

Установка ионно-пучковой коррекции и асферизации формы поверхности оптических элементов УИП-300

© А.Е. Пестов, М.С. Михайленко, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало, И.Г. Забродин, А.И. Николаев, И.А. Каськов, Е.С. Антюшин

Институт физики микроструктур РАН,
603087 Афонино, Кстовский район, Нижегородская обл., Россия
e-mail: aepestov@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 26 мая 2025 г.

В окончательной редакции 26 мая 2025 г.

Принято к публикации 26 мая 2025 г.

Описана установка ионно-пучковой коррекции и асферизации формы поверхности оптических элементов для промышленных применений УИП-300. Машина оснащена тремя источниками ускоренных ионов (два с фокусировкой ионного пучка и один сильноточный широкоапертурный с квазипараллельным ионным пучком) и гониометром с пятью степенями свободы. Реализованная концепция подвижной детали позволила соединить в одной установке все методики ионно-пучковой обработки поверхности (полировка, асферизация, коррекция и предоперационная чистка), а также проводить обозначенные операции последовательно (без развакуумации камеры). Проведено тестирование источников ускоренных ионов, определены размеры ионного пучка и распределение ионного тока вдоль апертуры источников. Показано, что доступные размеры пучка от 2.1 до 25 mm и токи ионов от 0.3 до 40 mA позволяют проводить коррекцию формы поверхностей любой формы и габаритов как с малым, так и значительным съемом материала, и латеральными размерами неоднородностей от десятков миллиметров до сотых долей μm (диапазон пространственных частот до $9.5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$).

Ключевые слова: ионный источник, ионно-пучковое травление, ионно-пучковая коррекция формы, шероховатость.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61244.82-25

Введение

Ионный источник (ИИ) — это электровакуумное устройство, для получения пространственно сформированных потоков ионов, направленная скорость которых много больше тепловой. Современные ионные источники можно встретить во многих научных лабораториях и на предприятиях. Источники ускоренных ионов могут быть использованы в различных техпроцессах, в особенности связанных с производством микро- и наноструктур (например, напыление пленок, прецизионное легирование полупроводниковых кристаллов с целью создания p – n -переходов, ионное травление в качестве микро- и нанообработки поверхности и др.) [1,2]. При ионно-пучковом травлении поверхности происходит удаление поверхностных слоев материалов за счет физического распыления положительными ионами инертных газов, химически не реагирующих с обрабатываемым материалом. Для ионной очистки поверхности материалов (удаления адсорбированных частиц) обычно используют ионы с энергией в диапазоне от 20 до 200 eV, а для ионного травления (удаления слоев основного материала) — от 100 до 10 000 eV. При энергиях выше, ионы проникают глубже под поверхность в объем образца, что приводит к уменьшению значения коэффициента распыления и преобладающими становятся процессы имплантации. Данный факт приводит к тому, что для

решения прикладных задач, связанных с инжинирингом поверхности, используют энергии ионов до 1.5 keV. Такое ограничение является оптимальным с точки зрения минимизации приповерхностных повреждений и эффективности травления. Поэтому ионное травление активно стало применяться для формообразования оптических элементов примерно с конца 80-х, начала 90-х гг. прошлого столетия [3–5].

Тем не менее современное развитие прикладной оптики активно движется в сторону освоения коротковолнового диапазона длин волн: от вакуумного ультрафиолетового (ВУФ, длины волн 100–200 nm) до экстремального ультрафиолетового (ЭУФ, длины волн 10–100 nm). Масштаб задач в этом диапазоне довольно велик и простирается от научных по изучению физики Солнца и верхних слоев атмосферы [6], до прикладных, таких как системы мониторинга за околосредним пространством в ВУФ [7], или систем передовой ЭУФ литографии [8]. Большим потенциалом, в качестве уникального метода нанодиагностики, обладает микроскопия в длинноволновой части мягкого рентгеновского диапазона (МР, длины волн 3–10 nm) [9,10]. Малость длины волны излучения МР и ЭУФ диапазонов накладывает высокие требования на качество оптических поверхностей. Точность формы для достижения пространственного разрешения, определяющегося дифракционным пределом Рэлее [11], согласно критерию Марешаля [12], по среднеквадрати-

ческому отклонению должна быть не хуже чем $\lambda/14$ ($RMS < \lambda/14$), где λ — рабочая длина волны оптической системы. Для обеспечения высоких коэффициентов отражения многослойных зеркал необходимо также обеспечить эффективную шероховатость в диапазоне пространственных частот ($10^{-3} - 10^3 \mu m^{-1}$) лучше, чем 0.3 nm [13]. Эти требования на 1–2 порядка превышают требования к традиционным оптическим элементам.

Кроме того, достаточно невысокие коэффициенты отражения зеркал МР и ЭУФ диапазонов длин волн требуют минимизации количества элементов в оптической схеме, поэтому для решения ряда задач, таких как, например, расширение поля зрения, прибегают к асферизации формы оптических поверхностей. Применение „глубокой“, высокоточной асферики, в том числе и не осесимметричной, позволяет в разы уменьшить число элементов в оптической схеме и получать оптические приборы с уникальными характеристиками.

Поэтому задача развития новых методов обработки оптических поверхностей, сочетающих в себе высокую точность удаления материала, позитивное влияние на шероховатость, высокую производительность и низкую стоимость технологического процесса, является крайне актуальной. Основным на сегодняшний день методом, удовлетворяющим всем обозначенным выше требованиям, является ионно-пучковая обработка.

В литературе обсуждаются различные схемы обработки оптических деталей и предлагаются альтернативы уже существующим [14–17]. В частности, в работе [14] предлагалось проводить коррекцию формы поверхности широкоапертурным параллельным ионным пучком через маски, плотно наложенные на поверхность детали, с последовательным расширением открытых областей. Очевидно, что такой подход не является оптимальным, поскольку ведет к появлению ступеней на краю маски, а, следовательно, к развитию шероховатости в области средних пространственных частот. В настоящее время масочные методы не применяются, а используется безмасочная коррекция сканированием вдоль поверхности миниатюрным ионным пучком [17–21]. В работах [16,17] производится сравнение трех- (пучок падает на поверхность параллельно оптической оси) и пятиосной схемы (поддерживается локальная нормаль ионного пучка к поверхности образца). Показано, что и та, и другая методика позволяют достигать нанометровой точности формы поверхности. Однако в случае трехосной схемы заметно усложняется математическая обработка при расчете карты сканирования из-за проекции пучка на криволинейную поверхность и существенной зависимости скорости травления от локального угла падения. Кроме того, наклонное падение может привести к развитию шероховатости поверхности [22–24]. Соответственно оптимальной схемой коррекции является пятиосная, поскольку позволяет справиться с вышеописанными проблемами.

Практически все современные машины, например, описанные в [25–27], используют следующую схему.

Обрабатываемая деталь устанавливается стационарно, а ИИ с малоразмерным ионным пучком — на подвижном столе, обеспечивающем линейные перемещения по трем координатам и наклон в двух плоскостях. В различных модификациях часть степеней свободы может быть делегирована столу для образца. Размер ионного пучка изменяется за счет сменной диафрагмы на выходной апертуре источника [16,25]. Основными недостатками такого подхода являются снижение производительности процесса и загрязнение поверхности обрабатываемой детали продуктами эрозии края диафрагмы. Кроме того, данный подход ограничивает функционал установки только решением задачи коррекции локальных ошибок формы, при котором производится сканирование вдоль поверхности по заданному алгоритму малоразмерным ионным пучком. В данном случае требуется малоразмерный и слаботочный пучок, чтобы обеспечить разумные времена травления при малых (нанометры и субнанометры) глубинах съема материала.

Для ионной полировки, и, тем более, для глубокой асферизации (отклонение от ближайшей сферы асферических поверхностей достигает единиц и десятков микрометров [7,10]) крупногабаритных деталей, наоборот, нужны большие и сильноточные пучки ускоренных ионов.

В рамках настоящей работы сделано предложение реализации иной концепции установки ионно-пучковой травления, являющейся развитием, описанной в [28], которая сочетает в себе функции полировки и асферизации широкоапертурным сильноточным и коррекцию локальных ошибок формы малоразмерным сфокусированным ионными пучками, а также проведено исследование сеточных источников ускоренных ионов КЛАН-12М, КЛАН-53М и КЛАН-163М.

1. Описание установки

Модель предложенной установки ионно-пучковой обработки оптических подложек и схема пятикоординатного стола для обрабатываемых деталей приведены на рис. 1.

Установка включает в себя вакуумную камеру (рис. 1, а), три источника ускоренных ионов и стол для образцов с пятью степенями свободы (рис. 1, б). На дополнительную шестую степень свободы установлена вращающаяся заслонка, перекрывающая ионный пучок, и одновременно являющаяся измерителем ионного тока. Система откачки состоит из форвакуумного и турбомолекулярного насосов, которые обеспечивают предельное остаточное давление в рабочей камере $7 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$.

Управление установкой, включая вакуумную откачку и напуск воздуха в камеру, включение/выключение, установка и поддержание рабочих параметров источников ускоренных ионов и положение образца относительно ионного пучка, сканирование образцом, полностью автоматизировано на базе РС совместимого (процессор

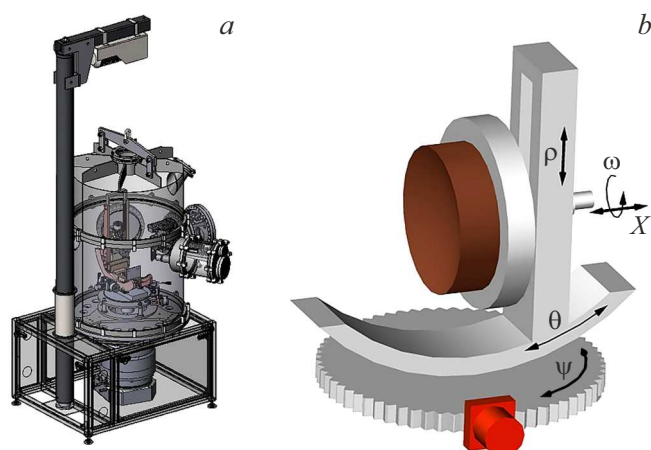


Рис. 1. Модель установки УИП-300 (а) и схема пятикоординатного стола для обрабатываемых образцов с указанием возможных перемещений (b).

80186) контроллера I-8431 фирмы ICP DAS (Тайвань). Связь контроллера с объектом осуществляется посредством периферийных модулей 8000 серии, вставляемых в слоты корзины расширения, и модулей 7000 серии, расположенных в силовых блоках, связанных с контроллером по RS-485 интерфейсу. Программное обеспечение контроллера написано на языке C++. HMI (человеко-машинный интерфейс) построен в среде LabView 7.02 (National Instruments).

Связь контроллера с HMI-компьютером осуществляется по каналу Ethernet со скоростью 10 Mbit/s по протоколу UDP (User Datagram Protocol подуровень TCP/IP), что не требует дополнительного оборудования компьютера, кроме стандартного LAN-адаптера.

1.1. Описание стола для образцов и системы сканирования

Гониометр (рис. 1, b) оснащен пятью шаговыми двигателями для перемещения образца и одним двигателем поворота заслонки, дополнительно источники с фокусировкой ионного пучка оснащены системой линейного перемещения для подведения источника к обрабатываемой детали на расстояние, соответствующее фокусному расстоянию ионно-оптической системы (ИОС). Оба источника снабжены поворотной заслонкой, также служащей измерителем ионного тока при включении источника и выводе его на рабочие параметры. Заслонка снабжена поворотным механизмом, открывающим ее при перемещении источника из положения „parking“ в положение „operating“. Назначения и основные параметры движений приведены в табл. 1.

Ионные источники установлены по окружности вакуумной камеры с интервалом 60°. Оси ионных пучков всех источников находятся в одной плоскости и пересекаются в центре гониометра (точка пересечения всех осей стола образцов). Вращением гониометра вокруг

вертикальной оси (ψ) выбирается направление на ИИ, который будет использоваться для данной операции. За счет трех степеней свободы (ω , X и ρ) любая точка поверхности произвольной формы (выпуклая, вогнутая) может быть выведена на центр гониометра. Для этого задаются полярные координаты точки (ω и ρ), а также выбирается стрелка прогиба (X) по формуле:

$$X = x_0 + R \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\rho}{R}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2R}\right)^2} \right). \quad (1)$$

Для установки локальной нормали в данной точке производится наклон образца:

$$\theta = \arcsin \frac{\rho}{R}. \quad (2)$$

Здесь x_0 — толщина образца; D — диаметр образца; R — радиус кривизны образца (задается с учетом знака: $R > 0$ — вогнутая поверхность; $R < 0$ — выпуклая поверхность).

Перед проведением процедуры обработки поверхности широкоапертурным источником ионов производится прогрев ионного источника с закрытой заслонкой, выставляются все параметры процесса, затем заслонка (ϕ) открывается. Для обработки поверхности малоразмерным ионным пучком источник подводится (L1 или L2) к поверхности детали на фокусное расстояние ионно-оптической системы. Во время движения источника с сеток снимается ускоряющее напряжение (ионный пучок выключается).

Таким образом, в отличие от большинства машин ионно-пучковой коррекции формы поверхности, где на манипулятор устанавливается ионный источник [25–27], на данной машине реализована концепция подвижной детали. Такое решение позволило соединить в одной установке все методики ионно-пучковой обработки поверхности, а именно полировка, асферизация и коррекция. При необходимости произвести заданную операцию подложка поворачивается в направлении нужного источника. Таким образом, можно существенно повысить эффективность обработки: при необходимости значительного съема материала обработка поверхности осуществляется сильноточным широкоапертурным ИИ; для локальной коррекции ошибок применяется источник с малоразмерным ионным пучком; там, где требуется производить большой съем материала (проводить травление на значительные глубины и/или проводить обработку габаритных деталей), используется источник с большим размером ионного пучка и током ионов; для финишной коррекции используется ИИ с меньшим размером ионного пучка и малым током ионов. Кроме того, данная концепция позволяет проводить последовательную обработку несколькими источниками без развакуумации системы, что востребовано при решении ряда задач, например, при обработке металлических оптических элементов для снятия окисла, при совмещении процедур ионно-пучковой полировки и коррекции формы и др.

Таблица 1. Назначение и диапазон изменения возможных перемещений

Назначение	Диапазон изменений	Минимальный шаг
Наклон образца, (θ)	$\pm 35^\circ$	0.01°
Вращение вокруг оси образца, (ω)	$0^\circ - 360^\circ$	0.01°
Линейное перемещение вдоль оси образца, (X)	$0 - 50\text{ mm}$	0.02 mm
Линейное перемещение поперек оси образца, (ρ)	$0 - 160\text{ mm}$	0.02 mm
Поворот вокруг вертикальной оси, (ψ)	$0^\circ - 120^\circ$	0.01°
Поворот заслонки, (ϕ)	on-off	—
Перемещение фокусирующего источника 1, L1	$0 - 200\text{ mm}$	0.02 mm
Перемещение фокусирующего источника 2, L2	$0 - 200\text{ mm}$	0.02 mm

1.2. Ионно-пучковые методики обработки поверхности

Схематичное представление методик обработки оптических деталей, доступных для реализации в установке, представлены на рис. 2.

Для задач асферизации и осесимметричной коррекции формы используется широкоапертурный сильноточный пучок ионов [29–31]. Задача подразумевает формирование на поверхности обрабатываемой детали детерминированной зависимости глубины травления (H) от радиуса (т.е. $H = H(r)$).

Методика реализуется следующим образом (рис. 2, а). Пучок ускоренных ионов 2, сформированный широкоапертурным ИИ 1 с плоской ионно-оптической системой (КЛАН-163М), проходя через формирующую профиль ионного пучка диафрагму 3, преобразуется в пучок требуемого сечения 4 и попадает на вращающейся вокруг центральной оси оптическую деталь 5, закрепленную на вращающемся столике гониометра 6. Таким образом, при вращении детали с ее поверхности будет удаляться материал, который может быть описан как некоторая фигура вращения, ограниченная образующей — профилем травления. Профиль травления может быть задан задачей асферизации либо выделен из ошибок формы поверхности и центр профиля травления может как

совпадать с осью детали, так и не совпадать, в общем случае ось вращения может быть в произвольной точке пространства.

Алгоритм расчета диафрагмы сводится к поточечной свертке искомого профиля травления и распределения ионного тока в пучке:

$$\varphi(r) = \frac{\omega}{v(r)} F(r),$$

(3)

где $\varphi(r)$ — функция формы маски в полярных координатах (вектор-столбец радиусов и соответствующих им углов раствора); ω — угловая скорость вращения детали в оборотах/минуту (характеристика моторизованного столика); $F(r)$ — требуемый профиль травления в виде одномерной карты, т.е. зависимость глубины травления от радиуса детали; $v(r)$ — распределение скорости травления, получаемое путем нормировки распределения ионного тока в пучке на скорость травления для данной пары газ-материал мишени.

Коррекция локальных ошибок формы оптических поверхностей на установке ионно-пучковой обработки оптических деталей для промышленных применений УИП-300 предусматривает уменьшение амплитуды неоднородностей с латеральными размерами более 1 mm (рис. 2, б). При реализации метода используется ИИ с фокусировкой ионного пучка 1, в процессе обработке в каждой точке детали 2 поддерживается локальная нормаль к поверхности (обеспечивается степенями свободы гониометра 3). Обработка детали осуществляется мало-размерным ионным пучком 4 гауссовой формы при сканировании им вдоль поверхности детали. В зависимости от латерального размера и размаха высот неоднородностей выбирается источник с фокусировкой ионного пука с областью перетяжки Ø10 mm (КЛАН-53М) или Ø2 mm (КЛАН-12М). Сканирование осуществляется путем вращения детали и перемещении ее вдоль радиуса на шаг сканирования после каждого оборота. На каждом шаге производится подстройка координат (X — расстояние от источника ионов до детали и φ — угол наклона детали) для поддержания локальной нормали к поверхности и заданного расстояния источник-образец. Для проведения процедуры коррекции формы производится расчет карты

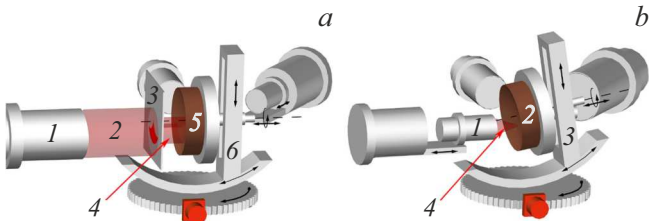


Рис. 2. Методики обработки, доступные на установке УИП-300; а — мода осесимметричной обработки поверхности: 1 — широкоапертурный источник ионов (КЛАН-163М), 2 — квазипараллельный ионный пучок, 3 — формирующая диафрагма, 4 — ионный пучок после диафрагмы, 5 — образец, 6 — гониометр; б — мода коррекции локальных ошибок формы: 1 — источник с фокусировкой ионного пучка (КЛАН-53М или КЛАН-12М), 2 — образец, 3 — пятиосный гониометр.

травления с помощью программы на основе алгоритма, описанного в [32]. Программа на входе получает измеренную на интерферометре карту поверхности и пространственное распределение скорости травления, которое выделяется из кратера травления (подробно методика регистрации кратера травления описана в разд. 2.2). Далее производится их свертка и на выходе выдается карта травления, представляющая собой набор координат точек поверхности и соответствующих им времен травления.

1.3. Ионные источники

В установке применены три технологических источника ускоренных ионов (рис. 3), основные технические характеристики которых представлены в табл. 2.

Как можно видеть из рис. 3, *b, c* и табл. 2, ионно-оптические системы источников КЛАН-12М и КЛАН 53М представляют собой конструкцию, состоящую из пары вогнутых сеток с радиусом кривизны $R = 20$ и 70 mm соответственно. Таким образом, фокусное расстояние (область перетяжки), соответствующее

минимальному размеру ионного пучка, находится на близком к этим значениям расстоянии. Как сказано выше, при проведении процедуры коррекции локальных ошибок формы сканирование производится при поддержании заданного расстояния источник-образец. Это означает, что источник в процессе работы должен находиться на расстоянии 20 mm (для КЛАН-12М) или 70 mm (для КЛАН-53М) от поверхности детали. Однако при разгоне (установке рабочих параметров и прогреве) ИИ ионный пучок не должен попадать на поверхность детали. Следовательно, между источником ускоренных ионов и деталью должна находиться заслонка, которая открывается на время процесса ионной обработки и закрывается, когда происходит настройка, и когда процесс завершен. Кроме того, заслонка должна быть электрически соединена с „земляным“ потенциалом через сопротивление для возможности по протеканию тока через резистор контролировать величину ионного тока, попадающего на заслонку, в том числе для того, чтобы контролировать нейтрализацию положительного заряда ионного пучка при работе с диэлектрическими материалами.

Для возможности поворота столика с закрепленной на его поверхности деталью от направления одного источника в направлении другого для источников КЛАН-12М и КЛАН-53М реализовано два положения: парковочное, в котором источник находится в нерабочем состоянии (расстояние до центра гониометра 200 mm), и рабочее, когда источник подводится к центру гониометра.

2. Исследование ионных источников

Для реализации методик, описанных в разд. 1.2 необходимо аттестовать характеристики источников ускоренных ионов (ток ионов, распределение ионного тока по апертуре, диаметр пятна фокусировки, фокусное расстояние). Данные исследования проводились по схеме, представленной на рис. 4.

Гониометр 1 поворачивался в направлении выбранного источника 2 и производилось тестирование его параметров.

2.1. Широкоапертурный источник (КЛАН-163М)

Сильноточный широкоапертурный источник ускоренных ионов КЛАН-163М с квазипараллельным ионным пучком обеспечивается геометрией ИОС — плоская двухсеточная. Благодаря большой выходной апертуре пучка ($\varnothing 160$ mm) и высокому току ионов (до 200 mA) источник позволяет проводить значительные съемки материала одновременно с большой площади детали (глубокая асферизация, осесимметричная коррекция, ионная полировка).

Исследование ионного пучка источника КЛАН-163М производилось на расстоянии, соответствующем расстоянию от среза источника до центра гониометра

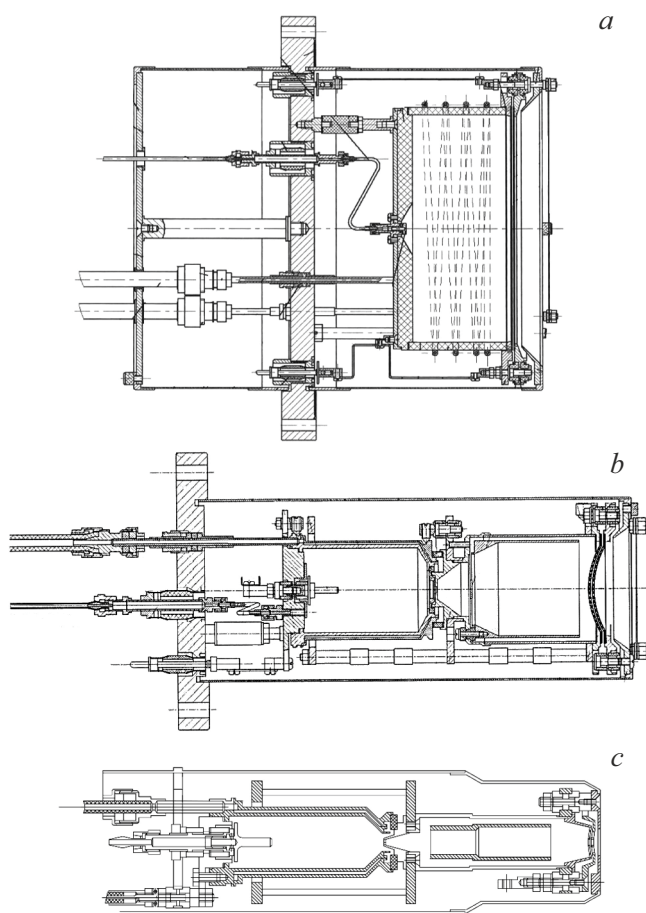


Рис. 3. Схемы источников ионов для установки УИП-300: *a* — источник КЛАН-163М — ВЧ источник с плоской ИОС; *b* — источник КЛАН-53М — источник с холодным катодом и фокусирующей ИОС; *c* — источник КЛАН-12М — источник с холодным катодом и фокусирующей ИОС.

Таблица 2. Основные характеристики ионных источников

Характеристика	КЛАН-163М	КЛАН-53М	КЛАН-12М
Тип источника	Радиочастотный $f = 2.0\text{ MHz}$	Сеточный, с холодным полым катодом	Сеточный, с холодным полым катодом
Ионно-оптическая система	Двухсеточная, плоская, материал — молибден	Двухсеточная, вогнутая, $R = 70\text{ mm}$, материал — титан	Двухсеточная, вогнутая, $R = 20\text{ mm}$, материал — титан
Рабочий газ	Инертные, O_2 , N_2 , C_2H_8 и др.	Инертные, N_2	Инертные, N_2
Рабочее давление, Па	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Размер ионного пучка, mm	$\varnothing 160$	$\varnothing 10$	$\varnothing 2$
Максимальный ионный ток, mA	200	80	1
Энергия ионов, eV	300–1500	300–1500	300–1500
Разброс по энергии, eV	± 3	± 3	± 3
Габаритные размеры, mm	$\varnothing 221 \times 165$	$\varnothing 99.6 \times 235$	$\varnothing 48 \times 166$

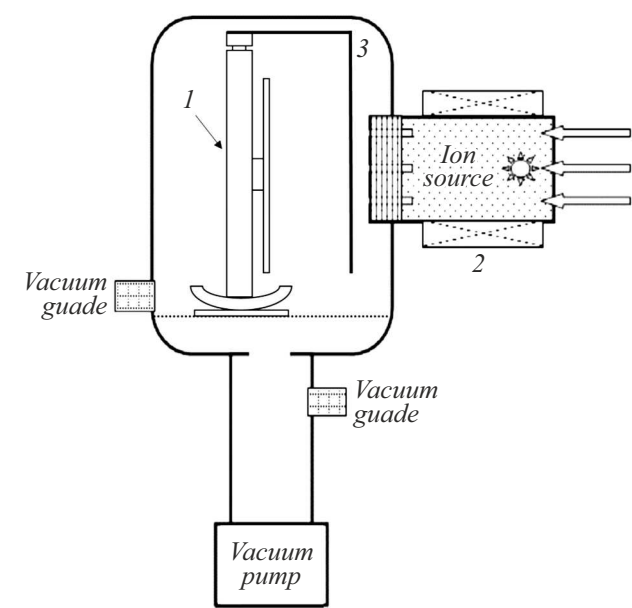


Рис. 4. Схема эксперимента по аттестации параметров источников: 1 — гониометр с пятью степенями свободы; 2 — ИИ; 3 — заслонка.

в установке УИП-300 (расстояние от выходной сетки источника до центра гониометра составляет 270 mm), т. е. изучалось распределение ионного тока в плоскости, перпендикулярной оси ионного источника и проходящей через центр гониометра. Величина ионного тока пропорциональна скорости травления [22], поэтому эксперимент выглядел следующим образом. На экспери-

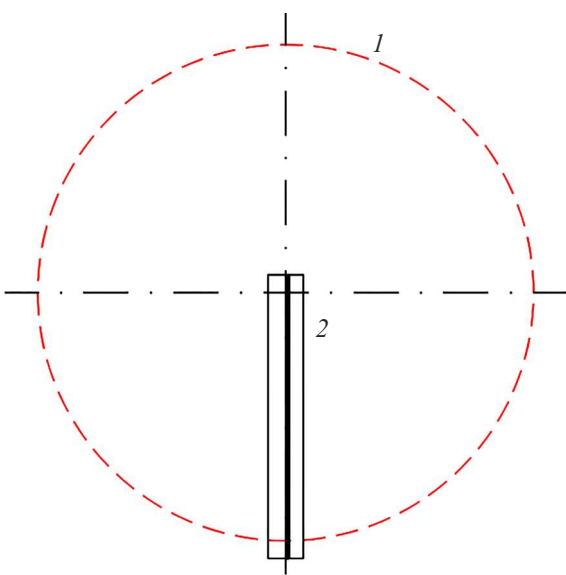


Рис. 5. Схема эксперимента по изучению скорости травления вдоль апертуры источника: 1 — ионный пучок; 2 — образец.

ментальный образец — пластину из плавленого кварца длиной 150 mm и шириной 12 mm литографически (использовался УФ литограф [33]) наносилась маска (полоска из фоторезиста шириной 1 mm). Затем данный экспериментальный образец устанавливался на столик для образцов, расположенный на расстоянии 270 mm от выходной сетки источника таким образом, чтобы край полоски проходил через ось ионного пучка, вдоль его радиуса (рис. 5).

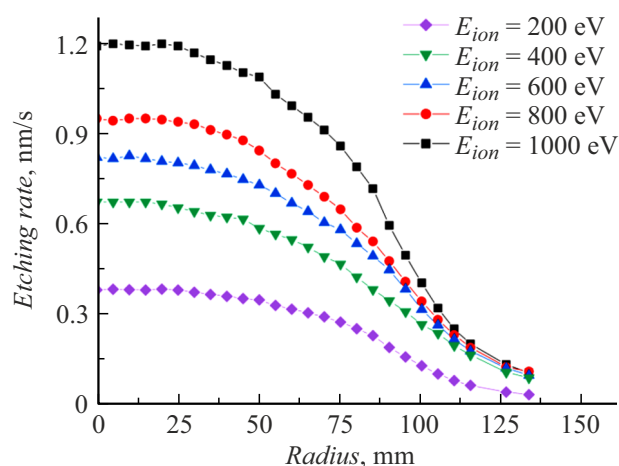


Рис. 6. Распределение скорости травления вдоль радиуса источника КЛАН-163М (расстояние 270 mm; газ Ag; $I_{ion} = 150$ mA).

В процессе ионного травления на границе маски формировалась ступенька, высота которой была пропорциональна плотности ионного тока в данной точке. Измеряя зависимость высоты ступеньки в зависимости от координаты, можно определить зависимость скорости травления от радиуса, которая пропорциональна плотности ионного тока в данной точке. Полученные таким образом зависимости для различных ускоряющих напряжений представлены на рис. 6.

Как видно из рисунка, полный размер пучка на полувысоте составляет около 160 mm, что позволяет, при использовании соответствующих фигурных диафрагм на выходе источника, обрабатывать детали с диаметром до 320 mm. Кроме того, обнаружена возможность работы с ускоряющим напряжением $U_{acc} = 200$ V, что обеспечивает проведение процедуры чистки поверхности детали ионами кислорода без распыления материала детали.

2.2. Малоразмерный источник с фокусирующей ИОС (КЛАН-12М)

Изучение параметров работы ИИ КЛАН-12М началось в исследовании размера и формы ионного пучка в зависимости от расстояния от среза апертуры источника.

Для изучения размера ионного пучка на заранее измеренной на лазерном интерферометре Zygo VeriFire 4 плоской пластинке из плавленого кварца формировался кратер травления. Для этого образец подводился к источнику на заданное расстояние, открывалась заслонка и проводилось травление при неподвижных источнике и образце в течение некоторого времени T . Анализируя полученный кратер, можно вычислить линейные размеры ионного пучка и построить пространственное распределение скорости травления. Таким образом, была проведена серия экспериментов по формированию

кратеров при различных расстояниях до ионного источника. В качестве рабочей была выбрана энергия ионов $E_{ion} = 1250$ eV, поскольку в работе [22] было показано, что для эффективной ионно-пучковой обработки оптических материалов применяются пучки с энергией ионов $E_{ion} = 1250$ eV.

На рис. 7, а представлена измеренная карта поверхности образца из плавленого кварца до формирования на ней кратера травления, на рис. 7, б — карта поверхности образца после ионного облучения, на ней отчетливо виден кратер травления. Однако представленная карта не является информативной, так как содержит большой вклад исходной формы поверхности. Для выделения непосредственно кратера травления было проведено поточечное сравнение карт поверхности, измеренных до и после процесса ионного облучения. Разность карт представлена на рис. 7, в. Полученная карта разности описывает пространственное распределение удаленного с поверхности материала. На рис. 7, д показаны сечения разностной карты по вертикали и горизонтали, а также приводится аппроксимация полученных сечений распределением Гаусса. Как можно видеть, кратеры являются гауссоподобными, и могут быть охарактеризованы при помощи ширины на полувысоте.

На рис. 8 представлена построенная по исследованиям кратеров зависимость ширины ионных пучков от расстояния между ионным источником и образцом. Параметры ионного источника при этом были следующими: ток ионов 0.3 mA, энергия ионов 1250 eV, давление рабочего газа в камере $2.2 \cdot 10^{-5}$ Torr, ток катода 50 mA.

Можно видеть, что минимальный размер ионного пучка составил 2.1 mm, что, согласно исследованию, проведенному в [34], позволяет эффективно снижать ошибки формы поверхности с пространственными частотами до $9.5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$. Кроме того, обнаружено, что с увеличением расстояния латеральный размер кратера увеличивается, что может быть использовано для коррекции формы большеразмерных оптических элементов с низкочастотными ошибками формы. Большой размер пучка позволит проходить вдоль поверхности с большим шагом, что сэкономит время на перемещение и, следовательно, процедуры в целом.

В ходе исследования было обнаружено, что при нахождении ионного источника в двух миллиметрах от тестового образца пучок не описывается нормальным распределением (рис. 9). Такое изменение связано с тем, что расстояние до образца было меньше фокусного, из-за чего на пространственном распределении видны вклады от отдельных элементов пучка. Ориентация отдельных пятен, видимых на распределении, совпадает с ориентацией ячеек на сетке ИОС ионного источника.

Таким образом, проведено исследование характеристик ионного пучка источника КЛАН 12М. В частности, получены зависимости размера ионного пучка от расстояния до выходной апертуры и показана перспективность применения источника для коррекции локальных ошибок формы поверхности. Минимальный размер ионного

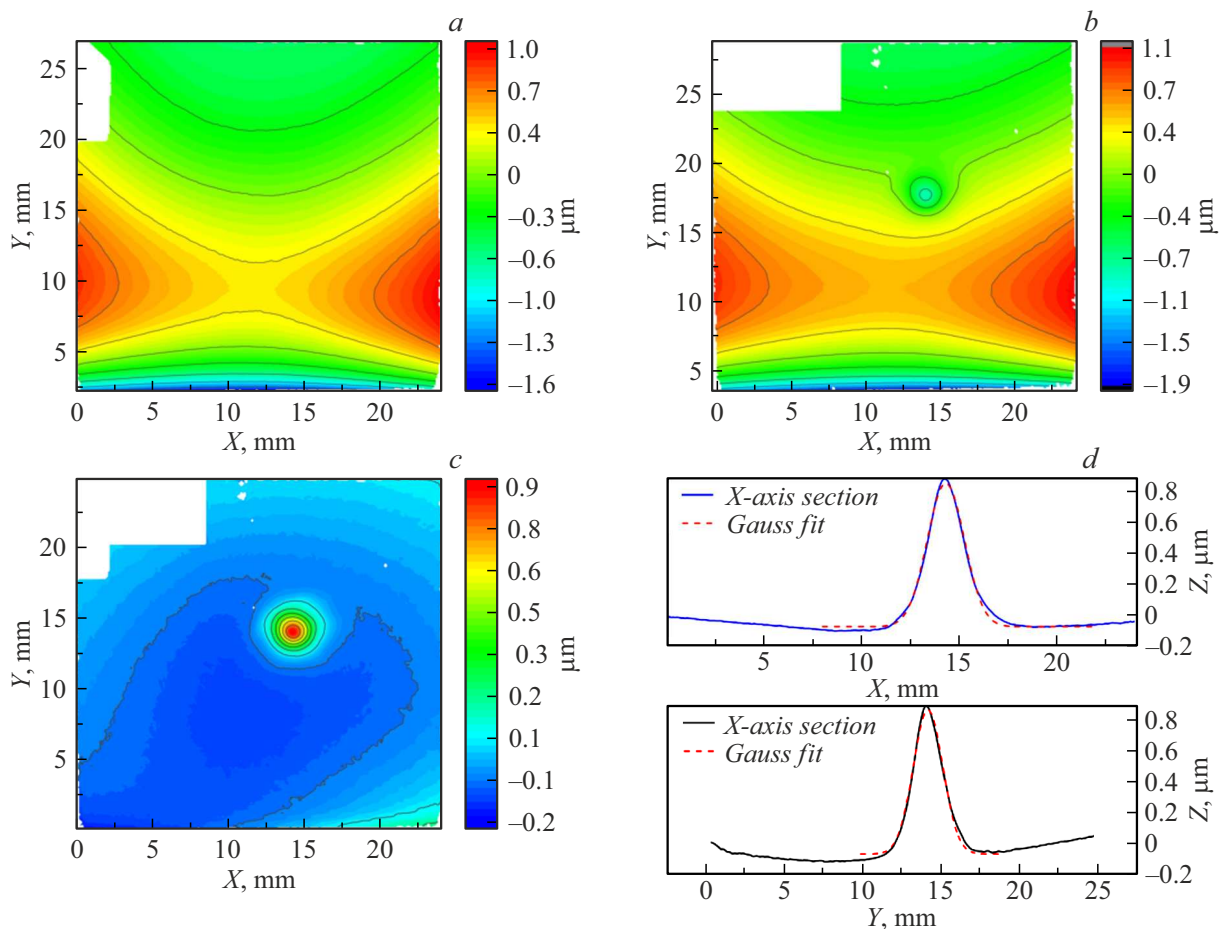


Рис. 7. Исследование кратера травления: *a* — исходная поверхность; *b* — поверхность с кратером; *c* — кратер; *d* — сечения кратера.

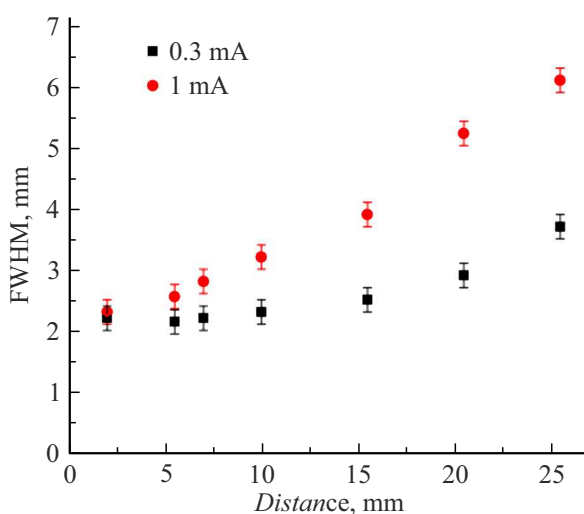


Рис. 8. Зависимость полуширины кратера травления от расстояния „источник–образец“. Источник КЛАН-12М ($E_{ion} = 1250$ eV, $I_{ion} = 0.3$ и 1 mA).

пучка — 2.1 mm — позволяет эффективно снижать ошибки формы поверхности с пространственными частотами до $9.5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$.

2.3. Источник с фокусирующей ИОС (КЛАН-53М)

Аналогичные исследования были проведены для источника КЛАН-53М. Результаты экспериментов по формированию кратеров при различных расстояниях до ИИ для энергии ионов $E_{ion} = 1250$ eV представлены на рис. 10. Как можно видеть, на образце сформирована серия кратеров при токе ионов 20 mA, размер которых был проанализирован и представлен в виде графика (рис. 11).

Как можно видеть, минимальный размер ионного пучка при $E_{ion} = 1250$ и 10 mA составил 6.2 mm, что перекрывается с максимальным зарегистрированным размером пучка для источника КЛАН-12М. Такая непрерывная зависимость позволит проводить коррекцию формы поверхностей любой формы и габаритов с латеральными размерами неоднородностей от десятков миллиметров

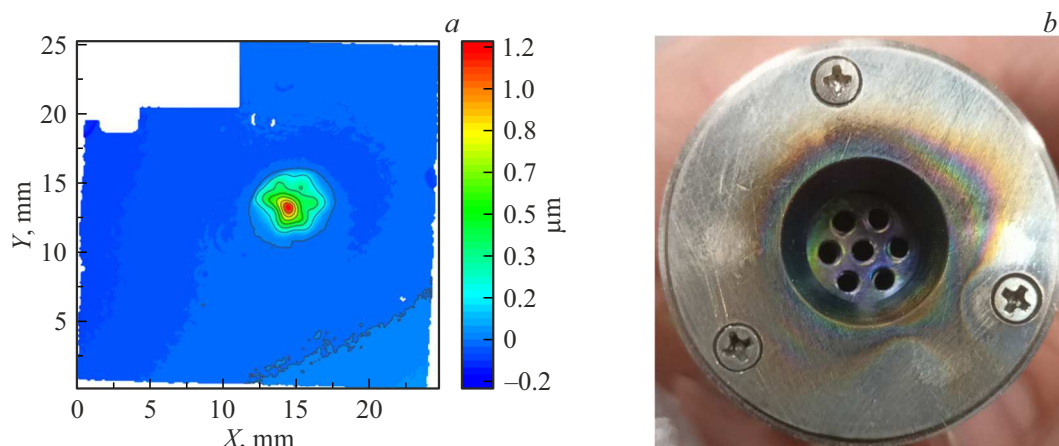


Рис. 9. Кратер травления на расстоянии 2 mm от источника (a) и фотография ускоряющей сетки ИОС (b).

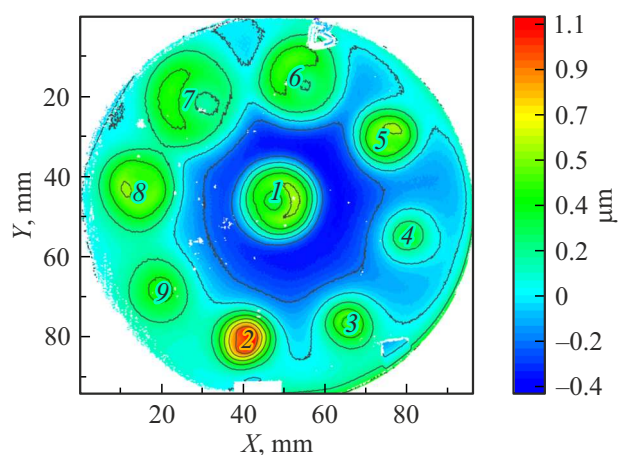


Рис. 10. Кратеры травления для источника КЛАН-53М ($I_{ion} = 20$ mA, 1250 eV).

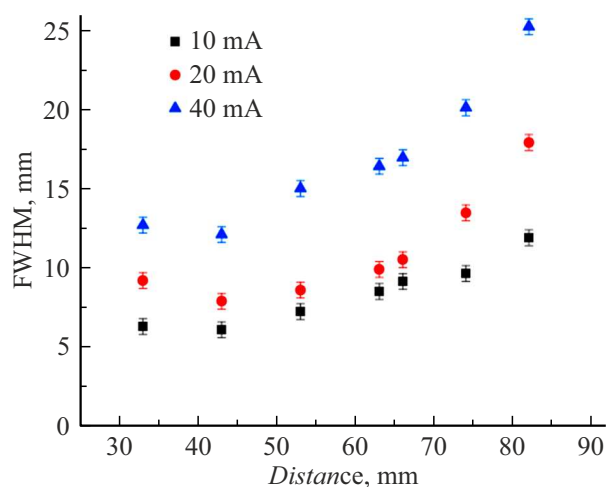


Рис. 11. Зависимость полуширины кратера травления от расстояния „источник–образец“. Источник КЛАН-53М ($E_{ion} = 1250$ eV; $I_{ion} = 10, 20$ и 40 mA).

до сотых долей микрон (диапазон пространственных частот до $9.5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$).

Заключение

В работе описана установка ионно-пучковой обработки оптических деталей для промышленных применений УИП-300. Установка включает в себя вакуумную камеру с двухступенчатой системой откачки, стол образца с пятью степенями свободы (гониометр) и три источника ускоренных ионов. Гониометр позволяет проводить обработку деталей до $\varnothing 300$ mm и толщиной до 50 mm, обеспечивая локальную нормаль к поверхности произвольной формы (плоская, выпуклая вогнутая).

Установка стала развитием прототипа, подробно описанного в [28]. В отличие от прототипа, в УИП-300, помимо широкоапертурного источника ускоренных ионов с квазипараллельным ионным пучком (КЛАН-163М), который позволяет проводить полировку и асферизацию поверхности через формирующую профиль ионного пучка диафрагму, применены также источники с фокусировкой ионного пучка (КЛАН-53М и КЛАН-12М), смонтированные на моторизованных платформах, обеспечивающих подведение источника к поверхности обрабатываемой детали на заданное (фокусное) расстояние. Источники с фокусировкой ионного пучка предназначены для проведения коррекции локальных ошибок формы безмасочным способом. Особенностью данных источников является отсутствие обрезавшей ионный пучок диафрагмы, что позволило существенно повысить эффективность обработки за счет использования полного тока ионного пучка, а также обеспечило устранение пагубного эффекта загрязнения поверхности обрабатываемой детали продуктами эрозии края диафрагмы.

В рамках работы также проведено тестирование примененных источников ускоренных ионов. Для широкоапертурного источника КЛАН-163М зарегистрированы зависимости величины ионного тока от радиуса при

различных ускоряющих напряжениях. Распределение ионного тока вдоль апертуры необходимо для расчета сечения обрезающих диафрагм, используемых для проведения процедур осесимметричной коррекции формы, асферизации, ионной полировки и предоперационной чистки поверхности. Для источников с фокусировкой ионного пучка (КЛАН-53М и КЛАН-12М) зафиксированы размер и форма кратера травления для различных токов ионов и расстояния от выходной апертуры. Форма кратера необходима для расчета карты травления для процедуры коррекции локальных ошибок формы. Для источника КЛАН-12М пучок ионов изменяется в диапазоне 2.1–6 мм, ток ионов достигает 1 мА, а для источника КЛАН-53М пучок ионов изменяется в диапазоне 6.2–25 мм, ток ионов — до 40 мА. Таким образом, применение двух источников с фокусировкой ионного пучка расширяет функционал возможностей обработки неоднородностей по высоте и латеральным размерам. Т.е. непрерывный диапазон изменения диаметра перетяжки ионного пучка от минимального — 2.1 мм до порядка 25 мм и изменение тока ионов от 0.3 до 40 мА позволяет проводить коррекцию формы поверхностей любой формы и габаритов как с малым, так и значительным съемом материала, и латеральными размерами неоднородностей от десятков миллиметров до сотых долей микрометра (диапазон пространственных частот до $9.5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$).

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П в части разработки методик и исследования параметров ионных пучков, и государственного задания FFUF-2024-0022 в части модернизации технологического оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.R. Conrad, J.L. Radtke, R.A. Dodd, F.J. Worzala, N.C. Tran. *J. Appl. Phys.*, **62** (11), 4591 (1987). DOI: 10.1063/1.339055
- [2] G. Dearnaley, K. Kandiah, R.S. Nelson. *Phys. Bull.*, **20**, 165 (1969). DOI: 10.1088/0031-9112/20/5/002
- [3] L.N. Allen, H.W. Romig. *Proc. SPIE*, **1333**, 22 (1990). DOI: 10.1117/12.22786
- [4] S.R. Wilson, D.W. Reicher, J.R. McNeil. *Proc. SPIE*, **966**, 74 (1988). DOI: 10.1117/12.948051
- [5] N.P. Eisenberg, R. Carouby, J. Broder. *Proc. SPIE*, **1038**, 279 (1988). DOI: 10.1117/12.951062
- [6] C. Hoffman, T.G. Giallorenzi, L.B. Slater. *Appl. Opt.*, **54** (31), F268 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.00F268
- [7] А.К. Акопов, М.Н. Брычихин, Ю.А. Пластинин, А.А. Ризванов, И.Л. Струля, Я.О. Эйхорн, И.В. Малышев, А.Е. Пестов, В.Н. Полковников, М.Н. Торопов, Н.И. Чхало. *Космонавтика и ракетостроение*, **4** (78), 77 (2014).
- [8] Ch. Wagner, N. Harned. *Nat. Photonics*, **4**, 24 (2010). DOI: 10.1038/nphoton.2009.251
- [9] Y. Platonov, J. Rodriguez, M. Kriese, E. Gullikson, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita. *Proc. SPIE*, **8076**, 80760N-2 (2011). DOI: 10.1117/12.889519
- [10] М.М. Барышева, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашенко, 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]
- [11] M. Born, E. Wolf. *Resolving power of image-forming system. In Principles of Optics* (Cambridge University, 1999), Sec. 8.6.2, p. 461.
- [12] M. Born, E. Wolf. *Tolerance conditions for primary aberrations. In Principles of Optics* (Cambridge University, 1999), Sec. 9.3, p. 528.
- [13] K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura, H. Iwata. *Proc. SPIE*, **6921**, 69210Q (2008). DOI: 10.1117/12.772435
- [14] N.I. Chkhalo, E.B. Klunokov, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.G. Raskin, N.N. Salashchenko, L.A. Suslov, M.N. Toropov. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **603** (1-2), 62 (2009). DOI: 10.1016/j.nima.2008.12.160
- [15] M. Idir, L. Huang, N. Bouet, K. Kaznatcheev, M. Vescovi, K. Lauer, R. Conley, K. Rennie, J. Kahn, R. Nethery, L. Zhou. *Rev. Sci. Instrum.*, **86** (10), 016120 (2015). DOI: 10.1063/1.4934806
- [16] W. Liao, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou. *Appl. Opt.*, **53** (19), 4266 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.004266
- [17] W. Liao, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou. *Appl. Opt.*, **53** (19), 4275 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.004275
- [18] M. Xu, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou, W. Liao. *Appl. Opt.*, **54** (27), 8055 (2015). DOI: 10.1364/AO.54.008055
- [19] A. Schindler. *Tutorial on Recent Advances in Ion Beam and Plasma Jet Processing* (Optical Fabrication and Testing 2012, Monterey, California United States 24–28 June 2012), p. OW4D.1.
- [20] O. Schmelzer, R. Feldkamp. *Proc. SPIE*, **9633**, 96330E (2015). DOI: 10.1117/12.2196871
- [21] Th. Arnold, G. Boehm, H. Paetzelt, F. Pietag. *Proc. SPIE*, **9442**, 944204 (2015). DOI: 10.1117/12.2175491
- [22] N.I. Chkhalo, S.A. Churin, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Zorina. *Appl. Opt.*, **55** (6), 1249 (2016). DOI: 10.1364/AO.55.001249
- [23] W. Liao, Y. Dai, X. Xie, L. Zhou. *Appl. Opt.*, **52** (16), 3719 (2013). DOI: 10.1364/AO.52.003719
- [24] A. Keller, S. Facsko, W. Moller. *J. Phys.*, **21**, 495305 (2009). DOI: 10.1088/0953-8984/21/49/495305
- [25] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.opteg.com>
- [26] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.meyerburger.com/>
- [27] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ntg.de/>
- [28] N.I. Chkhalo, I.A. Kaskov, I.V. Malyshev, M.S. Mikhaylenko, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.N. Toropov, I.G. Zabrodin. *Prec. Eng.*, **48**, 338 (2017). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.01.004
- [29] A.M. Karger. *Appl. Opt.*, **12** (3), 451 (1973). DOI: 10.1364/AO.12.000451

- [30] L.A. Cherezova, A.V. Mikhailov, A.P. Zhevlakov. *J. Opt. Technol.*, **73** (11), 812 (2006). DOI: 10.1364/JOT.73.000812
- [31] М.В. Зорина, И.М. Нефедов, А.Е. Пестов, Н.Н. Салашченко, С.А. Чурип, 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. Invest.*, **9**, 765 (2015).] DOI: 10.7868/S0207352815080193
- [32] M.S. Mikhailenko, A. Chernyshev, N. Chkhalo, I. Malyshev, A. Pestov, R. Pleshkov, R. Smertin, M. Svechnikov, M. Toropov. *Prec. Eng.*, **69**, 29 (2021). DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.01.006
- [33] А.И. Артюхов, С.С. Морозов, Д.В. Петрова, Н.И. Чхало, Р.А. Шапошников. *ЖТФ*, **94** (8), 1295 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58557.165-24
- [34] 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