая схема микроскопа. *M1* — первичное вогнутое зеркало $\varnothing 37.2 \text{mm}$; *M2* — вторичное выпуклое зеркало $\varnothing 12.0 \text{mm}$.

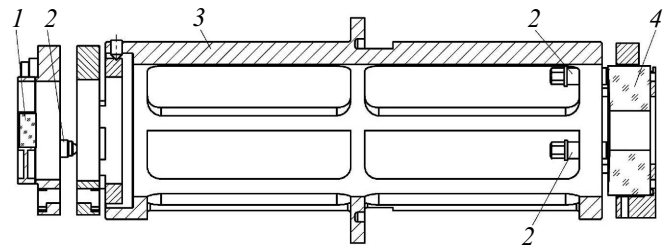


Рис. 2. Конструкция объектива: 1 — выпуклое зеркало *M2*; 2 — юстировочные винты; 3 — корпус объектива; 4 — вогнутое зеркало *M1*.

Для обеспечения соосной установки зеркал была выбрана цельно-точная конструкция корпуса. Крепление оправ МРЗ осуществлялось с помощью прижимных винтов. Для точной установки расстояния между зеркалами для вогнутого зеркала (*M1*) предусмотрена регулировка с помощью регулировочных винтов. Детектор стыкуется с вакуумным объемом микроскопа через специализированный фланец, что упрощает проведение предварительной юстировки прибора.

2. Коррекция аббераций волнового фронта

Для обеспечения „пиксельного“ разрешения была проведена коррекция волновых аббераций, вносимых объективом, поскольку изготовленные механическим притиром поверхности после сборки показали ошибки волнового фронта на уровне $\text{RMS} \sim 13 \text{nm}$. Ошибки волнового фронта исправлялись коррекцией формы „большого“ вогнутого зеркала *M1* методом ионно-пучкового травления. Подробно методика коррекции локальных ошибок формы малоразмерным и широкоапертурным ионными пучками описана в [11]. После трех итераций (одной осесимметричной широкоапертурным ионным пучком и двух локальных малоразмерным ионным пучком) ошибки волнового фронта первичного зеркала *M1* были уменьшены более чем в 6 раз до $\text{RMS} \sim 2.1 \text{nm}$. Карты ошибки формы поверхности *M1* до и после коррекции представлены на рис. 3.

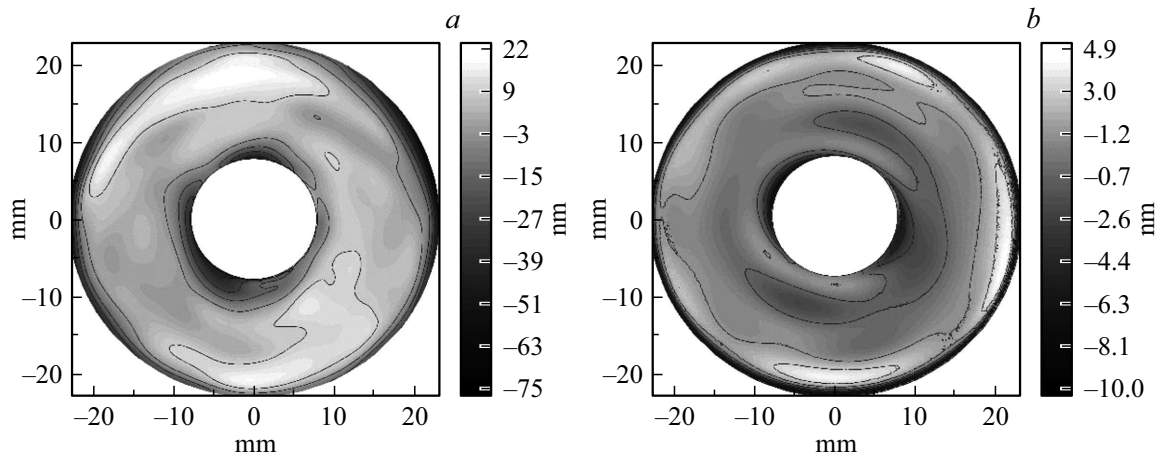


Рис. 3. Карта поверхности зеркала MI: a — до ионной коррекции (RMS = 12.8 nm); b — после ионной коррекции (RMS = 2.1 nm).

3. Рентгенооптические элементы

В качестве рабочей длины волны прибора была выбрана $\lambda = 13.4 \text{ nm}$ (рабочая длина волны проекционной ЭУФ литографии). Все рентгенооптические элементы были оптимизированы на данную длину волн.

Спектральная чувствительность детектора [12] представлена на рис. 4.

Для подавления длинноволнового фона (видимое и УФ излучение) на входе прибора и непосредственно перед детектором МР и ЭУФ излучения устанавливается тонкопленочный абсорбционный фильтр. В данном случае была разработана структура на основе пары материалов молибдена и бериллия. Структура начиналась и заканчивалась тонкой пленкой силицида молибдена (MoSi_2), так называемая cap layer, защищающей молибден от окисления и, как следствие, деградации рентгенооптических свойств. Таким образом, структура фильтра была следующей: $\text{MoSi}_2(2.5 \text{ nm})/\text{Mo}(2 \text{ nm})/(\text{Be} - 3 \text{ nm},$

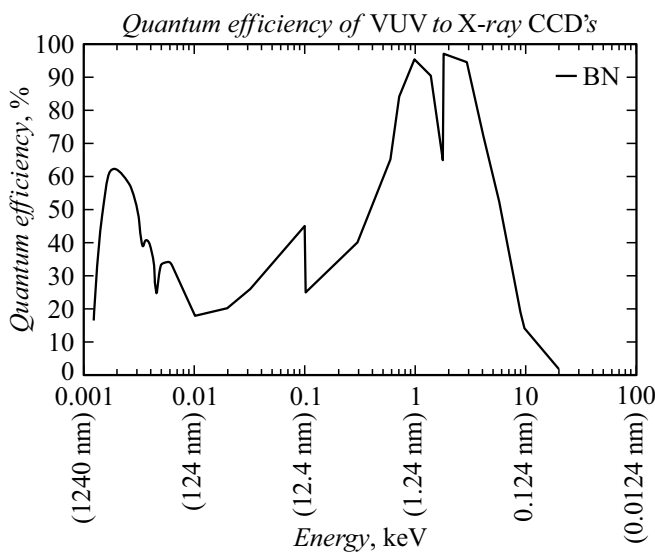


Рис. 4. Спектральная чувствительность рентгеновского 2D-детектора Andor DX440-BN.

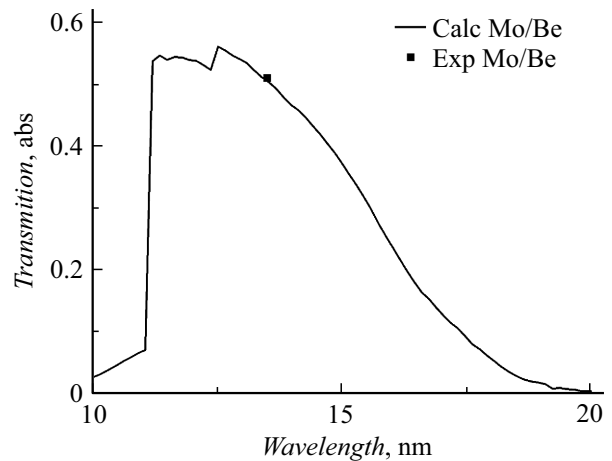


Рис. 5. Коэффициент пропускания фильтра Mo/Be, расчет (сплошная) эксперимент (точка).

$\text{Mo} - 2 \text{ nm}) * 30 \text{ периодов} / \text{MoSi}_2(2.5 \text{ nm})$. Общая толщина фильтра составила 157 nm. Расчетная спектральная зависимость коэффициента пропускания фильтра и измеренная на рабочей длине волны ($\lambda = 13.4 \text{ nm}$) представлены на рис. 5.

В качестве отражающих покрытий на подложки со скорректированной формой поверхности были нанесены многослойные Mo/Si рентгеновские зеркала, оптимизированные на длину волны 13.4 nm. С целью сохранения качества формы поверхностей и, как следствие, пространственного разрешения прибора, была применена технология компенсации внутренних напряжений в пленках. Подробно методика компенсации внутренних напряжений в структурах на основе пары материалов Mo и Si описана в [14]. Отражательные характеристики зеркал объектива, полученные на рефлектометре [15], приведены на рис. 6.

После сборки объектива на интерферометре с дифракционной волной сравнения [16] были измерены волновые aberrации прибора. На рис. 7, a изображена

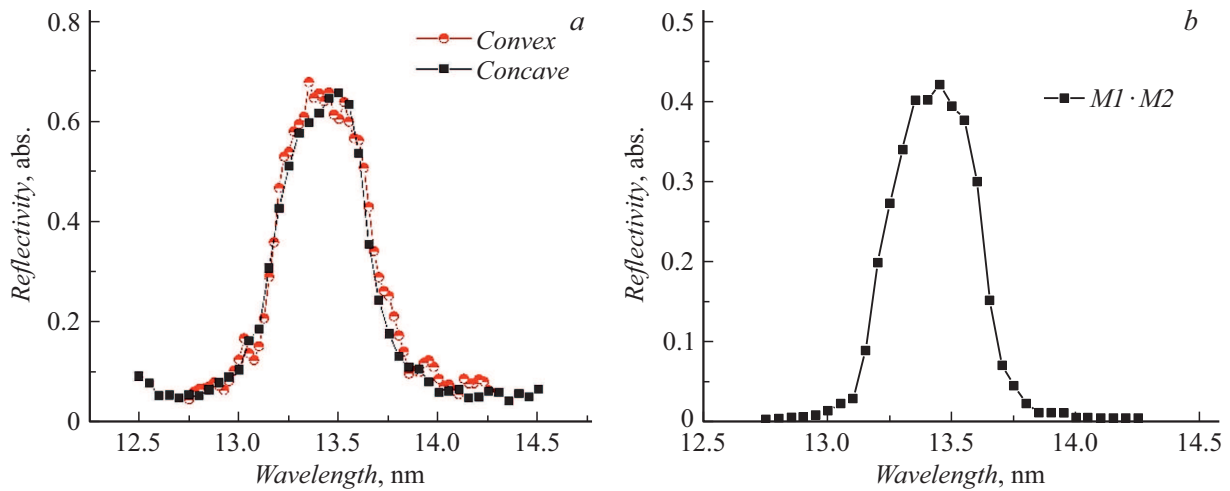


Рис. 6. Спектральные зависимости коэффициента отражения зеркал объектива (а) и их свертка (b).

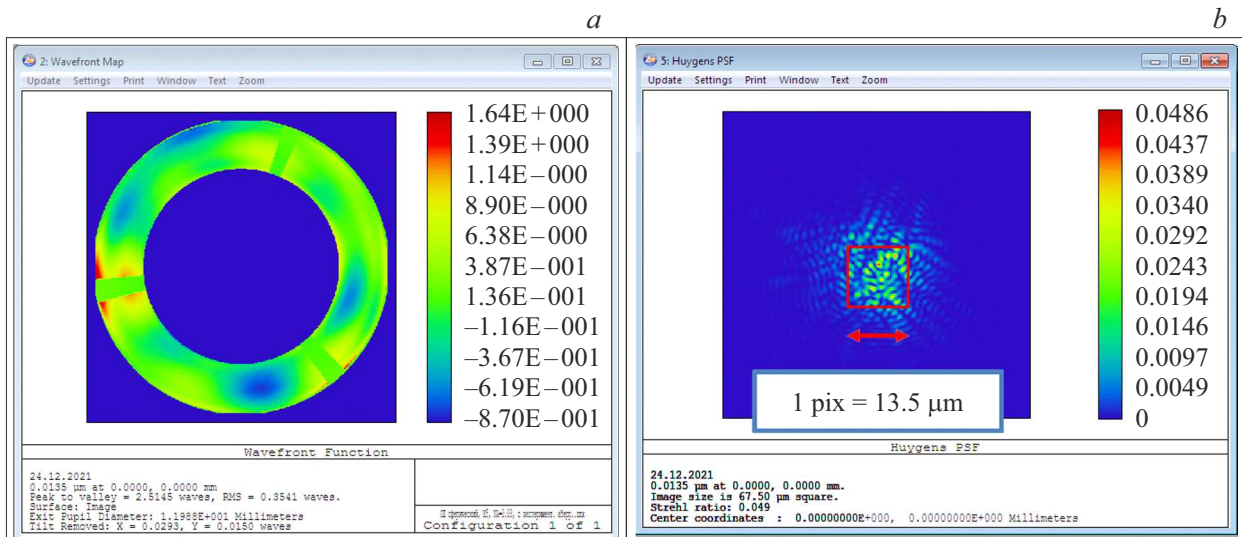


Рис. 7. Карта aberrаций объектива ($RMS = 4.5 \text{ nm}$) (а) и пятно фокусировки (b). Расчет в программе Zemax.

карта aberrаций объектива Шварцшильда, полученная после сборки прибора.

Как можно видеть, волновые aberrации прибора после нанесения на поверхность подложек многослойных рентгеновских зеркал и сборки объектива составили $RMS = 4.5 \text{ nm}$, что обеспечивает „пиксельное“ разрешение. Расчетные пятна фокусировки для данной карты волновых aberrаций, полученные в программе Zemax представлены на рис. 7, b.

Заключение

Разработан рентгеновский микроскоп с увеличением $\times 5$ и полем зрения $1.2 \times 1.2 \text{ mm}$ на основе двухзеркального сферического объектива Шварцшильда. Проведена коррекция подложек зеркал, позволившая полу-

чить волновые aberrации по параметру $RMS = 4.5 \text{ nm}$ и обеспечить „пиксельное“ разрешение прибора при использовании в качестве детектора ПЗС-матрицы Andor DX440-BN, с размером пикселя $13.5 \times 13.5 \mu\text{m}$, площадь матрицы $27.6 \times 6.9 \text{ mm}^2$ (2048×512 пикселей). Расчетное пространственное разрешение микроскопа в плоскости образца составило $\delta x = 2.75 \mu\text{m}$.

Оптимизированные на рабочую длину волны современной ЭУФ нанолитографии ($\lambda = 13.4 \text{ nm}$) многослойные рентгеновские зеркала обеспечили высокое (более 40%) пропускание оптической системы, что в совокупности с высокопрозрачными (более 50%) в окрестности длины волны 13.4 nm свободновисящими абсорбционными фильтрами позволит иметь высокое временное разрешение прибора, что позволит проводить регистрацию сигнала за один импульс лазера.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1361).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.Ya. Faenov, J. Colgan, S.B. Hansen, A. Zhidkov, T.A. Pikuz, M. Nishiuchi, S.A. Pikuz, I.Yu. Skobelev, J. Abdallah, H. Sakaki, A. Sagisaka, A.S. Pirozhkov, K. Ogura, Y. Fukuda, M. Kanasaki, N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Kando, Y. Watanabe, T. Kawachi, S. Masuda, T. Hosokai, R. Kodama, K. Kondo. *Scientific Reports*, **5**, 13436 (2015).
- [2] I. Kostyukov, A. Pukhov, S. Kiselev. *Phys. Plasmas*, **11**, 5256 (2004).
- [3] W. Lu, C. Huang, M. Zhou, W. Mori, T. Katsouleas. *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 165002 (2006).
- [4] S. Kiselev, A. Pukhov, I. Kostyukov. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 135004 (2004).
- [5] S. Corde, K.Ta Phuoc, G. Lambert, R. Fitour, V. Malka, A. Rousse, A. Beck, E. Lefebvre. *Rev. Mod. Phys.*, **85**, 1 (2013).
- [6] J. Wenz, S. Schleede, K. Khrennikov, M. Bech, P. Thibault, M. Heigoldt, F. Pfeiffer, S. Karsch. *Nature Commun.*, **6**, 7568 (2015).
- [7] Zs. Lecz, A. Andreev, N. Hafz. *Phys. Rev. E*, **102**, 053205 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.053205>
- [8] A.A. Soloviev et al. *NIM A*, **653**, 35–41 (2011).
- [9] V.V. Lozhkarev G.I. Freidman, V.N. Ginzburg, E.V. Katin, E.A. Khazanov, A.V. Kirsanov, G.A. Luchinin, A.N. Mal'shakov, M.A. Martyanov, O.V. Palashov, A.K. Poteomkin, A.M. Sergeev, A.A. Shaykin, I.V. Yakovlev. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 421 (2007).
- [10] [Электронный ресурс] Режим доступа: www.zemax.com
- [11] И.Г. Забродин, М.В. Зорина, И.А. Кас'ков, И.В. Мальшев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **90** (11), 1922 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.11.49985.112-20 [I.G. Zabrodin, M.V. Zorina, I.A. Kas'kov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo. *Tech. Phys.*, **65** (11), 1837–1845 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110274]
- [12] [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://andor.oxinst.com/>
- [13] [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://xray-optics.ru/products/software-multifitting/>
- [14] S.S. Andreev, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, A.N. Yablonsky, S.Yu. Zuev. *NIM A*, **470** (1–2), 162–167 (2001).
- [15] S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, I.A. Kas'kov, A.Ya. Lopatin, I.V. Malyshev, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.N. Tsybin, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. *Rev. Sci. Instrum.*, **91** (6), 063103 (2020). DOI: 10.1063/1.5144489
- [16] N.I. Chkhalo, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, A.A. Soloviev. *Appl. Opt.*, **55** (3), 619–625 (2016).