

Внеосевой асферический коллектор для экстремальной ультрафиолетовой литографии и мягкой рентгеновской микроскопии

© И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, М.Н. Торопов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Нижний Новгород, Россия
e-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 19 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2023 г.

Принято к публикации 19 апреля 2023 г.

Методом ионно-пучковой коррекции формы малоразмерным ионным пучком сформирован неосесимметричный асферический профиль поверхности коллектора для источника экстремального ультрафиолетового излучения TEUS-S100 с числовой апертурой $NA = 0.25$, размахом высот по поверхности — $36.3 \mu\text{m}$, точностью формы по среднеквадратическому отклонению — $0.074 \mu\text{m}$, что позволило получить пятно фокусировки шириной на полувысоте $300 \mu\text{m}$. Для решения задачи произведена модернизация технологического источника ионов КЛАН-53М — заменена плоской ионно-оптической системы на фокусирующую. Ионно-оптическая система, состоящая из пары вогнутых сеток с радиусом кривизны 60 mm , обеспечила следующие параметры ионного пучка: ток ионов — 20 mA , ширина на полувысоте — 8.2 mm на расстоянии 66 mm от среза ионного источника.

Ключевые слова: экстремальное ультрафиолетовое излучение, ионно-пучковая коррекция, ионный источник, асферика.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55754.99-23

Введение

Методика ионно-пучковой обработки оптических поверхностей обладает широкими возможностями по формированию элементов для систем мягкого рентгеновского (МР) и экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) диапазонов длин волн. В основе метода лежит физическое явление распыления материала с поверхности мишени, что позволяет контролируемо удалять материал с субнанометровой точностью. Метод активно стал применяться примерно с конца 80-х — начала 90-х годов прошлого столетия [1–3]. В настоящее время на мировом рынке и в лабораториях имеется большое количество машин, производящих обработку поверхности оптических элементов пучком ускоренных ионов [4–7].

Разработан широкий спектр методик обработки поверхности ионными пучками, которые можно разделить на два класса.

1) Обработка поверхности сильноточными квазипараллельными ионными пучками через формирующую пучок диафрагму, обрабатываемая деталь при этом вращается позади диафрагмы, в результате на поверхности формируется заданный диафрагмой профиль. Расчет сечения диафрагмы производится с учетом распределения ионного тока в пучке, локальных углов падения ионов на поверхность образца и требуемого профиля травления. Таким методом удастся формировать осесимметричные асферики и проводить ионную полировку [8]; в данном случае сечение диафрагмы выбирается таким, чтобы на поверхности обрабатываемой детали производился равномерный вдоль радиуса сьем материала. Частным

случаем метода является формирование одномерных распределений, когда обрабатываемая деталь линейно перемещается позади щелевого ионного источника [9].

2) Ионно-пучковая коррекция локальных ошибок формы реализована за счет сканирования малоразмерным слаботочным ионным пучком вдоль поверхности детали по заданному закону. В этом случае ионный пучок удаляет возвышенности на поверхности образца за счет заданного времени травления в точке [10].

В настоящей работе реализован метод глубокой асферизации (глубина травления более $36 \mu\text{m}$) при сканировании вдоль поверхности малоразмерным ионным пучком.

1. Постановка задачи

Для реализации рентгенооптической схемы (рис. 1) коллекторное зеркало должно представлять собой внеосевой эллипсоид, где F_1 и F_2 — фокусы, O — точка пересечения образующей эллипсоида и оптической оси, O_1 — центр зеркала. Из-за геометрии задачи (существенно внеосевое падение излучения) для обеспечения расчетного размера пятна фокусировки ЭУФ излучения необходимо скомпенсировать aberrации волнового фронта, имеющие две составляющие — сферическую aberrацию с центром в точке O (на оптической оси) и астигматизм, зависящий от угла α между нормалью зеркала и центральным лучом падающего пучка.

Расчет профиля асферизации, обеспечивающего компенсацию обозначенных выше aberrаций, производил-

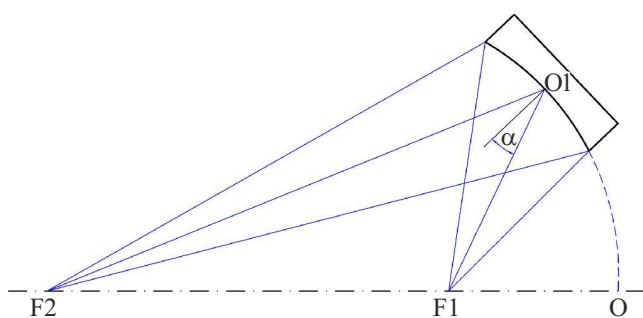


Рис. 1. Оптическая схема зеркала-коллектора.

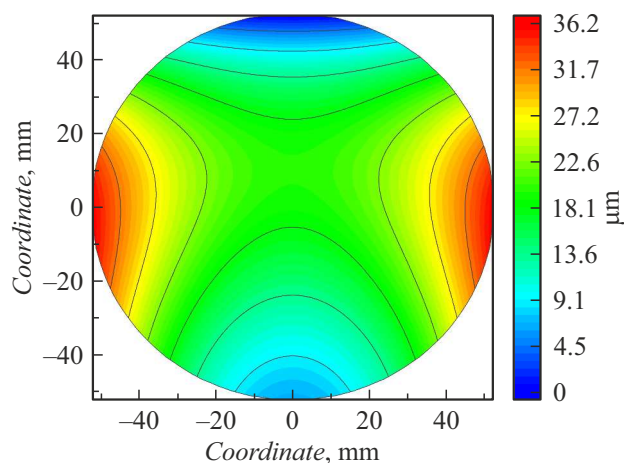


Рис. 2. Профиль асферизации зеркала-коллектора.

ся в программе Zemax [11]. Результаты моделирования для следующих параметров оптической схемы: диаметр зеркала — 105 mm, радиус ближайшей сферы $R = -679.2$ mm, длина отрезка $F_1O_1 = 401.2$ mm, $F_2O_1 = 2202.3$ mm, $2\alpha = 14.3^\circ$ представлены на рис. 2.

Как можно видеть, для реализации расчетных размеров пятна фокусировки ЭУФ излучения профиль асферизации коллекторного зеркала должен быть существенно несимметричным с размахом высот $PV = 36.3$ μm . Изготовление подобного рода поверхностей производится на оптических станках с малоразмерным полиуретановым полировальником. Результирующие изделия обладают допустимыми параметрами по точности формы и шероховатости для видимого и ультрафиолетового диапазонов длин волн, однако не обеспечивают точность, требуемую для МР и ЭУФ областей спектра [12]. Для формирования асферических поверхностей МР и ЭУФ диапазонов длин волн применяется ионно-пучковая асферизация с последующей коррекцией локальных ошибок формы [13]. Однако для реализации представленного на рис. 2 профиля асферики из-за отсутствия осевой симметрии не могут быть использованы методики формирования асферических поверхностей с использованием сильноточных широкоапертурных источников ионов, описанные в [13,14], которые реализуются за счет

вращения обрабатываемой детали позади формирующей ионный пучок диафрагмой. В работе [15] было сделано предложение о возможности формирования несимметричного профиля асферики с помощью методики коррекции локальных ошибок формы, т.е. за счет сканирования по поверхности малоразмерным ионным пучком, однако из-за малого тока ионов практической реализации метода в литературе не обнаружено. Наши оценки с привлечением программы расчета времени травления „РМС“ [16] показали, что продолжительность формирования приведенного на рис. 2 асферического профиля источником ионов КЛАН-12М, описанным в [17] (ширина ионного пучка на полувысоте ~ 2.5 mm и ток ионов 1 mA), составит более 1000 h.

2. Модернизация источника ионов КЛАН-53М

Для решения задачи асферизации было предложено модернизировать технологический источник ускоренных ионов КЛАН-53М по примеру модернизации источника КЛАН-10М [17]. Предполагалось заменить плоскую ионно-оптическую систему, обеспечивающую квазипараллельный ионный пучок, вогнутой фокусирующей, что позволит получить сильноточный пучок ионов с малой шириной на полувысоте. Ожидалось, что размер ионного пучка составит менее 10 mm, что составит менее 1/10 от габаритов подложки зеркала-коллектора. Как показано в работе [18], ионный пучок размером 1/10 от диаметра детали при шаге сканирования не хуже 0.5 от диаметра ионного пучка может обеспечить точность формы по среднеквадратическому отклонению формы поверхности от идеальной лучше 10 nm.

С учетом вышесказанного была произведена модернизация источника КЛАН-53М. Плоская ионно-оптическая система заменена на фокусирующую, состоящую из пары вогнутых сеток с радиусом кривизны 60 mm (рис. 3).

Была проведена серия экспериментов по определению размера ионного пучка и плотности ионного тока. Для этого была изготовлена серия кратеров травления для разных значений ионного тока, ускоряющего напряжения и расстояния от среза ионного источника. Типичный пример кратера представлен на рис. 4.

Оптимальное соотношение тока ионов и ширины ионного пучка на полувысоте было получено для следующих параметров эксперимента: ток ионов — 20 mA, ускоряющее напряжение — 1000 V, расстояние от среза ионного источника — 66 mm. Ширина ионного пучка на полувысоте составила 8.2 mm, что соответствует плотности ионного тока на уровне 40 mA/cm². Для данного пучка с помощью программы „РМС“ был произведен расчет времени травления, которое составило 21 h. Карта распределения времени травления представлена на рис. 5.

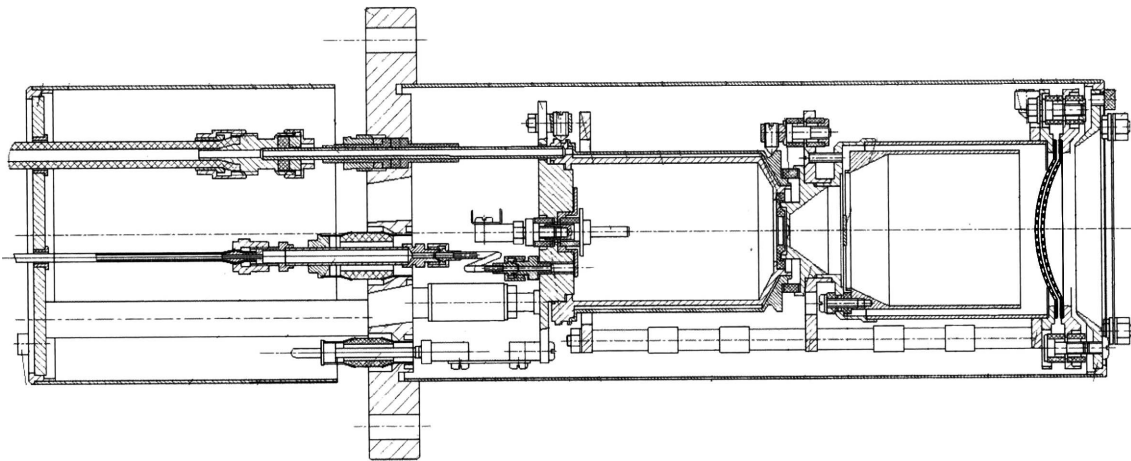


Рис. 3. Схема модернизированного источника КЛАН-53М с фокусирующей ионно-оптической системой.

3. Ионно-пучковая асферизация

Асферизации подвергалась сферическая заготовка из плавного кварца с размерами: \varnothing 105, радиусом $R = -672.9$ мм и толщиной 25 мм. На первом этапе

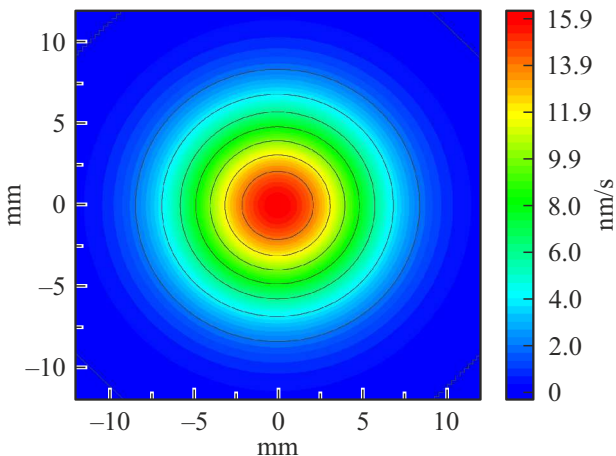


Рис. 4. Кратер травления модернизированного источника КЛАН-53М с фокусирующей ионно-оптической системой.

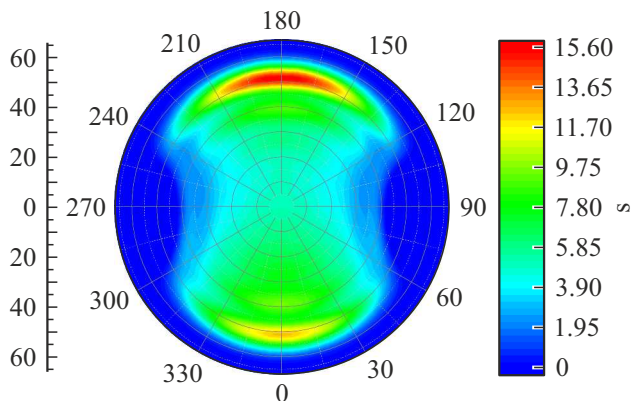


Рис. 5. Распределение времени травления.

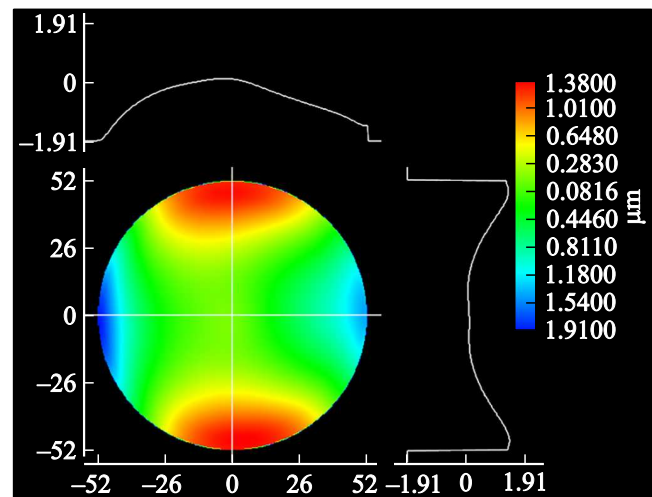


Рис. 6. Карта поверхности „свидетеля“.

был проведен тестовый эксперимент, представлявший собой травление „свидетеля“ (аналогичная заготовка) на глубину около $3.3 \mu\text{m}$. При такой глубине съема форма поверхности может быть напрямую (без использования дополнительных корректоров волнового фронта) измерена на интерферометре с дифракционной волной сравнения [19]. Карта поверхности после тестового травления представлена на рис. 6.

Убедившись в применимости метода, мы провели ионно-пучковую асферизацию подложки зеркала-коллектора. Как можно видеть из рис. 5, максимальное время травления в точке составляет более 15 с. Для недопущения перегрева кварцевой детали (кварц обладает низкой теплопроводностью) в процессе асферизации время было разбито на 12 равных отрезков с максимальным временем травления в точке на уровне 1.5 с, что соответствует стандартным временам при обработке поверхностей источником КЛАН-12М, также для дополнительного отвода тепла деталь была посажена на

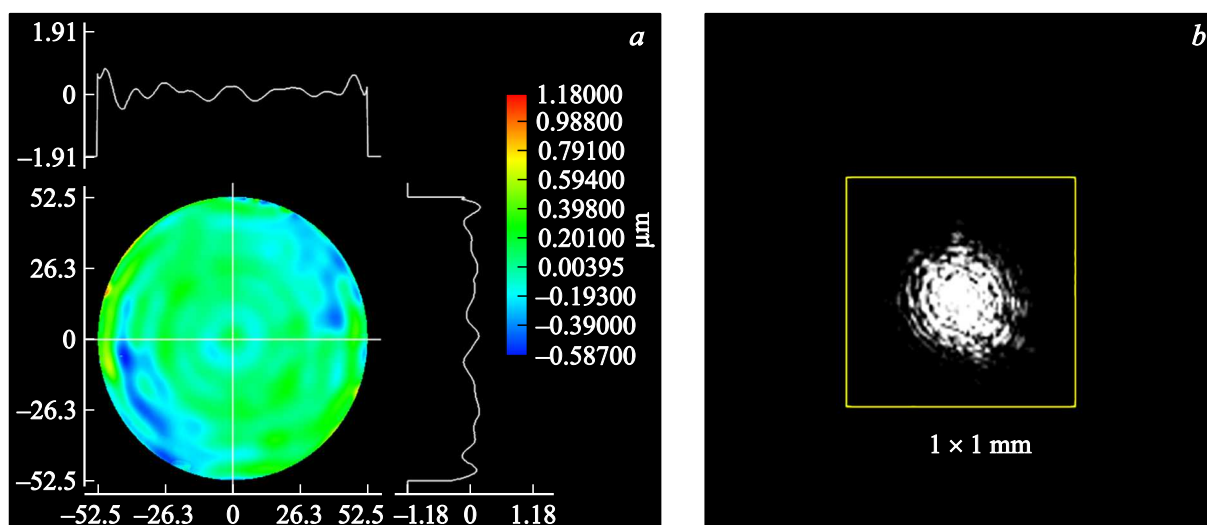


Рис. 7. Карта волновых aberrаций зеркала-коллектора (а) и пятно фокусировки (b) после асферизации.

сплав „Розе“, а к держателю подложки было подведено водяное охлаждение. Таким образом, суммарное время травления с перемещением источника относительно детали составило 30 h.

После процедуры асферизации была проведена аттестация волновых aberrаций эллипсоида и размера пятна фокусировки. Волновые aberrации, карта которых представлена на рис. 7, а, измерялись по схеме, опубликованной в [20].

Как можно видеть (рис. 7, b) полуширина пятна фокусировки на полувысоте составила $300\ \mu\text{m}$ при точечном источнике в первом фокусе. В качестве точечного использовался источник сферической волны на основе заузненного до субволновых размеров оптоволоконка [21]. Размер источника составлял $250\ \text{nm}$. При необходимости может быть проведена коррекция локальных ошибок формы для получения пятна меньшего размера. Изготовленное эллиптическое зеркало будет использоваться для фокусировки излучения ЭУФ источника TEUS-S100 с размером $\text{FWHM} = 60\ \mu\text{m}$. Для идеального эллиптического зеркала из-за размера источника и 5.5-кратного увеличения пятно фокусировки составляет $0.33\ \text{mm}$, поэтому его уширение из-за остаточной ошибки формы зеркала можно оценить как $\sqrt{0.3^2 + 0.33^2} - 0.33 \approx 0.12\ \text{mm}$.

Заключение

В работе реализован ионно-пучковый метод изготовления асферических оптических элементов с размахом высот профиля поверхности более $30\ \mu\text{m}$. Для решения задачи была проведена модернизация технологического источника ионов КЛАН-53М. В результате модернизации получен высокоточный малоразмерный ионный пучок с параметрами: ток ионов — $20\ \text{mA}$, ширина ионного пучка на полувысоте — $8.2\ \text{mm}$, плотность

ионного тока $\sim 40\ \text{mA}/\text{cm}^2$, энергия ионов — $1000\ \text{eV}$, скорость травления в максимуме — $1.0\ \mu\text{m}/\text{min}$.

Модернизация источника позволила изготовить коллектор с числовой апертурой $\text{NA} = 0.25$, со съемом материала $36\ \mu\text{m}$, точностью формы по среднеквадратическому отклонению $0.074\ \mu\text{m}$ и пятном фокусировки $300\ \mu\text{m}$.

Таким способом могут быть изготовлены коллекторы с числовой апертурой до $\text{NA} = 0.65$, для асферизации которых требуется съем материала до $100\ \mu\text{m}$, которые могут применяться в высокопроизводительной ЭУФ литографии.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1350).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L.N. Allen, H.W. Romig. Proc. SPIE, **1333**, 22 (1990). DOI: 10.1117/12.22786
- [2] S.R. Wilson, D.W. Reicher, J.R. McNeil. Proc. SPIE, **966**, 74 (1988). DOI: 10.1117/12.948051
- [3] N.P. Eisenberg, R. Carouby, J. Broder. Proc. SPIE, **1038**, 279 (1988). DOI: 10.1117/12.951063
- [4] M. Xu, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou, W. Liao. Appl. Opt., **54** (27), 8055 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.008055
- [5] M. Zeuner, S. Kiontke. Optik Photonik, **7** (2), 56 (2012). DOI: 10.1002/opph.201290051

- [6] T. Franz, T. Hänsel. *Ion Beam Figuring (IBF) Solutions for the Correction of Surface Errors of Small High Performance Optics, Optical Fabrication and Testing* (21–24 October 2008, Rochester, NY., United States), p.OThC7
- [7] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.opteg.com>
- [8] И.Г. Забродин, М.В. Зорина, И.А. Каськов, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **90** (11), 1922 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55754.99-23 [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 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220110274]
- [9] T. Wang, L. Huang, M. Vescovi, D. Kuhne, K. Tayabaly, N. Bouet, M. Idir. *Opt. Express*, **27** (11), 15380 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.015368
- [10] W. Liao, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou. *Appl. Opt.*, **53** (19), 4266 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.004266
- [11] Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.zemax.com/>
- [12] М.Н. Торопов, А.А. Ахсахалян, И.В. Малышев, М.С. Михайленко, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, А.К. Чернышов, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **91** (10), 1583 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51374.108-21 [M.N. Toropov, A.A. Akhsakhalyan, I.V. Malyshev, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, A.K. Chernyshev, N.I. Chkhalo. *Tech. Phys.*, **92** (13), 2141 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.13.52235.108-21]
- [13] N.I. Chkhalo, I.V. Malyshev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, S.N. Vdovichev, I.L. Strulya, Y.A. Plastinin, A.A. Rizvanov. *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.*, **4** (1), 014003 (2018). DOI: 10.1117/1.JATIS.4.1.014003
- [14] L.A. Cherezova, A.V. Mikhalov, A.P. Zhevlakov. *J. Opt. Technol.*, **73** (11), 812 (2006). DOI: 10.1364/JOT.73.000812
- [15] М.В. Зорина, И.М. Неведов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, С.А. Чуринов, Н.И. Чхало. *Поверхность*, **8**, 9 (2015). [M.V. Zorina, I.M. Nefedov, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, S.A. Churin, N.I. Chkhalo. *J. Surf. Investig.*, **9** (4), 765 (2015). DOI: 10.1134/S1027451015040394]
- [16] A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, M. Mikhailenko, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov. *Precis Eng.*, **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006
- [17] M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, N.I. Chkhalo, L.A. Goncharov, A.K. Chernyshev, I.G. Zabrodin, I. Kaskov, P.V. Krainov, D.I. Astakhov, V.V. Medvedev. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **1010**, 165554 (2021). DOI: 10.1016/j.nima.2021.165554
- [18] N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhailenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. *Precis Eng.*, **48**, 338 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
- [19] М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *УФН*, **182** (7), 727 (2012). [M.M. Barysheva, A.E. Pestov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, N.I. Chkhalo. *Phys.-Usp.*, **55** (7), 681 (2012). DOI: 10.3367/UFNe.0182.201207c.0727]
- [20] I.V. Malyshev, N.I. Chkhalo, A.D. Akhsahalian, M.N. Toropov, N.N. Salashchenko, D.E. Pariev. *J. Mod. Opt.*, **64** (4), 413 (2017). DOI: 10.1080/09500340.2016.1241440
- [21] N.I. Chkhalo, A.Yu. Klimov, V.V. Rogov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov. *Rev. Sci. Instrum.*, **79**, 033107 (2008). DOI: 10.1063/1.2900561