

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-73-81

УДК 681.7.066.3, 681.7.055.34, 681.7.022

Технология изготовления крупногабаритных линз с асферической поверхностью

СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ АЗАРОВ¹, ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ ВЕНЗЕЛЬ²✉,
ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ ЛИБИК³, АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ СЕМЁНОВ⁴,
ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ЧЕКАЛЬ⁵, СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ ШЕВЦОВ⁶

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор
Ленинградской обл., Россия

¹technomet@niioep.ru <https://orcid.org/0009-0004-0600-5918>

²venzelvi@niioep.ru <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>

³libik.y.m@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-0336-2525>

⁴semenovaa@niioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>

⁵chekal@niioep.ru <https://orcid.org/0009-0005-0826-7695>

⁶shevtsovse@niioep.ru <https://orcid.org/0009-0005-5062-684X>

Аннотация

Предмет исследования. Изготовление линз с асферической поверхностью. **Цель работы.** Разработка технологии изготовления крупногабаритных асферических линз методом малоразмерного инструмента. **Метод** включает в себя предварительное формообразование асферической и сферической поверхностей, полировку асферической поверхности методом малоразмерного инструмента, изготовление специальной технологической оправы для линзы, позволяющей вести обработку сферической поверхности и промежуточную центрировку асферической поверхности в технологической оправе, формообразование сферической поверхности, центрированной относительно базовых поверхностей технологической оправы, полирование сферической поверхности, установку линзы в рабочую оправу и центрировку линзы в рабочей оправе с обработкой базовых поверхностей оправы. **Основные результаты.** Проведен анализ погрешности центрировки линзы в зависимости от конической постоянной, относительного отверстия и диаметра линзы. Разработана и внедрена технология изготовления крупногабаритных линз с асферической поверхностью. **Практическая значимость.** Разработанная технология использована при создании высокоразрешающего инфракрасного объектива для оптико-электронной системы дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: асферическая поверхность, угловая децентрировка, линейная децентрировка, разнотолщинность линзы, технологическая оправа

Ссылка для цитирования: Азаров С.А., Вензель В.И., Либик Ю.М., Семёнов А.А., Чекаль В.Н., Шевцов С.Е. Технология изготовления крупногабаритных линз с асферической поверхностью // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 73–81. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-73-81>

Коды OCIS: 220.0220, 080.1005, 080.4228

Manufacturing technology for large-sized aspheric lenses

SERGEI A. AZAROV¹, VLADIMIR I. VENZEL^{2✉}, YURI M. LIBIK³,
ANDREY A. SEMENOV⁴, VLADIMIR N. CHEKAL⁵, SERGEI E. SHEVTSOV⁶

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad Region, Russia

¹technomet@niiiep.ru <https://orcid.org/0009-0004-0600-5918>

²venzelvi@niiiep.ru <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>

³libik.y.m@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-0336-2525>

⁴semenovaa@niiiep.ru <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>

⁵chekal@niiiep.ru <https://orcid.org/0009-0005-0826-7695>

⁶shevtsovse@niiiep.ru <https://orcid.org/0009-0005-5062-684X>

Abstract

Subject of research. Manufacturing of aspheric lenses. **Aim of study.** The development of manufacturing technology for large-sized aspheric lenses made using the small tool method. The **method** includes a preliminary shaping of aspheric and spherical surfaces, a polishing of the aspheric surface made using the small tool method, a manufacturing of a special technological mount for the lens that allows polishing of the spherical surface, an intermediate centering of the aspheric surface in the technological mount, a shaping of the spherical surface that is centered relative to basic surfaces of the technological mount, a polishing of the spherical surface, a mounting of the lens in a working mount and a centering of the lens in the working mount with a polishing of basic surfaces of the mount. **Main results.** An analysis of the dependence of the lens centering error from the conic constant, the focal ratio and the lens diameter has been done. The manufacturing technology for large-sized aspheric lenses has been developed and implemented. **Practical significance.** The developed technology has been used in the making of a high resolution infrared objective for an optoelectronic system of Earth remote sensing.

Keywords: aspheric surface, angular decentration, linear decentration, skewness of a surface, technological mount

For citation: Azarov S.A., Venzel V.I., Libik Y.M., Semenov A.A., Chekal V.N., Shevtsov S.E. Manufacturing technology for large-sized aspheric lenses [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 9. P. 73–81. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-73-81>

OCIS codes: 220.0220, 080.1005, 080.4228

ВВЕДЕНИЕ

Применение асферических поверхностей при создании линзовых объективов позволяет значительно улучшить многие параметры объективов: массогабаритные характеристики, разрешение, пропускание, угловое поле. Поэтому развитие технологий изготовления асферической оптики является актуальной задачей, от решения которой зависит производство высокоразрешающих объективов для оптико-электронных систем различного назначения и исполнения. В работе [1] описаны производственные технологические процессы крупносерийного и массового производства малогабаритных асферических элементов.

Целью работы является разработка технологии изготовления крупногабаритных асфе-

рических линз методом малоразмерного инструмента.

Основным фактором, ограничивающим качество изображения оптических систем, помимо отклонения формы поверхности, является децентрировка асферических линз. Центрировка линз, имеющих асферические поверхности, радикально отличается от центрировки сферических линз: проводить ее в оправе невозможно. Она должна выполняться в процессе нанесения поверхностей линзы, так как асферические поверхности имеют ось вращения в отличие от сферических.

При технологии изготовления асферической поверхности, предполагающей точное задание оси относительно координат детали (например алмазное микроточение), обычно

первой наносят сферическую или плоскую поверхность линзы, затем центрируют ее на шпинделе станка и наносят асферическую поверхность. Если используется технология, не позволяющая точно выполнить ось относительно базовых поверхностей детали, например метод малоразмерного инструмента, то вначале наносят асферическую поверхность, затем вторую поверхность, контролируя разнотолщинность линзы (разность высот на краю линзы одной поверхности при опоре на другую) [2]. Крупногабаритные линзы (диаметр более 200 мм) редко изготавливаются методом алмазного микроточения, поэтому использование метода малоразмерного инструмента весьма актуально, но его применение связано с некоторыми технологическими проблемами при центрировке.

Описанная технология изготовления линз с асферической поверхностью основывается на промежуточной центрировке асферической поверхности линзы в специальной технологической оправе, позволяющей затем провести центрировку асферической поверхности на планшайбе фрезерного станка по базовым поверхностям оправы при формообразовании сферической поверхности.

Технология изготовления линзы рассматривается на примере мениска с вогнутой асферической поверхностью (сплюснутый сфероид, эксцентриситет $\varepsilon^2 = 0,742$), световым диаметром 215 мм и радиусом кривизны вершинной сферы 297 мм. Радиус кривизны выпуклой сферической поверхности — 320 мм. Расчетные допуски на децентрировку асферической поверхности — угловой 16", линейный 14 мкм, допуск на децентрировку сферической поверхности 32 мкм.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ НАНЕСЕНИЕ ШЛИФОВАННЫХ СФЕРИЧЕСКОЙ И АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИНЗЫ

Предварительное нанесение ближайшей трехточечной сферы вогнутой асферической поверхности проводится на станке «Алмаз-800» с помощью алмазного инструмента типа чашки.

Предварительное нанесение асферической поверхности осуществляется на многокоординатном шлифовальном центре с помощью алмазного дискового инструмента методом

перекрестного шлифования [3]. При таком способе деталь центрируется относительно оси вращения поворотного стола посредством микрометрического индикатора и специальной центрировочной оснастки (рис. 1), базовыми поверхностями являются цилиндрическая боковая и плоская поверхности заготовки. Обработка производится кромкой диска, ось вращения которого ортогональна направлению его перемещения от края к центру или от центра к краю заготовки, заготовка при этом вращается в режиме управляемой оси. Зона контакта инструмента и обрабатываемой заготовки перемещается по спиральной траектории относительно заготовки, программно отслеживая требуемую форму поверхности. Преимуществом данного метода является низкая чувствительность к погрешностям формы рабочей кромки алмазного инструмента при достаточно низкой получаемой шероховатости поверхности.

На этом этапе удается достигнуть погрешности формы порядка 5 мкм при шероховатости R_z порядка 0,5 мкм, остаточной разнотолщинности порядка 0,01 мм.

Затем на заготовку наносится выпуклая сферическая поверхность на станке «Алмаз-800» или подобном с помощью алмазной чашки с припуском по толщине. Базировка заготовки проводится на плоскую фаску со стороны асферической поверхности. Центрировка на

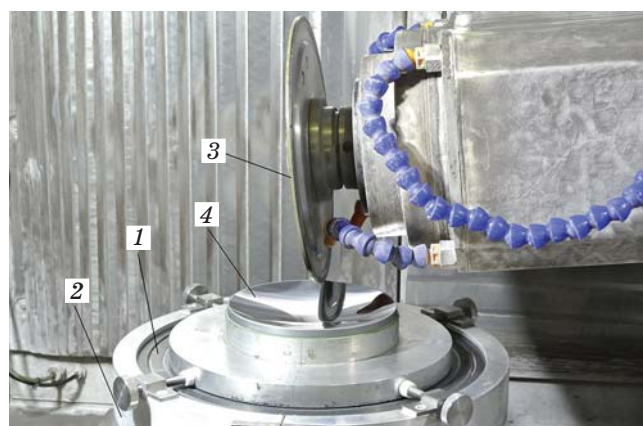


Рис. 1. Предварительное нанесение асферической поверхности. 1 — вращающийся вакуумный стол, 2 — центрировочное приспособление, 3 — алмазная чашка, 4 — обрабатываемая линза

Fig. 1. Aspheric surface preliminary shaping. (1) Rotary vacuum table, (2) centering device, (3) diamond grinding wheel, (4) processed lens

станке осуществляется по цилиндрической поверхности посредством микрометрического индикатора.

ПОЛИРОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОЦЕНКА ДЕЦЕНТРИРОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ БАЗ

Далее к выпуклой поверхности заготовки приклеивается наклейщик, посадочная поверхность которого параллельна плоской фаске, и проводятся программно-управляемое шлифование и полирование асферической поверхности методом малоразмерного инструмента [4] на станке АД1000. Используемый станок оснащен наклонно-поворотным столом для обеспечения работы в пятикоординатном режиме, позволяющем сохранять в ходе обработки ориентацию оси малоразмерного инструмента вдоль нормали к обрабатываемой поверхности. Поскольку технология малоразмерного инструмента основана на гипотезе Престона, т.е. изменение формы поверхности определяется рассчитанным временем пребывания инструмента в каждой точке его траектории, разнотолщинность, смещение и наклон оптической оси определяются в первую очередь результатами контроля поверхности, используемыми для расчета времен пребывания, а не точностью позиционирования детали на станке. Погрешность позиционирования влияет на возможность устранения погрешности формы поверхности с определенными пространственными периодами [5] и составляет не менее 0,1 мм. Это позволяет, используя высокоточный контроль на координатно-измерительной машине (КИМ), добиться на этом этапе расположения асферической поверхности относительно баз с той погрешностью, с которой проводятся измерения на КИМ, т.е. порядка единиц микрометров для разнотолщинности. Ограничением служит трудоемкость процесса, поскольку учет базировки может приводить к многократному увеличению продолжительности сеансов обработки. Окончательный контроль проводится в интерферометрической схеме с голограммным компенсатором [6]. Поскольку такой контроль обладает высокой чувствительностью к позиционированию компонентов контрольной схемы, которое сложно

определить с высокой точностью, а юстировка, как правило, сводится к устранению сферической аберрации первого порядка и комы, расположение контролируемой поверхности относительно баз не учитывается. Предельно достижимое минимальное значение наклона оси поверхности можно оценить исходя из погрешности КИМ, которая получается при измерении формы асферической поверхности [7]

$$\alpha \geq |25 \text{Err}_{\text{СММ}} p^2 / (d^3 \varepsilon^2)|,$$

где α — наклон оси асферической поверхности, рад, $\text{Err}_{\text{СММ}}$ — размах погрешности, определяемой с помощью КИМ, мм, p — радиус кривизны вершинной сферы асферической поверхности, мм, d — диаметр асферической поверхности, мм, ε — эксцентриситет кривой второго порядка, образующей асферическую поверхность.

В свою очередь, смещение δ и наклон α оси связаны очевидным соотношением $\delta \approx p\alpha$.

При использовании для контроля КИМ с размахом погрешности менее 1,5 мкм оценка минимально достижимого наклона и смещения оси составляет порядка 90" и 135 мкм соответственно при $\varepsilon^2 = 0,742$ и $p = 297,37$ мм асферической поверхности.

Таким образом, технология обработки малоразмерным инструментом не позволяет получить расчетные погрешности центрировки асферической поверхности относительно геометрических баз даже при многократной коррекции формы поверхности.

Более точно определить положение оси асферической поверхности можно относительно оси вращения на центрировочном станке интерферометрическим методом [8]. При этом положение оси можно перенести на торцевую и боковую поверхности технологической оправы.

ЦЕНТРИРОВКА АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ОПРАВЕ И ОЦЕНКА ЕЕ ДЕЦЕНТРИРОВКИ

Заготовка линзы с асферической поверхностью устанавливается в технологическую оправу (рис. 2а), позволяющую центрировать асферическую поверхность и обрабатывать выпуклую сферическую поверхность (рис. 2б).

Заготовка линзы базируется в оправе на плоскую фаску и крепится по цилиндрической поверхности с помощью герметика УТ-34. Для удобства разборки технологической оправы и извлечения линзы отверстия для заливки герметика выполнены в съемных резьбовых втулках. Заготовка линзы в технологической оправе центрируется по асферической поверхности на установке для центрировки асферики на базе прецизионного токарного станка [8] (рис. 3).



Рис. 2. Центрировка асферической поверхности линзы в оправе. Технологическая оправа (а) с вклеенной в нее линзой (б)

Fig. 2. Centering the aspherical surface in the frame. (a) The technological mount (b) with the lens glued into it



Рис. 3. Установка для центрировки асферической поверхности линзы в оправе на базе прецизионного токарного станка. 1 — интерферометр *Fisba* μ Phase, 2 — голограммный компенсатор, 3 — линза с асферической поверхностью в оправе, 4 — пятикоординатный стол

Fig. 3. Installation for centering the aspherical surface of a lens in a frame based on a precision lathe. (1) *Fisba* μ Phase interferometer, (2) hologram compensator, (3) lens with aspheric surface in mount, (4) five-axis table

Методика центрировки асферической поверхности основывается на том факте, что минимизация деформации волнового фронта при ее интерферометрическом контроле с помощью голограммного компенсатора приводит к установке компенсатора соосно асферической поверхности с некоторой остаточной погрешностью. Таким образом, при развороте асферической поверхности вокруг оси вращения шпинделя станка на 180° относительное изменение углового положения голограммного компенсатора соответствует удвоенной угловой децентрировке асферической поверхности относительно оси станка, а линейная децентрировка рассчитывается по относительному изменению линейного и углового положений голограммного компенсатора.

Критерием центрированного положения компенсатора относительно асферической поверхности выбираются значения коэффициента комы как аберрации, наиболее чувствительной к децентрировке, и коэффициента наклона поверхности.

Аберрации, вызванные линейной и угловой децентрировками одного направления, компенсируют друг друга, при этом коэффициент комы помимо децентрировки линейно зависит от коэффициента наклона поверхности. Задавая допуски на некомпенсированные остаточные значения коэффициента комы и коэффициента наклона, определяют погрешности определения линейной и угловой децентрировок асферической поверхности.

При центрировке асферической поверхности в оправе линейными и угловыми подвижками центрировочного патрона и системы «интерферометр — голограммный компенсатор» обеспечивается минимальное изменение коэффициента наклона интерференционной картины при развороте шпинделя станка на 180° , при этом сохраняется положение центра кривизны вершинной сферы асферической поверхности на оси вращения шпинделя станка. Линейными и угловыми подвижками центрировочного патрона минимизируют изменение коэффициента комы до и после разворота шпинделя при сохранении минимального изменения коэффициента наклона, что обеспечивает сохранение положения и вершины, и центра кривизны асферической

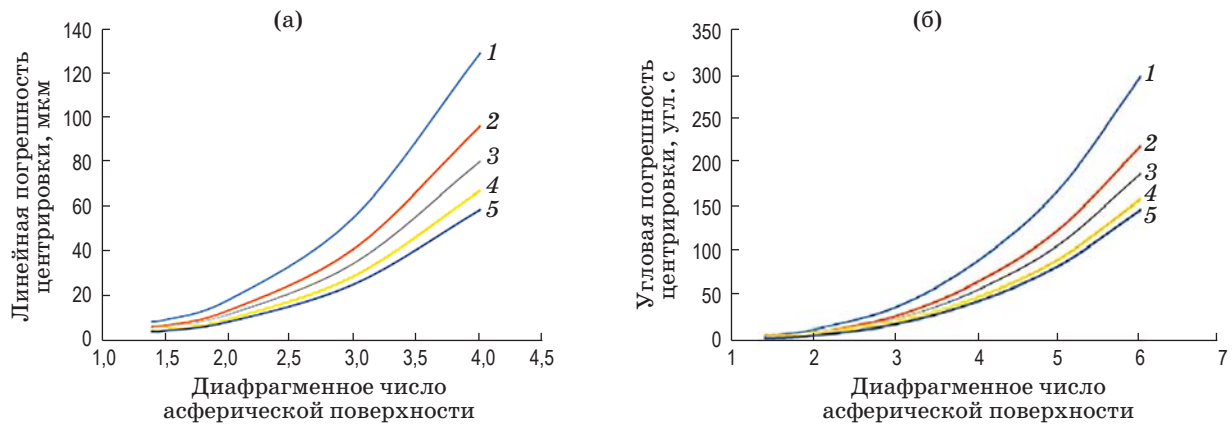


Рис. 4. Погрешности линейной (а) и угловой (б) центрировок в технологической оправе при квадратах эксцентриситета ε^2 0,5 (1), 0,74 (2), 1 (3), 1,5 (4), 2 (5)

Fig. 4. (a) Linear and (б) angular centering errors in the technological mount for squares of the eccentricity ε^2 (1) 0.5, (2) 0.74, (3) 1, (4) 1.5, (5) 2

поверхности на оси вращения шпинделя станка и, соответственно, соосность шпинделя и асферической поверхности.

Погрешности совмещения оси асферической поверхности с осью вращения шпинделя станка в зависимости от относительного отверстия и квадрата эксцентриситета асферической поверхности приведены на рис. 4 (результаты получены моделированием схемы контроля в среде ZEMAX).

Зависимости рассчитаны для светового диаметра асферической поверхности 215 мм. При изменении светового диаметра угловая погрешность центрировки изменяется обратно пропорционально диаметру, при этом линейная погрешность центрировки от диаметра не зависит.

При проточке базовых поверхностей оправы смещение вершины и наклон асферической поверхности лежат в одной плоскости, а центр кривизны вершинной сферы расположен на оси с погрешностью, определяемой разностью радиусов кривизны выпуклой сферы и вершинной сферы асферической поверхности. Расположение автоколлимационных точек и базовых поверхностей приведено на рис. 5.

При расчете погрешности центрировки асферической поверхности со световым диаметром 215 мм и радиусом кривизны вершинной сферы 297 мм, конической постоянной 0,742 учитываются: погрешность расшифровки интерферограмм (остаточный коэффици-

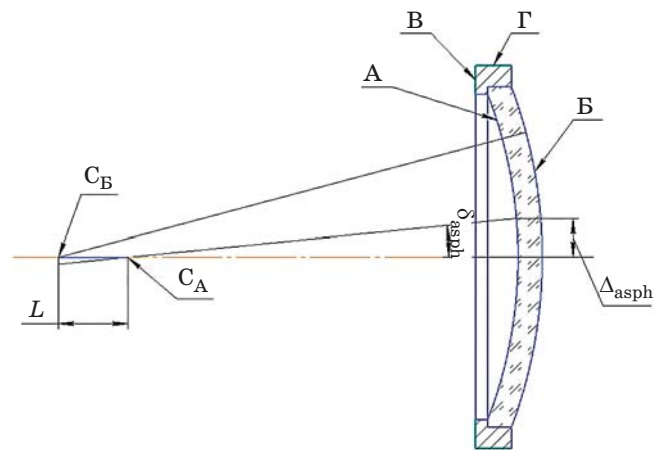


Рис. 5. Расположение автоколлимационных точек и посадочных баз. L — расстояние между центром кривизны сферической поверхности Б (C_B) и центром кривизны вершинной сферы асферической поверхности А (C_A), В — плоская базовая поверхность, Г — цилиндрическая базовая поверхность, Δ_{asph} — линейная децентрировка асферической поверхности относительно цилиндрической базовой поверхности Г, δ_{asph} — наклон асферической поверхности относительно плоской базовой поверхности В

Fig. 5. Disposition of points of autocollimation and mounting bases. L is the distance between the center of curvature of the spherical surface Б (C_B) and the center of curvature of the vertex sphere of the aspheric surface А (C_A), В is the flat basic surface, Г is the cylindrical basic surface, Δ_{asph} is linear decentration of the aspheric surface relative to the cylindrical basic surface Г, δ_{asph} is tilt of the aspheric surface relative to the flat basic surface В

ент Цернике комы $C = 0,05$), что соответствует погрешностям центрировки $\Delta_{\text{int}} = 3,5$ мкм и $\delta_{\text{int}} = 2,5''$, торцевое и радиальное биение токарного станка, что приводит к погрешностям центрировки $\Delta_{\text{lat}} = 2$ мкм и $\delta_{\text{lat}} = 2''$, погрешность настройки интерферометра на нулевую полосу при расшифровке, что приводит к погрешности центрировки $\Delta_{\text{setup}} = 2$ мкм и $\delta_{\text{setup}} = 1,5''$. Погрешность установки голограммного компенсатора относительно интерферометра $2''$ не влияет на погрешность центрировки из-за дифференциальных измерений (до и после разворота на 180°). Суммарная погрешность центрировки асферической поверхности

$$\Delta_{\text{asph}} = \sqrt{2\Delta_{\text{int}}^2 + \Delta_{\text{lat}}^2 + 2\Delta_{\text{setup}}^2} \approx 6 \text{ мкм},$$

$$\delta_{\text{asph}} = \sqrt{2\delta_{\text{int}}^2 + \delta_{\text{lat}}^2 + 2\delta_{\text{setup}}^2} \approx 5''.$$

КОРРЕКТИРОВКА ПОЛОЖЕНИЯ ШЛИФОВАННОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛИНЗЫ

Сферическая выпуклая поверхность наносится на заготовку в оправе на станке «Алмаз-800» с помощью алмазной чашки. Оправа выставляется на планшайбе станка с линейной децентрировкой поверхности относительно боковой цилиндрической поверхности оправы не более $\Delta_c = 2$ мкм с помощью микрометрического индикатора. При обработке корректируется толщина линзы.

Общую децентрировку сферической поверхности Δ_{sph} относительно посадочных баз технологической оправы можно рассчитать по формуле

$$\Delta_{\text{sph}} = \sqrt{\Delta_c^2 + (R_{\text{sph}} \text{tg} \delta_c)^2},$$

где Δ_c — погрешность центрировки оправы, мм, $\delta_c = 2$ — угловое биение станка «Алмаз-800», угл. с, R_{sph} — радиус кривизны сферической поверхности, мм.

Для выбранной в качестве примера линзы погрешность центрировки сферы составляет

$$\Delta_{\text{sph}} = \sqrt{0,002^2 + (320 \text{tg} 2'')^2} \approx 0,004 \text{ мм}.$$

ПОЛИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Полирование сферической поверхности проводится на станке ПД-500А при установке обрабатываемой поверхности снизу. В ее процессе периодически осуществляется контроль разнотолщинности линзы в оправе при опоре на плоскую поверхность технологической оправы и центрировке по цилиндрической поверхности.

Реально достижимое значение разнотолщинности сферической поверхности составляет около 4–5 мкм (определяется погрешностями базировки и измерения на КИМ).

Децентрировка, вызванная разнотолщинностью сферической поверхности, не должна превышать заданную ($\Delta = 32$ мкм) за вычетом децентрировки при нанесении сферы

$$\Delta_H \leq \sqrt{\Delta^2 - \Delta_{\text{sph}}^2} = R_{\text{sph}} X / D,$$

где X — разнотолщинность, мм, Δ_H — децентрировка вершины сферической поверхности относительно посадочных баз оправы, вызванная разнотолщинностью, мм, D — диаметр линзы, мм, R_{sph} — радиус кривизны сферической поверхности, мм.

$$X = \sqrt{\Delta^2 - \Delta_{\text{sph}}^2} D / R_{\text{sph}} \approx 0,022 \text{ мм}.$$

Допустимая разнотолщинность линзы в оправе при опоре на торцевую поверхность оправы и центрировке по цилиндрической поверхности оправы в случае данной линзы составляет 22 мкм. Реальная измеренная разнотолщинность при изготовлении линзы в оправе составила 5 мкм, что говорит о децентрировке сферы относительно посадочных баз оправы Δ_H около 7 мкм.

Коррекция разнотолщинности в процессе полировки сферической поверхности линзы возможна при установке обрабатываемой поверхности в верхнее положение, хотя при хорошей центрировке линзы в оправе относительно оси вращения станка разнотолщинность поверхности, нанесенной при шлифовании, сохраняется.

УСТАНОВКА ЛИНЗЫ В РАБОЧУЮ ОПРАВУ И ЦЕНТРИРОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ

После нанесения сферической поверхности проводится разборка технологической оправы

вы, чистка линзы, нанесение покрытий, установка линзы в штатную оправу и проверка формы поверхностей на деформации.

Центрировка линзы в штатной оправе происходит на установке для центрирования. Центрировка ведется по асферической поверхности, проверка центрировки сферической поверхности осуществляется с помощью автоколлимационной трубы через отверстие в шпинделе станка.

$$\Delta_{\text{sph}} = \sqrt{\Delta_c^2 + 2\Delta_{\text{asph}}^2 + (Ltg\delta_{\text{asph}})^2 + \left(R_{\text{sph}}tg\left(\sqrt{2\delta_{\text{setup}}^2 + 2\delta_{\text{lat}}^2 + \delta_c^2}\right)\right)^2} + \Delta_H^2 \approx 12 \text{ мкм},$$

где L — расстояние между центром кривизны вершинной сферы асферической поверхности и центром кривизны сферической поверхности, мм.

Измеренные результаты центрировки изготовленной линзы с указанными выше параметрами относительно изготовленных посадочных баз штатной оправы: угловая децентрировка асферической поверхности — 5", линейная децентрировка — 6 мкм, децентрировка выпуклой сферической поверхности — 9 мкм (половина биения автоколлимационного изображения).

Расчетное (12 мкм) и измеренное (9 мкм) значения близки, что говорит о корректности представленных расчетов.

Погрешность центрировки асферической поверхности зависит от эксцентриситета, относительного отверстия, диаметра поверхности и может быть оценена по графикам рис. 4.

Погрешность центрировки сферической поверхности можно определить как сумму погрешностей центрировки асферической поверхности и погрешности центрировки, определяемой разнотолщинностью линзы относительно оправы,

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология изготовления крупногабаритных линз с асферической поверхностью, в которой не требуется при формообразовании выдерживать точное положение оси асферической поверхности относительно геометрических баз. Технология включает промежуточную центрировку асферической поверхности в технологической оправе, что позволяет наносить вторую сферическую поверхность центрировано относительно асферической поверхности алмазным инструментом и полировать сферическую поверхность методом свободного абразива.

Технология используется при изготовлении компактных высокоразрешающих инфракрасных объективов для оптико-электронной системы дистанционного зондирования Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукин А.В. Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля оптических асферических поверхностей в Государственном институте прикладной оптики. Обзор // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 95–114. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-95-114>
2. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика / Под ред. Окатова М.А. 2-е изд. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
3. Guangpeng Yan, Kaiyuan You, Fengzhou Fang. Ultra-precision grinding of small-aperture concave aspheric mould insert with tilt axis method // 4th CIRP Conf. Surface Integrity At: Tianjin, China. July 2018.
4. Чекаль В.Н. Метод расчёта скорости перемещения малоразмерного инструмента при формообразовании прецизионных оптических поверхностей // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 50–55. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-08-50-55>

REFERENCE

1. Lukin A.V. Shaping technologies and methods of optical aspherical surfaces laser-holographic control at the State Institute of Applied Optics. A review // J. Opt. Technol. 2024. V. 91. № 3. P. 00–00. <https://doi.org/10.1364/JOT.91.000000>
2. Okatov M.A., Antonov E.A., Baigozhin A., et al. Reference optics-technologist [in Russian] / Ed. Okatov M.A. St. Petersburg: "Politekhnik" Publ., 2004. 679 p.
3. Guangpeng Yan, Kaiyuan You, Fengzhou Fang. Ultra-precision grinding of small-aperture concave aspheric mould insert with tilt axis method // 4th CIRP Conf. Surface Integrity At: Tianjin, China. July 2018.
4. Chekal' V.N. Method of calculating the speed of a compact tool during shaping of precision optical surfaces // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 8. 498–502. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000498>
5. Borodin V.G., Migel V.M., Paraka A.V., et al. Off-axis parabolic mirror for concentrating the radiation of a

5. Бородин В.Г., Мигель В.М., Парака А.В. и др. Внеосевое параболическое зеркало для концентрации излучения пикосекундного лазера // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 1. С. 65–68.
6. Полещук А.Г., Маточкин А.Е. Лазерные методы контроля асферической оптики // Фотоника. 2011. № 2. С. 38–44.
7. Чекаль В.Н., Чудаков Ю.И., Шевцов С.Е. Применение координатно-измерительных машин для оптимизации технологии автоматизированного формообразования оптических поверхностей // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 11. С. 82–87.
8. Вензель В.И., Семёнов А.А. Интерферометрическое устройство центровки оптических элементов с асферическими поверхностями в оправках // Патент РФ № RU186481U1. Бюл. 2019. № 3.

АВТОРЫ

Сергей Александрович Азаров — начальник бюро, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-0600-5918>; technomet@niioep.ru

Владимир Иванович Вензель — начальник лаборатории, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; Scopus ID: 7801676016; <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>; venzelvi@niioep.ru

Юрий Михайлович Либик — заместитель начальника технологического отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-0336-2525>; libik.y.m@gmail.com

Андрей Александрович Семёнов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; Scopus ID: 57211805420; <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>; semenovaa@niioep.ru

Владимир Николаевич Чекаль — заместитель начальника производства, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; Scopus ID: 56034518200; <https://orcid.org/0009-0005-0826-7695>; chekal@niioep.ru

Сергей Евгеньевич Шевцов — кандидат технических наук, Генеральный директор, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0005-5062-684X>; shevtsovse@niioep.ru

- picosecond laser // J. Opt. Technol. 2002. V. 69. № 1. P. 51. <https://doi.org/10.1364/JOT.69.000051>
6. Poleshuk A.G., Matochkin A.E.. Methods of aspherical optics laser control // J. Photonics Russia. 2011. № 2. P. 38–44.
7. Chekal' V.N., Chudakov Yu.I., Shevtsov S.E. The use of coordinate-measurement machines to optimize the technology of automatic shaping of optical surfaces // J. Opt. Technol. 2008. V. 75. № 11. P. 755–759. <https://doi.org/10.1364/JOT.75.000755>
8. Venzel V.I., Semenov A.A.. Interferometric device for centering optical elements with aspherical surfaces in frames // RF Patent № RU186481U1. Bul. 2019. № 3.

AUTHORS

Sergei A. Azarov — Head of the Bureau, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-0600-5918>; technomet@niioep.ru

Valdimir I. Venzel — Head of the Laboratory, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; Scopus ID: 7801676016; <https://orcid.org/0000-0003-2740-3160>; venzelvi@niioep.ru

Yuri M. Libik — Deputy Head of the Technology Department, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-0336-2525>; li-bik.y.m@gmail.com

Andrey A. Semenov — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; Scopus ID: 57211805420; <https://orcid.org/0000-0002-2240-6031>; semenovaa@niioep.ru

Vladimir N. Chekal — Deputy Head of Production, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; Scopus ID: 56034518200; <https://orcid.org/0009-0005-0826-7695>; chekal@niioep.ru

Sergei E. Shevtsov — PhD (Engineering), CEO, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0005-5062-684X>; shevtsovse@niioep.ru

Статья поступила в редакцию 01.03.2024
Одобрена после рецензирования 20.05.2024
Принята к печати 29.07.2024

The article was submitted to the editorial office 01.03.2024
Approved after review 20.05.2024
Accepted for publication 27.07.2024