

ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЯ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Мартынов М.И., Михнев Р.А., Семенов А.П., Штандель С.К.
ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

Для обработки исполнительных поверхностей прецизионных оптических деталей в настоящее время используются технология и оборудование, реализующие в процессе обработки метод притира, ряд факторов которого затрудняет и ограничивает возможность достижения высоких точностей формы поверхности. К таким факторам относятся деформации и износ поверхности полировальника под действием усилия на притир, структура поверхности полировальника, тепловые деформации поверхности изделия и др. [5].

Тенденция современного развития точного приборостроения приводит к необходимости применения, а следовательно, и обработки оптических деталей с точностью формы их исполнительных поверхностей по СКО до $\lambda/100$ (5,3...6,3 нм) и выше [1, 3, 4, 31].

В работах [6-30] рассматриваются вопросы теоретических закономерностей и зависимости процесса ИЛО, научного обоснования и разработки технологии и оборудования применительно к ИЛО металлов, кристаллов, полупроводников и диэлектриков для нужд электронного приборостроения.

Однако в этих работах не определяются метрологические показатели процесса ИЛО, которые позволяют оценивать возможности и критерии применения ИЛО для этих целей.

Применительно к микроразмерной обработке, доводке и ретуши исполнительных поверхностей оптических деталей необходимо использовать ИЛО в нейтральной среде, поскольку в химически активной

среде, при которой распыление материала сопровождается процессами химического воздействия с поверхностью детали пучка ионов, при ИЛО оптических деталей из химически нестойких и налетоопасных оптических стекол и сред появляются изменения структуры и дефекты качества поверхности.

Процесс ИЛО при физическом взаимодействии пучка ионов рабочего инертного газа с поверхностью детали из оптического стекла различных марок и сред в процессе ее распыления может быть охарактеризован зависимостями, указанными в [6-8]. При этом параметры, условия и эффективность процесса распыления определяются энергетическими и геометрическими характеристиками пучка ионов, воздействующего на оптический материал, свойствами такого материала, а также необходимым давлением и составом среды, в которой осуществляется процесс ИЛО.

Энергетические и геометрические характеристики пучка ионов обеспечиваются источниками ионов (ИИ) определенного типа, а давление и состав среды – откачной вакуумной системой и устройством подачи (натекания) рабочего газа.

Из числа известных [13-15] наиболее полно этим требованиям удовлетворяют ИИ типа Кауфмана-Пеннинга.

Таким образом, в случае применения ИЛО для малоразмерной обработки, доводки и ретуши оптических деталей единственными метрологическими показателями для всех стадий процесса ИЛО являются:

1. Энергетические характеристики пучка ионов в зоне его воздействия на поверхность детали:

- энергия E_n (эВ) и мощность N_n (Вт) пучка ионов;

- ионный ток J^+ (мА) пучка ионов;

- плотность ионного тока j_0^+ (мА/см²) по сечению пучка ионов, направленно воздействующего на поверхность детали.

2. Геометрические характеристики пучка ионов в зоне его воздействия на поверхность детали:

- диаметр пучка ионов D_n (мм);

- вид кривой распределения плотности ионного тока по сечению пучка

ионов $j^+(r_n) = f(j_0^+, r_n)$, адекватного распределению концентрации ионов, захваченных материалом в процессе его распыления в зоне воздействия пучка ионов на поверхность детали, ограниченной диаметром пучка ионов, которое является Гауссовым распределением.

3. Давление среды – вакуум в объеме технологической камеры установки для ИЛО, при котором осуществляется процесс распыления.

4. Состав среды, в которой осуществляется процесс распыления, по количеству рабочего инертного газа.

5. Технологические показатели процесса ИЛО, характеризующие свойства оптического материала:

- скорость распыления V_p (мкм/мин, мкм/час, нм/с);

- коэффициент распыления S_p (атом/ион).

Приведенные ниже метрологические показатели процесса ИЛО были определены при использовании данных [6-9, 10-26, 32-38], а также результатов исследований процесса ИЛО образцов деталей из различных оптических материалов и ситалла, выполненных авторами.

Энергия пучка ионов $E_{\text{п}}$ должна быть больше пороговой, затрачиваемой в процессе распыления материала.

По данным [7] пороговая энергия пучка ионов

$$E_{\text{п}} = E_{\text{торм}} + E_{\text{смещ}} + E_{\text{расп}},$$

где $E_{\text{торм}}$ – энергия тормозной способности ионов материала; $E_{\text{смещ}}$ – энергия смещения атомов материала из равновесного состояния; $E_{\text{расп}}$ – энергия, затрачиваемая на отрыв частиц материала от поверхности.

Для стекла К8 $E_{\text{п макс}} = 4,52 \times 10^{-16}$ Дж (2,82 кэВ).

По данным [6] энергия пучка ионов $E_{\text{п}} = eU_{\text{уск}}$, что позволяет указать рекомендуемые значения метрологического показателя ИОС ИИ – ускоряющего напряжения пучка ионов $U_{\text{уск}} = E_{\text{п}} / e$, где $e = 1,602 \times 10^{-19}$ Кул – заряд электрона (однозарядного иона). Например, при $E_{\text{п макс}} = 2,82$ кэВ для стекла К8 ускоряющее напряжение пучка ионов $U_{\text{уск}} = 2,82$ кВ.

Если $E_{\text{п}} = 0,5 \dots 5$ кэВ, то при ИЛО оптических материалов и сред рекомендуется устанавливать $U_{\text{уск}} = 0,5 \dots 5$ кВ.

Плотность ионного тока пучка ионов j_0^+ является обобщенным метрологическим показателем процесса ИЛО.

По данным [6] и [8] плотность ионного тока элементарного пучка ионов, сформированного единичным отверстием или щелью ИОС ИИ, выражается законом «трех вторых» Чайлд-Ленгмюра:

$$j^+ = f(U_{\text{уск}}, d) = K \frac{U_{\text{уск}}^{3/2}}{d^2},$$

где $K = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{e}{M}}$ – коэффициент пропорциональности, в котором:

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м; $M = M_1 m = 6,6 \times 10^{-26}$ кг – масса иона вещества рабочего газа ($M_1 = 40$ – относительная атомная масса иона аргона), $m = 1,67 \times 10^{-27}$ кг – масса элементарной частицы; $U_{\text{уск}}$ – ускоряющее напряжение ИОС ИИ; $d = t_1 = d_1 = \delta_2$ – эффективный размерный параметр ИОС ИИ, изменение которого осуществляется настройкой ИОС для получения требуемого диаметра пучка ионов D_n . Здесь: t_1 – толщина эмиссионного электрода (ЭЭ) ИОС ИИ; d_1 – расстояние между эмиссионным и ускоряющим электродом (УЭ); δ_2 – радиус отверстия в электродах ИОС ИИ.

Для получения пучка ионов с требуемой геометрической характеристикой по диаметру пучка ионов D_n настройка ИОС ИИ осуществляется путем использования электродов ИОС с большими или меньшими по величине δ_2 отверстиями при сохранении длины ускоряющего промежутка d_1 или путем изменения d_1 при сохранении величины δ_2 отверстий в электродах постоянными.

Анализ закона «трех вторых» показывает, что наибольшая плотность ионного тока j_0^+ обеспечивается при максимальном значении $U_{\text{уск}}$ и минимальной величине d . Однако величина параметра d не может быть меньше определенной критической величины, так как толщину t_1 ЭЭ нельзя сделать меньше 1...1,5 мм по условиям теплоотвода и механической прочности, а длину d_1 нельзя уменьшить до значений, при которых возможно возникновение пробоев по $U_{\text{уск}}$.

Распределение плотности ионного тока по сечению пучка ионов $j^+(r_n) = f(j_0^+, r_n)$ является Гауссовым распределением, при котором текущие значения плотности ионного тока по сечению пучка ионов характеризуются выражением: $j^+(r_n) = j_0^+ e^{-1/2(\pi r_n / \sigma)^2}$, где j_0^+ – максимальное значение плотности ионного тока в пучке ионов; $e = 2,718...$; r_n – текущее значение радиуса сечения пучка ионов; σ – параметр, определяемый настройкой ИОС ИИ для получения требуемого диаметра пучка ионов $D_n = 2r_n$.

По данным [7] распределение концентрации ионов и величины пробегов в материале адекватно распределению плотности ионного тока по сечению пучка ионов в этой зоне, и поэтому это распределение может быть использовано для характеристики распределения съема – распыления материала.

В программном обеспечении автоматизированного формообразования оптических деталей методом притира распределение съема поверхности в зоне воздействия инструмента характеризуется кривой профиля съема, отображающего динамику распределения съема по глубине.

Следовательно, показатели и параметры распределения плотности ионного тока по сечению пучка ионов в качестве метрологических показателей процесса ИЛО возможно использовать в программном обеспечении автоматизированного формообразования поверхностей для характеристики кривой профиля съема и определения коэффициентов профиля съема материала при ИЛО поверхности детали малоразмерным пучком ионов.

Ионный ток J^+ характеризуется [6] выражением:

$J^+ = j_{cp}^+ S_n$ при ориентировочной оценке;

$$J^+ = 2\pi j_0^+ \int_0^{r_n} e^{-\frac{1}{2}(r_n/\sigma)^2} r_n dr_n \text{ – при точной оценке,}$$

где S_n – площадь пучка ионов при диаметре D_n , соответствующем уровню $j_r^+ = 0,1 j_0^+$ кривой распределения плотности ионного тока по сечению пучка ионов.

Ионный ток J^+ пучка ионов используется как настроечный метрологический показатель процесса ИЛО и измеряется непосредственно во время настройки ИОС ИИ на требуемый диаметр D_n и плотность ионного тока j_0^+ пучка ионов.

Мощность пучка ионов N_n характеризует энергетическую нагруженность воздействия пучка ионов на поверхность детали. По данным [6] мощность пучка ионов $N_n = J^+ U_{\text{уск}}$.

Давление среды в объеме технологической камеры установок для ИЛО регламентируется значениями, при которых обеспечиваются необходимые условия эффективности процесса ИЛО.

В соответствии с условиями в [7], а также данными [18] о значениях $P_{\text{кон}}$ при ИЛО некоторых оптических материалов рекомендуется метрологический показатель $P_{\text{кон}}$ устанавливать в пределах $P_{\text{кон}} = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм рт.ст. При этом $P_{\text{кон}} = P_{\text{нач}} + \Delta P$, а ΔP соответствует увеличению давления после напуска рабочего газа с требуемым расходом $q_{\text{арг}}$, достаточным для эффективного распыления материала.

Состав среды, в которой осуществляется процесс ИЛО, образуется путем использования инертного рабочего газа – аргона газообразного высшей кате-гории качества ГОСТ 10157-79, количество которого в среде регламентируется величиной расхода аргона $q_{\text{арг}}$ – натекания его в объем технологической камеры установки для ИЛО во время включения и работы ИИ.

При этом величина расхода $q_{арг}$ должна обеспечивать достаточную степень ионизации плазмы рабочего газа и эффективные технологические показатели распыления материала.

Технологические показатели процесса ИЛО – скорость V_p и коэффициент S_p распыления оптических материалов характеризуют их способность к распылению частиц материала под воздействием пучка ионов определенной энергонагруженности.

Скорость и коэффициент распыления, применительно к ИЛО для микроразмерной обработки, доводки и ретуши высокоточных исполнительных поверхностей оптических деталей, являются метрологическими показателями процесса ИЛО при установлении дозы и времени ИЛО точек или зон поверхности детали для обеспечения требуемого съема (распыления) материала в этих точках или зонах и достижения регламентированной точности формы поверхности.

В целях определения и апробации оптимальных значений метрологических показателей (E_n , N_n , $U_{уск}$, j_0^+ , J^+ , $P_{кон}$, $q_{арг}$), а также установления технологических показателей процесса ИЛО (V_p , S_p) проведены исследования процесса ИЛО образцов деталей из некоторых оптических материалов и ситалла, применяемых для крупногабаритных оптических деталей, с использованием стенда для аттестации и паспортизации ИИ установок для ИЛО оптических деталей.

Схема стенда представлена на рис.1.

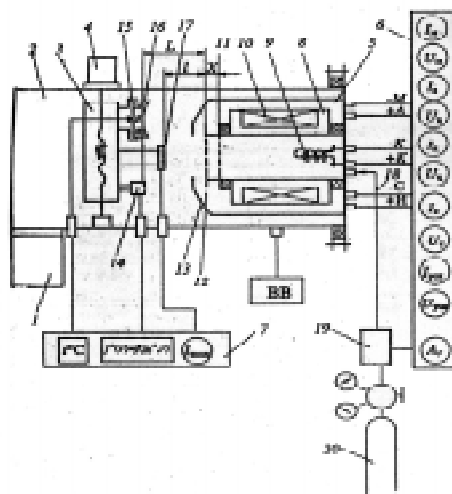


Рис.1. Схема стенда для исследований и аттестации источника ионов

Стенд является вакуумной установкой с откачной системой 1, на технологической камере 2 которой монтируется ИИ 5. Внутри камеры на каретке 3, снабженной механизмом 4 ее установочных перемещений, находятся: датчик 14 энергетических характеристик пучка ионов типа цилиндра Фарадея [9], держатель 15 подвергаемого ИЛО образца 16 и заслонка 17 – имитатор технологической заслонки установки для ИЛО, перекрывающей пучок ионов от воздействия на поверхность детали. ИИ выполнен в виде съемного блока, к которому через разъемы подключается электропитание рабочих органов ИИ: анода 8, катода 9, магнита 10, эмиссионного электрода 11, выходного электрода 13, ускоряющего электрода 12, а также ввод 18 подачи в ИИ рабочего газа. Подача рабочего газа осуществляется от баллона 20 через нагнетатель 19, управление которым осуществляется с пульта 6, а необходимый расход газа устанавливается путем соответствующего изменения давления в камере, измеряемого вакуумметром ВВ.

Стенд снабжен пультом 6 управления режимом электропитания отдельно для каждого рабочего органа ИИ, на котором смонтированы приборы регистрации тока и напряжения: катода J_k и U_k , анода J_a и U_a , магнита J_m и U_m , ускоряющего электрода $J_{уск}$ и $U_{уск}$, эмиссионного электрода J_c и U_c . Кроме того, стенд снабжен пультом 7, на котором смонтированы приборы регистрации: энергетических (j^+) и геометрических (D_n) характеристик пучка ионов – графопостроитель XY RECORDER тип 622.021 endim; тока пучка $j_{засл}^+$, поступающего на заслонку 17, – тестер типа 43101; температуры нагрева образца при ИЛО – осциллограф типа С1-112А, подключенный через «хромель-копель» термопару к торцу образца.

Настройка ИЛО ИИ для получения пучка ионов с требуемыми энергетическими и геометрическими характеристиками в зоне соприкосновения с поверхностью образца для каждого определенного режима электропитания рабочих органов ИИ выполняется перед установкой ИИ на камеру стенда. Настройка осуществляется подбором элементов ИОС ИИ по количеству, диаметру и взаимному расположению отверстий в электродах ИОС, с последующим их закреплением и соблюдением величины ускоряющего промежутка X между электродами при строгом соотношении расположения отверстий электродов ИОС.

Измерение и регистрация энергетических и геометрических характеристик пучка ионов, образованного и сформированного ИОС ИИ, осуществляется при фиксированном положении ускоряющего электрода относительно входного отверстия датчика характеристик пучка ионов,

совмещенного в одной вертикальной плоскости с поверхностью образца, подвергаемой ИЛО (на расстоянии L), и поверхности заслонки (на расстоянии l).

Образец детали, для оптического материала которой устанавливаются метрологические и технологические показатели процесса ИЛО, подвергается воздействию пучка ионов, предварительно сформированного по заданным исходным данным режима процесса ИЛО (j_0^+ , $U_{\text{уск}}$, $q_{\text{арг}}$), рекомендуемым для этого вида материала, при определенных параметрах настройки ИОС ИИ ($n_{\text{отв}}$ и $D_{\text{отв}}$ в электродах, межэлектродный промежуток X) для получения требуемого диаметра $D_{\text{п}}$ пучка ионов. При этом фиксируются фактические значения режима электропитания рабочих органов ИИ, метрологических показателей пучка ионов и распределение плотности тока $j^+(r_{\text{п}}) = f(j_0^+, D_{\text{п}})$.

В результате воздействия такого пучка ионов с длительностью экспозиции τ на поверхности образца в зоне, ограниченной диаметром пучка ионов, происходит определенный съем (распыление) материала.

Сопоставление данных [25, 27], относящихся к воздействию на поверхность малоразмерного пучка ионов при ИЛО, с аналогичными данными [2, 33, 36] для поверхности, подвергаемой воздействию малоразмерного инструмента при формообразовании поверхности методом притира, свидетельствует об адекватности закономерностей распределения величин и вида профилей съема материала поверхности, наблюдаемых при ИЛО и формообразовании методом притира. Поэтому величина и профиль съема материала при ИЛО по сечению зон взаимодействия пучка ионов с поверхностью определяются с использованием методики и программного обеспечения, апробированных при автоматизированной обработке крупногабаритных оптических деталей малоразмерным инструментом [38]. При этом диаметр малоразмерного инструмента $D_{\text{инстр}}$ принимается равным диаметру зоны взаимодействия пучка ионов с поверхностью, которая приравнивается диаметру пучка ионов $D_{\text{п}}$, зафиксированному на уровне $0,1 j_0^+$ распределения плотности тока по сечению пучка ионов $j_0^+(r_{\text{п}}) = f(j_0^+, r_{\text{п}})$, когда наблюдается стабильно установившееся минимальное значение $j^+(r_{\text{п}})_{\text{мин}}$ плотности тока по сечению пучка ионов.

Таблица 1

Показатели процесса ИЛО образцов

Марка стекла	Условия и показатели ИЛО образца				Величина съема поверхности, мкм			Технологические показатели ИЛО материала	
	$q_{\text{арг}}$	$U_{\text{уск}}$	j_0^+	$N_{\text{п}}$	τ_1 экспозиции пробы, мин			V_p	S_p
	см ³ /с	кВ	мА/см ²	Вт	5	10	20	мкм/мин	атом/ион
ЛК5 ТФ105	0,24	5	0,5	3,1	0,251 0,171	0,469 -	0,686 -	0,01213 0,01100	1,185 0,949
К8 ЛК5 ТФ105 ОФ4 СО115М	0,24	5	1,0	6,2	- 0,190 0,103 -	- 0,329 0,168 0,176	1,341 0,504 0,260 0,256	0,01586 0,00543 0,00531 0,00647	0,805 0,265 0,228 0,394
К8 ОФ4	0,24	3,5	1,0	4,34	0,107 0,071	0,171 0,132	0,327 0,240	0,00382 0,00526	0,194 0,320
К8 ЛК5	0,24 0,24	5 3,5	2,0 2,0	12,4 8,68	0,109 -	0,214 0,169	0,497 0,176	0,00536 0,00499	0,136 0,122
К8 ЛК5	0,96	3,5	0,5	2,17	- -	0,118 0,127	0,251 0,200	0,00433 0,00481	0,440 0,470
К8 ЛК5 ОФ4 СО115М	0,96	5	1,0	6,2	0,254 0,151 0,132 -	0,376 0,284 0,258 0,178	0,626 0,471 0,452 0,267	0,01169 0,00836 0,01158 0,00849	0,594 0,408 0,704 0,425
К8 ЛК5 ОФ4 СО115М	0,96	3,5	1,0	4,34	0,143 0,101 0,139 -	0,251 0,241 0,239 0,159	0,539 0,410 0,518 0,285	0,01146 0,00906 0,01243 0,00665	0,582 0,442 0,756 0,333
К8 ЛК5	0,96	5	2,0	12,4	- 0,577	0,322 0,856	0,960 1,141	0,01238 0,01793	0,314 0,438
К8 ЛК5	0,96	3,5	2,0	8,68	0,405 0,188	0,635 0,325	1,088 0,733	0,01878 0,01414	0,477 0,345

Для образца детали после проведения сеанса ИЛО с различной длительностью τ экспозиции проб ИЛО фиксируется интерферограмма поверхности, на которой наблюдается зона воздействия пучка ионов и искажения интерферограммы в этой зоне. Производится расшифровка интерферограммы, и для каждой из зон воздействия пучка ионов на поверхность строится кривая профиля съема, которая представляет собой график $h_{\text{съема}} = f(D_{\text{п}})$.

Результаты ИЛО при диаметре пучка ионов $D_{\text{п}} = 20$ мм, различных метрологических показателей и условиях проведения проб сеансов ИЛО для некоторых оптических материалов и ситалла представлены в таблице 1.

Анализ результатов ИЛО рассмотренных оптических материалов и ситалла, наряду с оценкой внешнего вида, интерферограмм и графиков профиля съема поверхности образцов после проб сеансов ИЛО, показывает, что:

1. Увеличение длительности τ экспозиции ИЛО в рассмотренных вариантах энергонагруженности пучка ионов и расхода аргона приводит к увеличению $h_{\text{съема}}$ поверхности.

2. Величина $h_{\text{съема}}$ поверхности при одной и той же энергонагруженности пучка ионов и аналогичных расходах аргона для одинаковых значений длительности τ экспозиции ИЛО у различных материалов различна, т.е. $h_{\text{съема}} \text{ К8} > h_{\text{съема}} \text{ ЛК5} > h_{\text{съема}} \text{ ОФ4} > h_{\text{съема}} \text{ СО115М}$. Сопоставление этих данных с аналогичными данными рассматриваемых оптических материалов по съему поверхности при шлифовании и полировании методом притира показывает, что при ИЛО и обработке методом притира они проявляются идентично.

3. Минимальная длительность экспозиции сеанса ИЛО для рассмотренных примеров энергозагруженности пучка ионов и расхода аргона, при которой достигается минимально возможная, фиксируемая интерференционным контролем, величина $h_{\text{съема}} \approx 0,01 \dots 0,03$ мкм, составляет $0,5 \text{ мин.} < \tau_{\text{эксп}} < 3 \text{ мин.}$

4. Увеличение энергонагруженности пучка ионов для рассмотренных вариантов длительности τ экспозиции ИЛО приводит к увеличению $h_{\text{съема}}$ поверхности. Величина энергонагруженности пучка ионов при ИЛО оптических материалов обусловлена определенными ограничениями. Данные о минимальной и максимальной допустимой энергонагруженности пучка ионов при ИЛО оптических материалов отсутствуют. Минимальная энергонагруженность пучка ионов должна быть достаточной для обеспечения эффективного распыления материала и, как показано выше,

превышать пороговое значение энергонагруженности. При применении ИЛО для микроразмерной обработки, доводки и ретуши высокоточных исполнительных поверхностей оптических деталей минимальная энергонагруженность пучка ионов должна быть достаточной для обеспечения такого $h_{\text{сьема}}$, при котором точность формы поверхности видоизменяется в пределах значений, измеряемых сотыми долями микрона, и фиксируется интерференционными методами контроля. Минимальная величина $h_{\text{сьема}}$ наблюдается при минимальной энергонагруженности пучка ионов по плотности ионного тока $0,5 \text{ мА/см}^2 < j_0^+ < 1,0 \text{ мА/см}^2$ и мощности тока пучка $2,1 \text{ Вт} < N_{\text{п}} < 6,2 \text{ Вт}$. Максимальная энергонагруженность пучка ионов ограничена недопустимостью таких ее значений, при которых после сеанса ИЛО $h_{\text{сьема}}$ в зоне воздействия пучка ионов достигает значений, не фиксируемых интерференционными методами контроля. Кроме того, максимальная энергонагруженность пучка ионов при ИЛО высокоточных оптических деталей ограничена недопустимостью такого нагрева деталей в процессе ИЛО, при котором возникают остаточные термические деформации поверхности, превышающие допустимые отклонения точности ее формы.

Максимальная допустимая энергонагруженность пучка ионов для оговоренных ограничений составляет по плотности ионного тока $j_0^+ < 2,0 \text{ мА/см}^2$ и мощности тока пучка $N_{\text{п}} < 12,4 \text{ Вт}$.

5. Увеличение расхода аргона при ИЛО для всех рассмотренных оптических материалов и ситалла при фиксированных параметрах приводит к увеличению $h_{\text{сьема}}$. Данные об оптимальных величинах расхода аргона при ИЛО оптических материалов отсутствуют. В нашем случае применения ИЛО минимальный расход аргона должен быть достаточным для обеспечения такой энергонагруженности пучка ионов, при которой за минимальную длительность τ экспозиции воздействия пучка ионов достигается $h_{\text{сьема}}$, фиксируемое интерференционными методами контроля. Для всех рассмотренных вариантов энергонагруженности и длительности τ экспозиции пучка ионов $h_{\text{сьема}}$ наблюдается при минимальном расходе аргона $q_{\text{арг}} > 0,06 \text{ см}^3/\text{с}$.

Максимальный расход аргона ограничен необходимостью обеспечения стабильной работы ИИ на всех стадиях образования и формирования пучка ионов с требуемой энергонагруженностью в течение всего сеанса ИЛО детали, не вызывая при этом недопустимого теплообразования в ИИ за счет увеличения энергии соударений ионов при ионизации плазмы рабочего газа, приводящего к прекращению функционирования ИИ. Эти требования для ИИ типа

Кауфмана и Пеннинга установок для ИЛО оптических деталей мод. У343 и У450 обеспечиваются при максимальном расходе аргона $q_{\text{арг}} \leq 0,96 \text{ см}^3/\text{с}$.

Таблица 2

Метрологические показатели процесса ИЛО

Показатель	Ед.измерения	Значение
Пороговая энергия пучка ионов $E_{\text{п}}$	кэВ	0,5...5,0
Ускоряющее напряжение ИОС ИИ $U_{\text{уск}}$	кВ	0,5...5,0
Плотность ионного тока пучка ионов j_0^+	мА/см ²	0,5...5,0
Мощность ионного тока пучка ионов $N_{\text{п}}$	Вт	при $D_{\text{п}} = 20 \text{ мм}$ до 12,4
Давление среды после напуска рабочего газа $P_{\text{кон}}$	мм рт.ст.	$10^{-5} \dots 10^{-4}$
Расход рабочего газа – аргона $q_{\text{арг}}$	см ³ /с	0,1...1,0
Длительность экспозиции пучка ионов τ	мин	0,5...3,0

Учитывая полученные расчетные значения метрологических показателей ИЛО для стекла К8, данные об этих показателях [6-15] для кремния, кварца и некоторых оптических материалов, результаты исследований процесса ИЛО оптических материалов и ситалла, приведенные в табл.1, и их анализ, а также апробацию ИЛО крупногабаритных оптических деталей из различных материалов на установке для ИЛО мод. У343, рекомендуется метрологические показатели процесса при ее применении для автоматизированной программно управляемой микроразмерной обработки, доводки и ретуши высокоточных исполнительных поверхностей оптических деталей назначить по данным, приведенным в табл.2.

Скорость распыления $V_{\text{р}}$ приравнивается к скорости съема $V_{\text{техн}}$ поверхности образца детали, прошедшего ИЛО, с определенной длительностью τ экспозиции и принятой энергонагруженностью пучка ионов, при которой распределение плотности ионного тока $j^+(r_{\text{п}})$ по сечению пучка ионов адекватно распределению величины съема материала по сечению пучка ионов, характеризуемому зависимостью профиля съема $h_{\text{съема}} = f(D_{\text{п}})$.

Скорость съема $V_{\text{техн}}$ по данным [38] определяется зависимостью $V_{\text{техн}} = 0,316k/\tau$, где k – средняя величина съема поверхности образца детали, прошедшего ИЛО, для зоны обработки, ограниченной диаметром $D_{\text{п}}$ пучка ионов, в долях ширины интерференционной полосы, τ – длительность

экспозиции пучка ионов для пробы в процессе ИЛО поверхности образца детали, мин.

Скорость съема $V_{\text{техн}}$ устанавливается по нескольким величинам $V_{\text{техн } i}$, определенным при различных значениях длительности экспозиции τ_i , т.е.

$$V_{\text{техн}} = \sum_i^n V_{\text{техн } i} / n, \text{ где } V_{\text{техн } i} - \text{ скорость съема при определенной величине}$$

длительности τ_i экспозиции пробы сеанса ИЛО, n – число проб сеанса ИЛО, проведенных для определения $V_{\text{техн } i}$.

Коэффициент распыления S_p определяется [7] зависимостью:

$$S_p = \frac{eN_A\rho}{j_{cp}^+ M_2} V_p a_2,$$

где $e = 1,602 \times 10^{-19}$ Кул/ион – заряд однозарядного иона; $N_A = 6,02 \times 10^{23}$, 1/Моль – число Авогадро; ρ – плотность распыляемого оптического материала; V_p – скорость распыления оптического материала; j_{cp}^+ – усредненная величина плотности ионного тока пучка ионов, соответствующая средней величине съема k поверхности образца, по которой определяется значение скорости распыления V_p материала.

Значения скорости V_p и коэффициента S_p распыления для рассмотренных оптических материалов и ситалла, определенные при ИЛО образцов деталей из этих материалов и принятых энергонагруженности пучка ионов и расходе аргона, приведены в табл.1.

Для сравнительной оценки свойств различных оптических материалов при аналогичных условиях и показателях процесса ИЛО, которые являются аттестационными и составляют по плотности ионного тока $j_0^+ = 1$ мА/см² и скорости распыления $V_p = 0,01$ мкм/мин., рекомендуется использовать

выражение $S_p = 1,6 \frac{\rho}{M_2} a_2$, содержащее только параметры, характеризующие свойства материала.

В целях применения ИЛО для малоразмерной обработки, доводки и ретуши крупногабаритных оптических деталей, к исполнительным поверхностям которых предъявляются требования точности формы по СКО менее $\lambda/50$ (10,6...12,6 нм), а также промышленной апробации технологии автоматизированной программно управляемой ИЛО таких деталей из

различных оптических материалов и с различными радиусами кривизны исполнительных поверхностей, Лыткаринским заводом оптического стекла (ОАО ЛЗОС) разработана, изготовлена и апробирована установка мод. У343 для ИЛО оптических деталей диаметром от 200 до 600 мм.

Установка, принципиальная схема которой представлена на рис.2, состоит из технологической вакуумной камеры 1 с неподвижными ИИ 7, стола 9 для координатных перемещений закрепленной на нем обрабатываемой детали, заслонки 6 для перекрытия пучка ионов, натекателя рабочего газа 8, стойки управления 5, системы 2 электропитания рабочих органов ИИ, регулируемого привода 10 («Размер 2 Н-5-21») перемещения стола, системы ЧПУ 3 («Маяк 223») для программного управления технологическим циклом сеанса ИЛО.

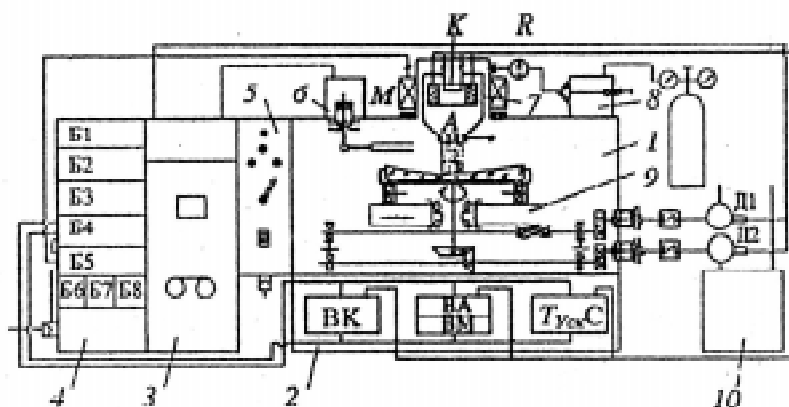


Рис.2. Принципиальная схема установки У-343

Основные технические характеристики установки:

1. Размеры детали, мм – диаметр от 200 до 600, высота до 100.
2. Объем технологической камеры, м³ – 0,91.
3. Вакуум в рабочем пространстве камеры, мм рт.ст. (Па) – до 10⁻⁵ (до 1,33×10⁻³).
4. Скорость перемещения стола при бесступенчатом регулировании:
 - линейная, мм/мин – 0,1...10;
 - окружная, об/мин – 0,5...5.
5. Установочная мощность, кВт – 20.

6. Установочная площадь, m^2 – 12,1.
7. Электропитание рабочих органов источника ионов:
 - ток катода I_k , А – до 300;
 - напряжение катода U_k , В – до 20;
 - ток анода I_a , А – 5...100;
 - напряжение анода U_a , В – 60...20;
 - ток магнита I_m , А – 0,5...5;
 - напряжение магнита U_m , В – до 20;
 - ток ускоряющий $I_{уск}$, мА – до 30;
 - напряжение ускоряющее $U_{уск}$, кВ – до 3,5.
8. Показатели пучка ионов, образованного и сформированного ИИ:
 - диаметр D_n , мм – от 30 до 80;
 - энергия E_n , кэВ – до 3,5;
 - мощность N_n , Вт – до 122,5;
 - ток ионный (по аргону) $j_{засл}^+$, мА – до 35;
 - плотность ионного тока j_0^+ , мА/см² – 0,5...5.

Схема компоновки узлов установки выполнена с вертикальным расположением осей ИИ и обрабатываемой детали, при верхнем расположении неподвижного ИИ и нижнем расположении детали на столе, осуществляющем установочные координатные перемещения детали для совмещения точек и зон поверхности детали, подвергаемых ИЛО, соосно ИИ.

Такая схема компоновки исключает ряд недостатков схем существующих опытных образцов установок для ИЛО оптических деталей [12-15] и позволяет:

- применять и при необходимости устанавливать непосредственно на столе устройства торцевой разгрузки того или иного вида крупногабаритных оптических деталей, что невозможно при верхнем (над ИИ) или боковом расположении детали;

- избежать проявления нарушений электроизоляции на вводах электропитания рабочих органов ИИ, если бы он был подвижным.

В установке мод. У343 применен ИИ типа Кауфмана, снабженный двухэлектродной (ЭЭиУЭ) ИОС. Такой источник, как показала его аттестация и паспортизация на стенде (см. рис.1), а также апробация непосредственно на установке мод. У343, обеспечивает, наряду с высокой моноэнергетичностью ионов в пучке ($\Delta E_n / E_n \sim 10^{-4}$), хорошую фокусировку

и направленность пучка, при расходимости пучка до 2° , а также Гауссово распределение плотности ионного тока по сечению пучка ионов.

Технологический процесс автоматизированной ИЛО оптических деталей, реализуемый на установке мод. У343, заключается в следующем. Поверхности детали предварительно обрабатываются традиционными методами оптической технологии с возможно большей точностью формы и после соответствующего интерференционного контроля характеризуется ее исходной топограммой. На установке мод. У343 позиционирование пучка ионов на поверхности детали осуществляется в течение сеанса ИЛО по заданной программе в соответствии с управляющими командами системы ЧПУ установки путем вращения и возвратно-поступательных перемещений стола, с закрепленной на нем деталью, а также выдержки заслонки пучка ионов в открытом положении для необходимой дозы ИЛО точек и зон поверхности детали.

При эквидистантном съеме и очистке поверхности τ экспозиции для всех зон устанавливается равновеликим.

Апробирована микрогабаритная ИЛО исполнительных поверхностей крупногабаритных оптических деталей диаметром до 400 мм из оптического стекла ТФ4, ОФ1 и БФ4 с исходными СКО точности формы от $\lambda/4$ (133...158 нм) до $\lambda/20$ (27...32 нм).

Выполнена аттестация ИИ, определены условия и режимы проведения ИЛО на установке мод. У343 с учетом изложенных выше результатов, апробированы управляющие технологические программы автоматизированной ИЛО малоразмерным пучком.

К числу этих режимов и условий относятся:

1. Вакуум в рабочем пространстве технологической камеры установки, мм рт.ст.: до напуска рабочего газа – $P_{\text{нач}} = 0,5 \times 10^{-5}$, после напуска рабочего газа – $P_{\text{кон}} = 10^{-4}$.

2. Расход рабочего газа – аргона ($q_{\text{арг}}$) – до $1 \text{ см}^3/\text{с}$.

3. Параметры ИОС ИИ: электроды ИОС содержат по 91 отверстию диаметром 2,5 мм, ускоряющий промежуток $X = 2 \pm 0,1$ мм, расстояние от УЭ ИОС до заслонки $l = 60$ мм, до детали $L = 200$ мм.

4. Режим электропитания рабочих органов ИИ: ток и напряжение катода $I_{\text{к}} = 8 \dots 27 \text{ А}$, $U_{\text{к}} = 208 \text{ В}$; анода $I_{\text{а}} = 5 \text{ А}$, $U_{\text{а}} = 70 \text{ В}$; магнита $I_{\text{м}} = 1,6 \dots 2,8 \text{ А}$, $U_{\text{м}} = 20 \text{ В}$; ускоряющий ток и напряжение $I_{\text{уск}} = 20 \dots 30 \text{ мА}$, $U_{\text{уск}} = 2 \dots 3 \text{ кВ}$.

5. Характеристики пучка ионов: диаметр $D_{\text{п}} = 60 \dots 70$ мм, плотность ионного тока $j_0^+ = 0,48 \dots 0,64 \text{ мА/см}^2$, распределение плотности ионного

тока по сечению пучка – Гауссиана вида $j^+(r_n) = j_0^+ e^{-1/2(r_n/\sigma)^2}$ при

параметре $\sigma = \sqrt{\frac{r_{\Pi}^2}{4,6}}$, величина ионного тока на поверхности заслонки,

перекрывающей пучок в процессе ИЛО, $j_{засл}^+ = 15..25$ мА.

Результаты исследования показывают, что после ИЛО достигается регламентированное размерное улучшение точности формы исполнительных поверхностей оптических деталей с различными радиусами кривизны поверхности без ухудшения ее качества по шероховатости и оптической чистоте.

Достигнут уровень точности исполнительных поверхностей оптических деталей диаметром до 400 мм по СКО $\lambda/76$ (2...8 нм).

Эти результаты свидетельствуют, что автоматизированная программно управляемая малоразмерная ИЛО обеспечивает повышение по СКО точности формы исполнительных поверхностей крупногабаритных оптических деталей из различных оптических стекол, ранее обработанных по традиционной технологии методом притира, в 2...4,75 раза и подтверждают целесообразность применения автоматизированной программно управляемой малоразмерной ИЛО для получения высокоточных оптических деталей на уровне современных требований.

Литература

1. Справочник технолога-оптика. Ред. Кузнецов С.Н., Окатов М.А. – Л., Машиностроение, 1983.
2. Ветриченко Э.А., Прохоров А.М., Трушин Е.Е. Методы изготовления астрономической оптики. – М.; Наука, 1980.
3. Михнев Р.А., Штандель С.К. Оборудование оптических цехов. – М.; Машиностроение, 1991.
4. Рябов Н.В., Захаренков В.Ф. Активная и адаптивная оптика в крупногабаритных телескопах // Оптический журнал. – 1992. – №6.
5. Ашкерев Ю.В., Лохов Ю.Н., Мартынов Т.Ф. Исследование вязкоупругих свойств полировальных смол на основе пекоканифоли // Оптический журнал. – 1996. – №3.

6. Габович Н.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.М. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. — М.; Энергоатомиздат, 1985.
7. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.; Радио и связь, 1986.
8. Семашко Н.М., Владимиров А.В., Кузнецов В.В. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. — М.; Энергоиздат, 1981.
9. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой (Физическое распыление одноэлементных твердых тел) / Ред. Бериш Р. — М.; Мир, 1984.
10. Первеев А.Ф., Вишневская Л.В., Черезова Л.А. Ионная обработка оптических материалов и покрытий. — М.; НТЦ «Информтехника», 1990.
11. Первеев А.Ф. Ионная обработка оптических материалов и покрытий // Труды ГОИ им. С.И.Вавилова. — 1983. — Т.52, вып.186.
12. Бунин И.Г. Ионно-лучевая обработка оптических материалов и покрытий. Аналитический обзор за 1975-1985 гг. — М.; ЦНИИ информации и технико-экономических исследований, 1986, №484.
13. Волчков И.В., Ренская И.В., Абрамичева О.А. и др. Ионные источники для оптической и микроэлектронной технологии. Аналитический обзор за 1972-1986 гг. — М.; ЦНИИ информации и технико-экономических исследований, 1987, №4404.
14. Жилейкин В.П. Ионное травление оптических материалов и системы для его реализации. Аналитический обзор за 1975-1985 гг. — М.; ЦНИИ информации и технико-экономических исследований, 1986, №1188.
15. Полиновский В.А. Основные вопросы ионной обработки оптики и технологические ионные установки. Аналитический обзор за 1972-1984 гг. — М.; ЦНИИ информации и технико-экономических исследований, 1985.
16. Вишневская Л.В., Первеев А.Ф. Асферизация поверхностей методом ионной обработки // ОМП. — 1990. — №11.
17. Вишневская Л.В. Ионная асферизация оптических поверхностей // ОМП. — 1986. — №6.
18. Первеев А.Ф. Установка для обработки оптических деталей ПИОН-300. Сб. докладов. М.; ЦНИИ информации и технико-экономических исследований, 1984.
19. Муранова Г.А., Терпугов В.С., Егоров П.П. Ионная полировка оптических покрытий // ОМП. — 1979. — №5.

20. Вишневская Л.В., Первеев А.Ф., Черезова Л.А. Исследование процесса взаимодействия ионов фторсодержащих газов с поверхностью оптического стекла // ОМП. — 1981. — №7.
21. Миллер В.Т., Первеев А.Ф. Устройство для ионной очистки подложек и полировки слоев // ОМП. — 1992. — №2.
22. Ган М.А., Ильин В.В., Комов В.В. и др. Исправление нерегулярных деформаций волнового фронта высокоразрешающих оптических систем с помощью ионной полировки // ВОР, серия X. — 1981. — Вып.159.
23. Бунин И.Г., Рожнов Г.В., Ходаков Г.С. Формообразование поверхности ионным пучком малого сечения // ОМП. — 1983. — №2.
24. Богданов А.П., Бунин И.Г. Доводка формы оптической поверхности ионным пучком малого сечения, управляемым программированным перемещением // ОМП. — 1988. — №2.
25. Богданов А.П., Душкин В.А., Михайлова А.Н. и др. Ионно-лучевое формообразование прецизионных оптических поверхностей программно позиционируемым ионным пучком малого диаметра // Оптический журнал. — 1994. — №6.
26. Чутко В.М. Параметры распыления оптических материалов ионами низких энергий // Вакуумная техника и технология. — 1991. — Т.1, №5-6.
27. Чутко В.М. Анализ распределения скорости ионно-лучевого распыления по поверхности сферической мишени // ОМП. — 1985. — №8.
28. Ставерс И.Ф. Обзор прецизионных технологий обработки поверхности и их потенциального использования для изготовления крупногабаритных оптических деталей // Proc. SPIE. — 1989. — Vol.966.
29. Вильсон С.Р., Рейхер В.В., Мак-Кейл Ж.Р. Обработка поверхности с использованием нейтральных ионных пучков // Proc. SPIE. — 1989. — Vol.966.
30. Боллингер Л.Д., Заровин Ц.П. Прямая, не механическая, не разрушающая обработка оптических поверхностей методом плазменного химического травления (PACE) // Proc. SPIE. — 1989. — Vol.966.
31. Лямин Ю.Б., Рябинин В.А. Автоматизированные доводочные станки модели АД // ОМП. — 1987. — №7.
32. Савельев А.С., Богданов А.П. Автоматизированная обработка крупногабаритных оптических деталей малым инструментом // ОМП. — 1985. — №5.
33. Богданов А.П. Автоматизация проектирования технологических процессов обработки высокоточных оптических деталей // ОМП. — 1984. — №9.

34. Богданов А.П. Оптимизация технологического процесса автоматизированной обработки высокоточных крупногабаритных оптических деталей малым инструментом // ОМП. — 1985. — №7.

35. Богданов А.П. Управление и оптимизация технологических процессов автоматизированного формообразования оптических деталей // ОМП. — 1987. — №11.

36. Савельев А.С., Максакова М.П., Семенов А.П. и др. Определение коэффициента споллировывания стекла // ОМП. — 1989. — №9.

37. Семенов А.П., Савельев А.С. Расчет траектории движения малого инструмента при автоматизированном формообразовании поверхностей оптических деталей // Оптический журнал. — 1994. — №6.

38. Семенов А.П., Савельев А.С. Программа управления формообразованием поверхностей крупногабаритных оптических деталей // Оптический журнал. — 1995. — №9.