



Методы контроля формы осевых и внеосевых асферических поверхностей с дифракционным оптическим элементом, определением децентрировки и учетом дисторсии при их формообразовании

Часть 2

А. П. Семенов¹, М. А. Абдулкадыров¹, В. Е. Патрикеев¹,
А. Б. Морозов¹, Р. К. Насыров²

¹ АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,
Лыткарино, Моск. обл., Россия

² Институт автоматизации и электрометрии САО РАН,
Новосибирск, Россия

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) или Computer Generated Holograms (CGH) стали неотъемлемой частью современного контроля асферических поверхностей крупногабаритных оптических зеркал и оптических систем. В продолжение статьи (см. ФОТОНИКА, 2022, том 16, № 4) рассмотрены особенности контроля внеосевых асферических поверхностей с ДОЭ и контроль, а также формообразование внеосевого асферического зеркала.

Ключевые слова: контроль асферических поверхностей, крупногабаритные оптические системы, синтезированные дифракционные решетки, дисторсия при формообразовании

Статья получена: 05.04.2022

Статья принята: 04.05.2022

Testing Methods for the Shape of Axial and Extra-Axial Aspherical Surfaces with a Computer-Generated Holograms, Decentering Determination and Distortion Consideration During its Formation

Part II

A. P. Semenov¹, M. A. Abdulkadyrov¹, V. E. Patrikeev¹,
A. B. Morozov¹, R. K. Nasyrov²

¹ Lytkarinsky Optical Glass Plant, Lytkarino, Moscow region.

² Institute of Automation and Electrometry, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russia

Diffraction optical elements (DOE) or computer-generated holograms (CGH) have become an integral part of the up-to-date testing of aspherical surfaces of the large-sized optical mirrors and optical systems. The features of the control of off-axis aspherical surfaces with CGH and the control and shaping of an off-axis aspherical mirror are considered in this article (see PHOTONICS RUSSIA, 2022, Vol. 16, № 4, Part I).

Keywords: testing of aspherical surfaces, large-sized optical systems, synthesized diffraction gratings, distortion during formation

Received on: 05.04.2022

Accepted on: 04.05.2022

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ВНЕОСЕВЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ДОЭ

Развитие технологии расчета и изготовления дифракционных оптических элементов для контроля оптики с асферическими осевыми и внеосевыми поверхностями привело к существенному прогрессу в задачах контроля и формообразования самых сложных оптических элементов, что ранее было недостижимо [11, 16, 17]. В связи с этим конструкторы оптических систем изобретают все более сложные оптические схемы, которые наряду с осесимметричной оптикой включают и внеосевые фрагменты с некруглой формой внешнего периметра.

Для случая внеосевых асферических элементов (схема контроля приведена на рис. 14) настройка ДОЭ корректора относительно контролируемой детали более сложная. Поэтому на корректоре создаются специальные настроечные структуры для позиционирования интерферометра относительно ДОЭ и интерферометра с ДОЭ относительно контролируемой поверхности (рис. 15). Настроечная структура, работающая на отражение, служит для юстировки интерферометра относительно корректора.

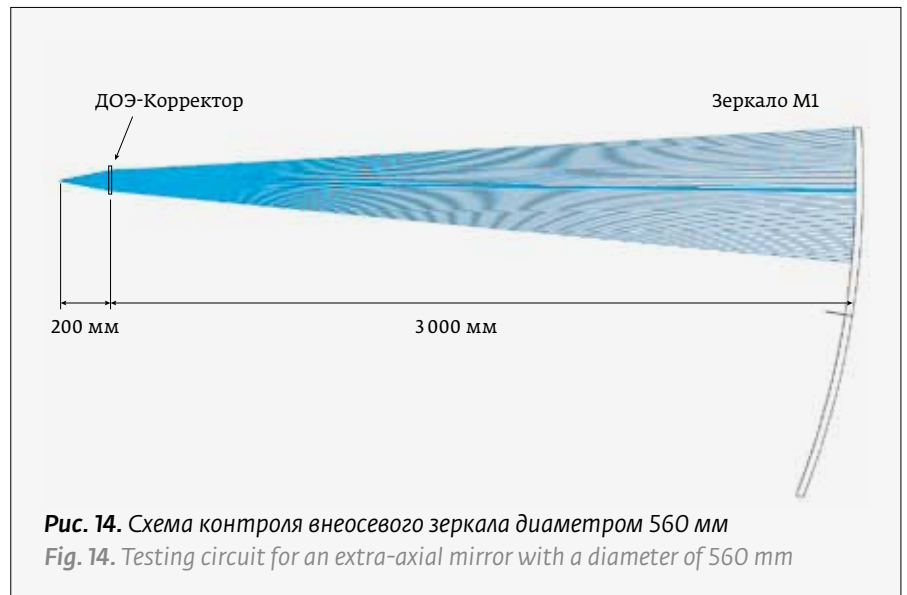


Рис. 14. Схема контроля внеосевого зеркала диаметром 560 мм

Fig. 14. Testing circuit for an extra-axial mirror with a diameter of 560 mm

TESTING FEATURES OF EXTRA-AXIAL ASPHERICAL SURFACES WITH THE CGH

The design and production technology development for the diffractive optical elements in order to test the optics with aspherical axial and extra-axial surfaces has led to the significant progress in the issues of testing and formation of the most comprehensive optical elements that was previously impossible [11, 16–17]. In this regard, the designers of optical systems invent more and more complex optical circuits that, along with the axisymmetric optics, also include the extra-axial fragments with a non-circular outer perimeter.

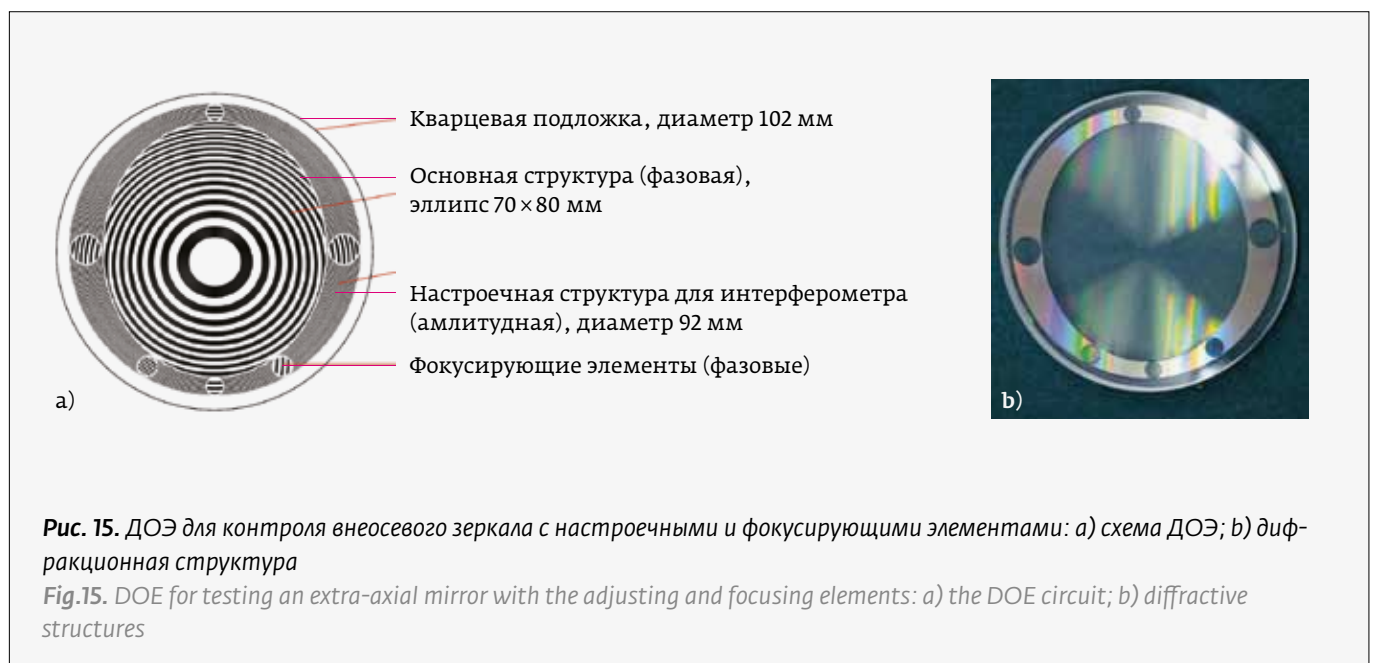


Рис. 15. ДОЭ для контроля внеосевого зеркала с настроечными и фокусирующими элементами: а) схема ДОЭ; б) дифракционная структура

Fig. 15. DOE for testing an extra-axial mirror with the adjusting and focusing elements: a) the DOE circuit; b) diffractive structures

Фокусирующие элементы (фазовые, рис. 15), работающие на проход, создают светящиеся точки в краевой области детали, в центре и в положении, имитирующем вершины оптической поверхности, по которым осуществляется юстировка детали относительно системы интерферометр+ДОЭ-корректор (рис. 16). На рис. 16 представлено облегченное внеосевое зеркало диаметром 560 мм в стенде контроля со светящимися сфокусированными точками, имитирующими краевые области системы координат зеркала, положение центра детали (центр системы координат) и положение оптической вершины зеркала.

КОНТРОЛЬ И ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ВНЕОСЕВОГО АСФЕРИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА С УЧЕТОМ ДИСТОРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЕТАЛИ НА ИНТЕРФЕРОГРАММЕ

Дисторсионное искажение волнового фронта, идущего от корректора волнового фронта, ДОЭ, на поверхность контролируемой детали и обратно, сопровождается искажением линейных отрезков на поверхности детали по сравнению с их отображением на интерферограмме [21–22]. Учет этих искажений крайне необходим для задач формообразования малым инструментом.

Для примера изготовления и контроля внеосевых оптических элементов рассмотрим формообразование и контроль детали диаметром 1125 мм с внеосевой параболической поверхно-

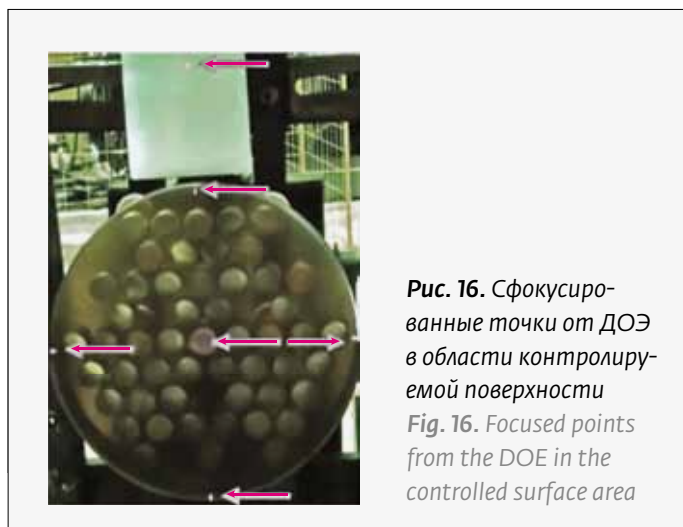


Рис. 16. Сфокусированные точки от ДОЭ в области контролируемой поверхности
Fig. 16. Focused points from the DOE in the controlled surface area

In the case of extra-axial aspherical elements (the control circuit of which is shown in Fig. 14), the CGH corrector adjustment relative to the controlled part is more complicated. Therefore, the special adjusting structures are made on the corrector for positioning the interferometer relative to the CGH and the interferometer with the CGH relative to the controlled surface (Fig. 15). The reflection adjusting structure is used to align the interferometer in relation to the corrector.

The focusing elements (phase, Fig. 15), used for the passage, create the luminous points in the periphery region of the part, in the center and in a position that imitates the optical surface vertices, applied for the part adjustment relative to the



Рис. 17. Пример изготовления и контроля внеосевых оптических элементов: а) контролируемая пара зеркал, юстировка зеркал в схеме контроля; б) обработка метрового зеркала с внеосевой асферической поверхностью с асферичностью в 611 мкм; в) контроль зеркала с внеосевой асферической поверхностью с асферичностью в 611 мкм
Fig. 17. Example of fabrication and control of off-axis optical elements: a) controlled pair of mirrors, adjustment of mirrors in the testing circuit; b) processing of a meter-long mirror with an extra-axial aspherical surface and an asphericity of 611 μm ; c) testing of a mirror with an extra-axial aspherical surface and an asphericity of 611 μm

стью, с вершинным радиусом 6000 мм, с асферичностью 611 мкм (рис. 17). Она является частью осевой детали с параболической поверхностью диаметром 2970 мм.

Асферизация поверхности данной детали выполнялась программно-управляемым способом, шлифованием с контролем на измерительной машине КИМ-1400. При этом контролировалась децентрировка внеосевой поверхности относительно геометрии детали и требуемый радиус ближайшей сферы. После достижения отклонений формы поверхности от требуемой менее 10 мкм дальнейшее формообразование выполнялось полированием с интерферометрическим контролем.

Контроль рабочей поверхности детали выполнялся в вертикальном стенде с использованием интерферометра с ДОЭ-корректором волнового фронта. Как правило, корректоры волнового фронта (что линзовые, что дифракционные) рассчитываются и изготавливаются для работы с конкретными асферическими поверхностями, при этом учитываются величина фокусного расстояния и параметры асферической поверхности. На рис. 18 показан ДОЭ с основной структурой и вспомогательными фокусирующими элементами для юстировки ДОЭ относительно интерферометра и системы интерферометр+ДОЭ относительно контролируемой детали. Интерферометр устанавливался перед ДОЭ на расстоянии 300 мм. ДОЭ располагается относительно вершины поверхности на расстоянии 5740 мм.

Над контролируемой деталью 1 (рис. 19) с внеосевой асферической поверхностью располагается лазерный интерферометр 2 (типа Тваймана-Грина), а перед ним дифракционный оптический элемент 3 таким образом и на таком расстоянии, чтобы световой поток охватывал всю контролируемую поверхность. Используемый ДОЭ 3 состоит из оптической круглой подложки 4 (рис. 20), на которой нанесены основная дифракционная структура 5 и дополнительные структуры – центрирующая 6 и фокусирующая 7 в виде шести фокусирующих точек. Вначале настраивают и центрируют ДОЭ 3 относительно интерферометра 2 по интерферограмме опорного волнового

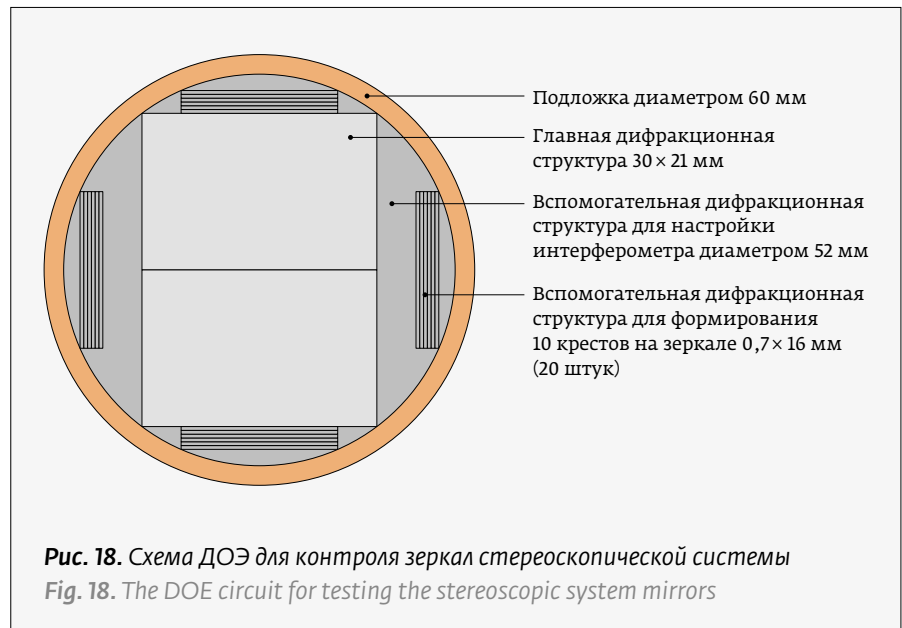


Рис. 18. Схема ДОЭ для контроля зеркал стереоскопической системы

Fig. 18. The DOE circuit for testing the stereoscopic system mirrors

interferometer + the CGH corrector system (Fig. 16). Fig. 16 shows a lightweight extra-axial mirror with a diameter of 560 mm on the inspection stand with the luminous focused points simulating the periphery regions of the mirror coordinate system, the position of the part center (the coordinate system center) and the position of the mirror optical vertex.

TESTING AND FORMATION OF AN EXTRA-AXIAL ASPHERICAL MIRROR WITH DUE REGARD TO THE PART IMAGE DISTORTIONS ON THE INTERFEROGRAM

The distortion of wavefront coming from the wavefront corrector, the CGH, to the controlled part surface and back, is accompanied by a distortion of the linear segments on the part surface in comparison with their image on the interferogram [21-22]. Consideration of these distortions is extremely necessary for the small tool formation.

As an example of production and testing of the extra-axial optical elements, we will consider the formation and testing of a part with a diameter of 1125 mm and an extra-axial parabolic surface, with a vertex radius of 6000 mm and an asphericity of 611 μm (Fig. 17). It is a part of an axial detail with a parabolic surface and a diameter of 2970 mm.

The surface aspherization of this part was performed by a program-controlled method, namely by grinding with control using a KIM-1400 measuring machine. In this case, decentering of the extra-axial surface relative to the part geometry and the required radius of the nearest sphere were inspected. After

фронта от центрирующей структуры 6, а затем интерферометр с ДОЭ центрируют относительно измеряемой поверхности детали 1 с помощью шести фокусирующих точек структуры 7, фокусирующихся на поверхности детали в заданных областях (рис. 20), что обеспечивает и гарантирует точность юстировки. С помощью основной структуры 5 (рис. 20) проводят интерферометрический контроль формы асферической поверхности внеосевой детали 1. На рис. 21 представлена связь между координатами на поверхности контролируемой детали и на проекции поверхности ДОЭ, т.е. какие точки на ДОЭ в каком направлении и на сколько смещены относительно этих же точек на поверхности детали.

Вершина асферической поверхности точка O находится вне контролируемого зеркала (рис. 19). Оптическая ось, проходящая через вершину асферической поверхности O , пересекает плоскость ДОЭ в точке O' вне ДОЭ на расстоянии H_1 от центра ДОЭ C' и на расстоянии H_2 от точки O' до перпендикуляра из вершины O до пересечения с плоскостью ДОЭ. Длина отрезка OO' равна L и задается при расчете ДОЭ. Угол наклона плоскости ДОЭ относительно оптической оси равен β . Расстояние от точки O' в плоскости ДОЭ до вершины зеркала O равно $S=L\cos\beta$, $H_2=L\sin\beta$. C' – центр ДОЭ. C – центр внеосевой детали. V – внеосевой параметр, смещение центра детали от оптической оси. X, Y, Z – система координат детали относительно вершины зеркала. X', Y', Z' – система координат ДОЭ.

Данная связь получена аналитически [23]. Плоскость ДОЭ (рис. 19) пересекает оптическую ось OO' в точке O' на расстоянии H_1 от центра ДОЭ и находится на расстоянии S от вершины зеркала. Плоскость ДОЭ наклонена на угол β к оптической оси. Снизу изображена часть асферической поверхности, принадлежащая внеосевой обрабатываемой детали, габаритом D , центр которой C отстоит от оптической оси на расстоянии V . Оптическая вершина асферического зеркала находится вне его поверхности в точке O . Особенность контроля с ДОЭ состоит в том, что лучи, идущие по нормали от контролируемой поверхности детали, попадают на ДОЭ, и на интерферограмме оказываются в определенных точках, положение которых требуется определить. Т.е. необходимо вычислить, куда попадают нормали от поверхности детали на ДОЭ, перейдя от системы координат детали к системе координат ДОЭ, повернув ее на угол β и сместив ее на величину S по оси Z и на величину H_1+H_2 по оси Y . Выполнив такие

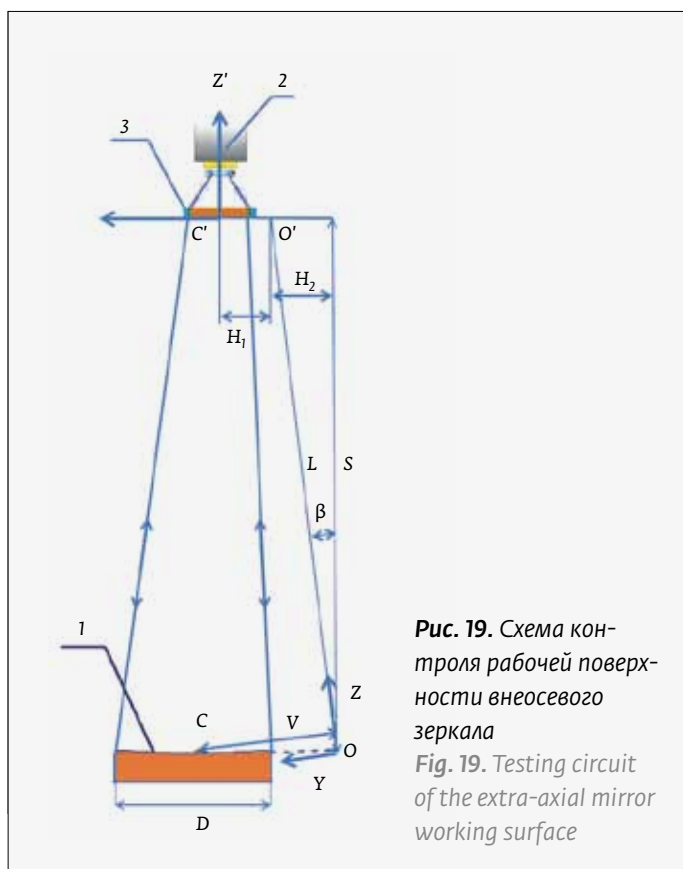


Рис. 19. Схема контроля рабочей поверхности внеосевого зеркала
Fig. 19. Testing circuit of the extra-axial mirror working surface

achieving the surface shape deviations from the required value of less than $10\ \mu\text{m}$, further formation was performed by polishing with the interferometric inspection.

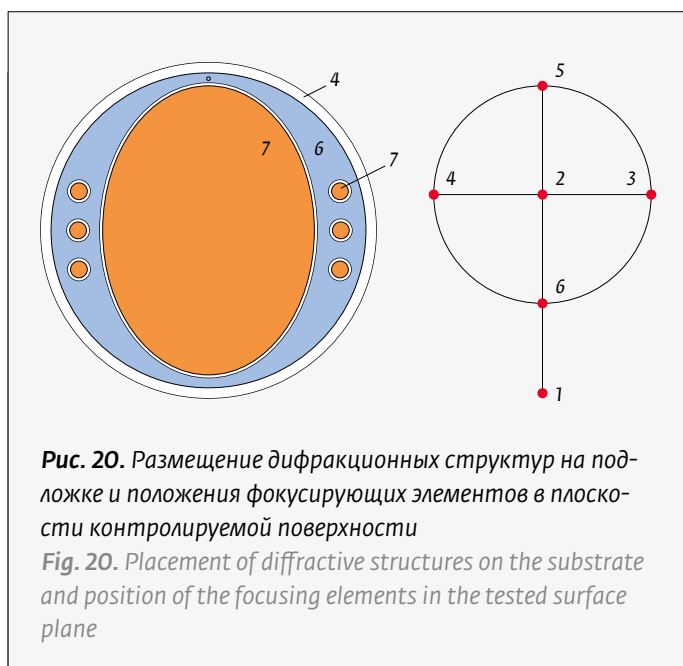


Рис. 20. Размещение дифракционных структур на подложке и положения фокусирующих элементов в плоскости контролируемой поверхности
Fig. 20. Placement of diffractive structures on the substrate and position of the focusing elements in the tested surface plane

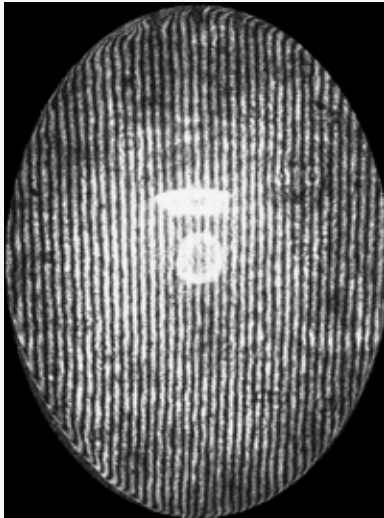


Рис. 22.
Интерферо-
грамма кон-
тролируемой
поверхности
Fig. 22. Interfero-
gram of the con-
trolled surface

расчеты, мы получим аналитические формулы для преобразования положения точек на интерферограмме к положению данных точек на реальной детали. Получаем координаты точек на ДОЭ x'_0, y'_0, z'_0 , которым соответствуют точки на контролируемой поверхности x_0, y_0, z_0 .

В качестве примера рассмотрим контроль асферического внеосевого зеркала диаметром $D=1125$ мм, внеосевой параметр $v=925$ мм, $d=88$ мм - диаметр рабочей области ДОЭ $L=5740$ мм. Контроль формы поверхности выполнялся интерферометром с ДОЭ в вертикальной схеме, когда зеркало было установлено во время обработки и контроля на обрабатывающем станке. На рис. 22 приведена интерферо-

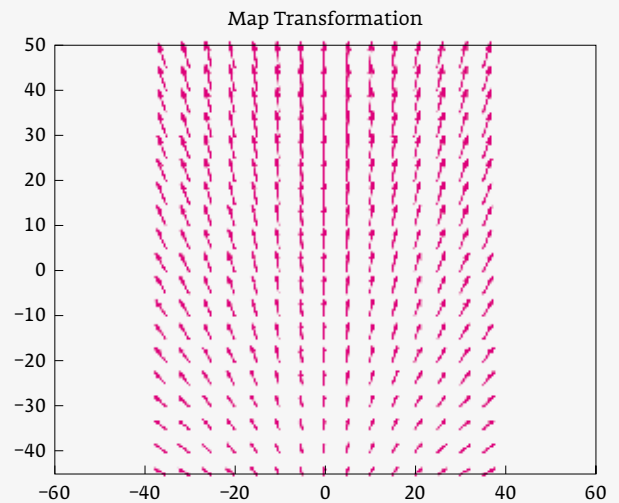
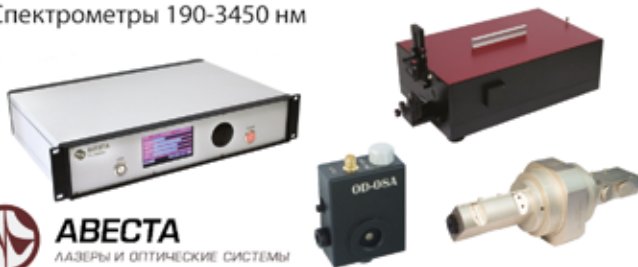


Рис. 21. Связь между координатами поверхности и ДОЭ
Fig. 21. Relations between the surface coordinates and the DOE

The part working surface was tested on a vertical stand using an interferometer with the CGH wavefront corrector. As a rule, the wavefront correctors (both lensed and diffractive) are designed and manufactured to work with the specific aspherical surfaces with due regard to the focal length and the aspherical surface parameters. Fig. 18 demonstrates the CGH with the main structure and auxiliary focusing elements for the CGH adjustment relative to the interferometer and the interferometer + the CGH system relative to the tested part. The interferometer was installed

Диагностика и компоненты

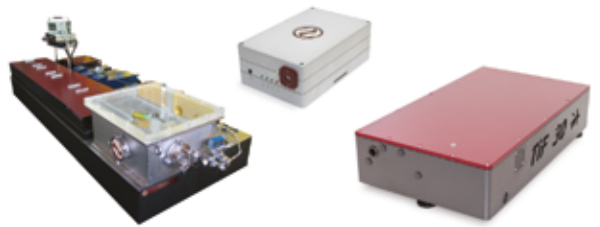
- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400-1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250-2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190-3450 нм



АВЕСТА
ЛАЗЕРЫ И ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 200-9000 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030-1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 20 ТВт

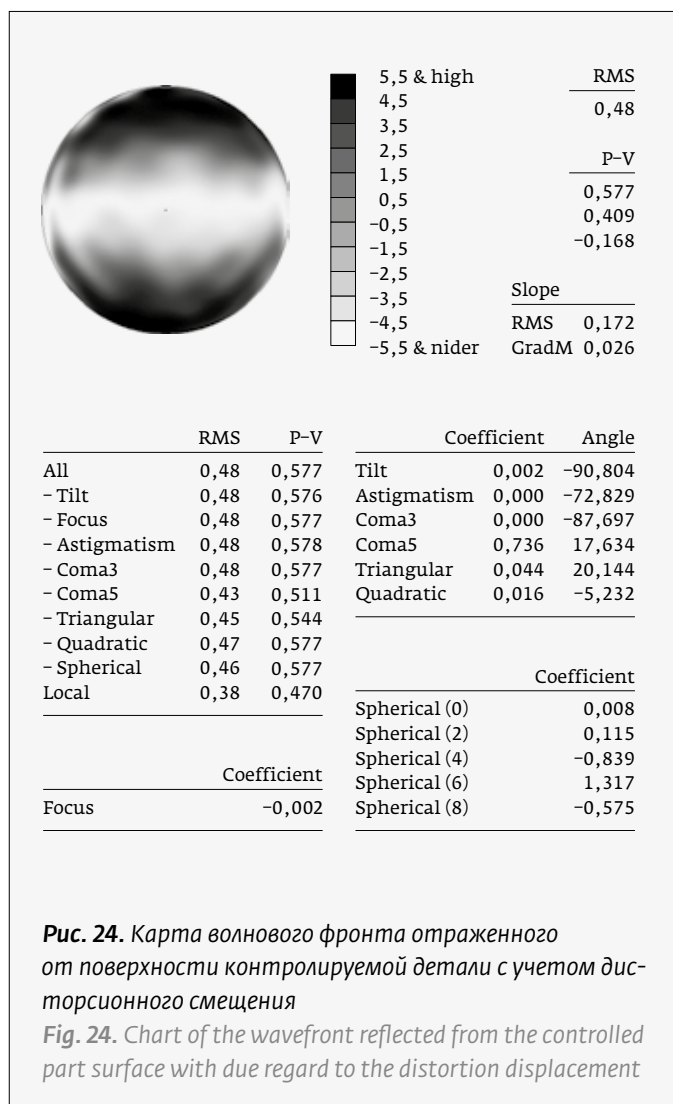
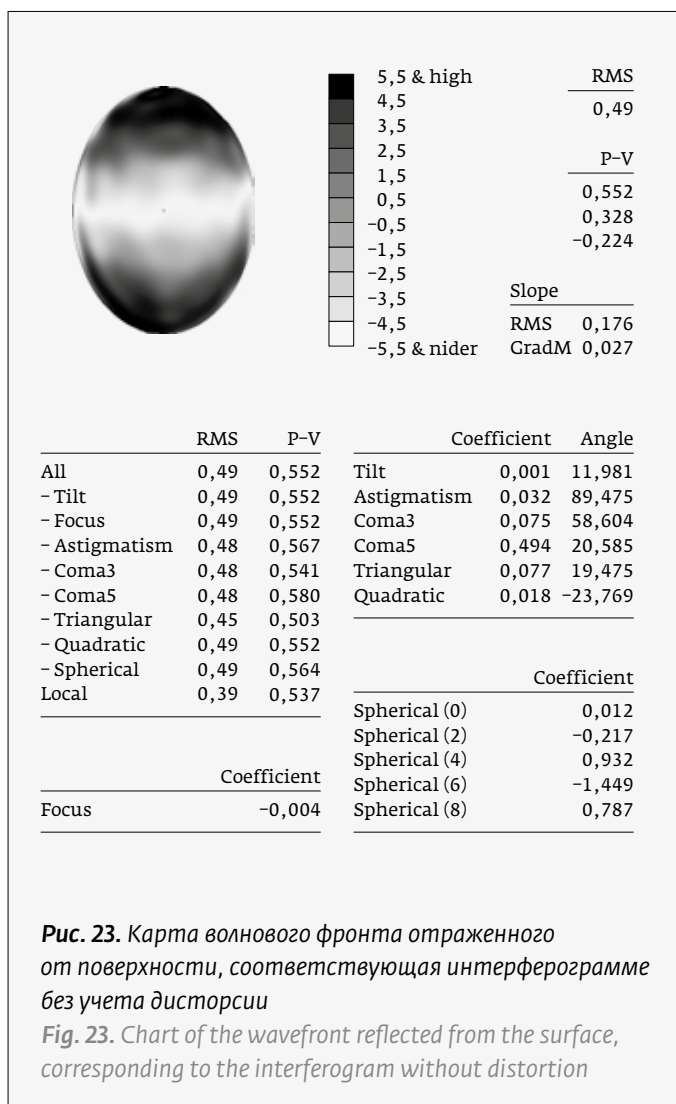


www.avesta.ru

fs@avesta.ru

тел.: (495) 241-00-92

ООО "Авеста-Проект", г. Троицк, г. Москва



грамма на финишной стадии формообразования. На рис. 23 и 24 приведены для сравнения карта волнового фронта, отраженного от поверхности без учета дисторсии и с учетом дисторсии. Здесь RMS – среднеквадратичное отклонение волнового фронта от требуемого, P-V – полный размах отклонений, далее в таблице представлены величины регулярных ошибок астигматизма, триангулярной комы, комы 5-го порядка с соответствующими углами направлений, коэффициентов зональной ошибки, а также величины RMS за вычетом данных регулярных ошибок.

В результате применения способа учета дисторсии для внеосевой асферической поверхности оптической детали при контроле ее с ДОЭ стало возможным проводить программно-управляемые сеансы формообразования малым инструментом существенно повысив точность формообразования за счет точного позиционирования обрабатываю-

in front of the CGH at a distance of 300 mm. The CGH was located relative to the surface vertex at a distance of 5740 mm.

The laser interferometer 2 (of the Twyman-Green type) is located above the tested part 1 (Fig. 19) with an extra-axial aspherical surface. There is a diffractive optical element 3 in front of it located in such a way and at such a distance that the light flux covers the entire controlled surface. The used CGH 3 consists of an optical round substrate 4 (Fig. 20), on which the main diffraction structure 5 and additional structures (centering 6 and focusing 7 structures) are placed in the form of six focusing points. At first, the CGH 3 is adjusted and centered relative to the interferometer 2 according to the reference wavefront interferogram from the centering structure 6, and then the CGH interferometer is centered relative to the measured surface of the part 1 using six focusing points of the

щего инструмента на поверхности детали и автоматизации процесса определения дисторсионных смещений, что сократило время обработки результатов контроля формы поверхности. В ряде случаев формообразование внеосевых высокоасферических поверхностей без определения дисторсии данным методом при контроле с использованием ДОЭ, с математическим преобразованием, вообще не представляется возможным.

Учет децентрировки важен также и при обработке выпуклых вторичных зеркал, когда необходимо совместить асферическую поверхность с геометрическим центром детали. Когда для этого можно изготовить полноапертурную голограмму CGH, это более простой и надежный способ юстировки контролируемой поверхности с CGH, а если размеры детали существенно превышают голограмму, то задача усложняется, но она решается при наличии на подложке фокусирующих элементов в плоскости контролируемой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АО ЛЗОС использует современные средства контроля – интерферометры с дифракционными оптическими элементами для выполнения их юсти-

structure 7 that are focused on the part surface in the specified areas (Fig. 20). It ensures and guarantees the adjustment accuracy. The main structure 5 (Fig. 20) is used for interferometric inspection of the aspherical surface shape of the extra-axial part 1. Fig. 21 shows the relations between the coordinates on the controlled part surface and on the projection of the CGH surface, i. e. which points on the CGH in which direction and by which value are displaced relative to the same points on the part surface.

The aspherical surface vertex point O is located beyond the controlled mirror (Fig. 19). The optical axis passing through the aspherical surface vertex O intersects the CGH plane at the point O' outside the CGH at a distance H_1 from the CGH center C' and at a distance H_2 from the point O' to the perpendicular from the vertex O to the intersection with the CGH plane. The OO' segment length is equal to L and is set when designing the CGH. The tilt angle of the CGH plane relative to the optical axis is β . The distance from the point O' in the CGH plane to the mirror vertex O is equal to $S=L\cos\beta$, $H_2=L\sin\beta$. C' is the CGH center; C is the extra-axial part center; V is an extra-axial parameter, the part center displacement from the optical axis. X, Y, Z represent the coordinate

ОАО «ММЗ имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга «БелОМО»

БЕЛОМО
ММЗ ВАВИЛОВА

Оптический завод «Сфера»

«Оптический завод «Сфера» основан в 1994 году как филиал ОАО «Минский механический завод имени С.И. Вавилова – управляющая компания холдинга БелОМО» для производства оптических элементов. В настоящее время завод выпускает большое количество оптических элементов различной сложности по чертежам Заказчика. Оптические элементы, произведенные «Оптическим заводом «Сфера», успешно применяются во многих уникальных оптоэлектронных системах.

Для производства высокотехнологичной продукции проводится техническое переоснащение производства, проводится модернизация производственных мощностей с целью увеличения объемов производства. Система менеджмента качества сертифицирована на соответствие требованиям версии ГОСТ ISO 9001:2015.

Многолетний опыт производства оптических элементов, высококвалифицированный персонал предприятия позволяют удовлетворить любую потребность Заказчика.

Республика Беларусь, 220114,
г. Минск, ул. Макаенка, 23
Тел.: (+375 17) 325-52-91
Тел./факс: (+375 17) 276-27-71
E-mail: sfera.ved@belomo.by; sfera@belomo.by

www.belomo.by





ровки относительно поверхности оптической детали и высокоточного формообразования осевой и внеосевой крупногабаритной оптики, определения параметров рабочих поверхностей оптических деталей с учетом дисторсионных искажений, вносимых дифракционными оптическими элементами, определения оптической вершины зеркала и т. д. Это в итоге позволило существенно расширить возможности в обработке широкого класса внеосевой асферической оптики.

REFERENCES

1. **Poleshchuk A. G., Matochkin A. E.** Lazernye metody kontrolya asfericheskoy optiki. *Photonics Russia*. 2011;2:38–44.
Полещук А. Г., Маточкин А. Е. Лазерные методы контроля асферической оптики. *Фотоника*. 2011;2:38–44.
2. **Poleshchuk A. G., Homutov V. N., Matochkin A. E., Nasyrov R. K., Sherkashin V. V.** Lazernye interferometry dlya kontrolya formy opticheskikh poverkhnostej. *Photonics Russia*. 2016;4: 38–50.
Полещук А. Г., Хомутов В. Н., Маточкин А. Е., Насыров Р. К., Черкашин В. В. Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей. *Фотоника*. 2016;4: 38–50.
3. **Tom L. Zobrist, James H. Burge, Warren B. Davison, Hubert M. Martin.** Measurements of large optical surfaces with a laser tracker. *Proc. of SPIE*. 2008; 701:70183U1–70183U-12. DOI: 10.1117/12.789934.
4. **Martin H. M., Burge J. H., Cuerden B., Davison W. B., Kingsley J. S., Kittrell W. C., Lutz R. D., Miller S. M., Zhao C., Zobrist T.** Progress in manufacturing the first 8.4 m off-axis segment for the Giant Magellan Telescope. *Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation*. *Proc. SPIE*. 2008;7018. DOI: 10.1117/12.789805.
5. **Burge J. H., Kot L. B., Martin H. M., Zehnder R., Zhao C.** Design and analysis for interferometric measurements of the GMT primary mirror segments. *Proc. SPIE*. 2006;6273: 6273–22–16273–22–12. DOI: 10.1117/12.672484.
6. **Martin H. M., Allen R. G., Burge J. H. et al.** Production of primary mirror segments for the Giant Magellan Telescope», in *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. *Proc. SPIE*. 2014; 9151: 91510J. DOI: 10.1117/12.2057012.
7. **Sahmali A. E., Yesilyaprak C., Sinan K. Yerli S. K., Keskin O.** Observatory building design: a case study of DAG with infrastructure and facilities. *Proc. SPIE*. 2016;9911: 99112S-1–99112S-4. DOI:10.1117/12.2234386.
8. **Pirnay O., Lousberg G. et al.** DAG 4m telescope: assembly, integration and testing. *Proc. SPIE*. 2018; 10700, Ground-based and Airborne Telescopes VII, 107001Y (6 July). DOI:10.1117/12.2313476.
9. **Semenov A. P., Abdulkadyrov M. A., Patrikeev A. P., Patrikeev V. E., Pridnya V. V.** M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: current status. *Proc. SPIE*. 2010;7739: 773907. DOI: 10.1117/12.856107.
10. **Semenov A. P.** Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): fabrication features. *Proc. SPIE*. 2012;8450: 84504R-1–84504R-14. DOI: 10.1117/12.924645.
11. **Abdulkadyrov M. A., Semenov A. P. et al.** Production of M1, M2 and M3 mirrors for DAG project (Belgium, Russia). Current status. *Proc. SPIE*. 2018;10706: 1070631-1 – 1070631-14. DOI: 10.1117/12.2311637.
12. **Abdulkadyrov M. A., Semenov A. P., Dobrikov N. S., Ignatov A. N., Patrikeev V. E.** Factors, affecting the mirror figure stability, and methods used to eliminate them. *Proc. SPIE*. 2020;11451. *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*, 114514C-1–114514C-8 (). DOI: 10.1117/12.2561085.
13. **Poleshchuk A. G., Korolov V. P., Nasyrov R. K., Asfour J.-M.** Computer generated holograms: fabrication and application for precision optical testing. *Proc. SPIE*. 2008;7102, 710206. DOI: 10.1117/12.797816.
14. **Poleshchuk A. G.** Computer generated holograms for aspheric optics testing. *Proc. SPIE*. 2009; 7133:713333-1–713333-9. DOI: 10.1117/12.821243.
15. **Poleshchuk, A. G.** Fabrication and application of diffractive optical elements. *Proc. SPIE*. 2010;7544:75443L-1–75443L-12. DOI: 10.1117/12.887434.
16. **Semenov A. P., Abdulkadyrov M. A. et al.** Difrakcionnye opticheskie system of the part relative to the mirror vertex. X', Y', Z' represent the CGH coordinate system.

These relations were obtained analytically [23]. The CGH plane (Fig. 19) intersects the optical axis OO' in the beam O' at a distance H_1 from the CGH center and is located at a distance S from the mirror vertex. The CGH plane is inclined at an angle β to the optical axis. The part of the aspherical surface belonging to the extra-axial workpiece is shown below with the dimensions D . Its center C is located at a distance V from the optical axis. The optical vertex of the aspherical mirror is beyond its surface at the point O . The CGH testing feature is that the beams passing along the normals from the controlled part surface, fall on the CGH. They are shown on the interferogram at certain points, the position of which must be determined. Thus, it is necessary to calculate where the normals from the part surface fall on the CGH by replacing the part coordinate system with the CGH coordinate system, turning it by an angle β and displacing it by the value S along the Z axis and by the value $H_1 + H_2$ along the Y axis. Having performed such calculations, we will obtain analytical formulas for converting the point position on the interferogram to the position of these points on a real part. We will get the coordinates of points on the CGH x'_0, y'_0, z'_0 that correspond to the points on the controlled surface x_0, y_0, z_0 .

As an example, we will consider inspection of an aspherical extra-axial mirror with a diameter of $D=1125$ mm, and an extra-axial parameter of $v=925$ mm. $d=88$ mm is the CGH working area diameter, $L=5740$ mm. The surface shape was tested with a CGH interferometer on a vertical stand, when the mirror was installed during processing and inspection on a processing machine. Fig. 22 shows an interferogram at the final formation stage. Figures 23 and 24 demonstrate a chart of the wavefront reflected from the surface without distortion and with distortion for comparison. In this case, RMS is the root mean square deviation of the wavefront from the required one, P-V is the full range of deviations. The table below shows the values of regular errors, such as astigmatism, triangular coma, 5th order coma with the relevant directional angles, zonal error coefficients, as well as the RMS values minus these regular errors.

As a result of applying the distortion consideration method for the extra-axial aspherical surface of an optical part during its CGH testing, it has become possible to conduct the program-controlled formation with a small tool, while significantly

21-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ



weldex

0+

11-14
ОКТАБРЯ

2022

РОССИЯ, МОСКВА
КРОКУС ЭКСПО

Разделы выставки:

- Оборудование и материалы для сварки
- Оборудование для резки металла
- Промышленные роботы
- Нанесение защитных и упрочняющих покрытий
- Оборудование для контроля качества сварных соединений
- Инструменты и приспособления для сварочных работ
- Средства индивидуальной и коллективной защиты
- Оборудование для обработки кромок



weldex.ru

Официальная поддержка:



Свяжитесь с Организатором, чтобы узнать об условиях участия: weldex@hyve.group | +7 (499) 750-08-28



- elementy (CGH) dlya kontrolya, yustirovki i pozicionirovaniya asfericheskikh poverhnostej astronomicheskikh i kosmicheskikh zerkal. *Kontenant*. 2019; 18(4): 72–74.
- Семенов А. П., Абдулкадыров М. А. и др. Дифракционные оптические элементы (CGH) для контроля, юстировки и позиционирования асферических поверхностей астрономических и космических зеркал. *Контенант*. 2019; 18(4): 72–74.
17. **Semenov A. P., Abdulkadyrov M. A. et al.** Experience of Computer Generated Holograms (CGH) Application for Testing, Alignment and Positioning of Astronomical and Space Mirrors Aspherical Surfaces. *Proc. SPIE*. 2019; 11341: 113411L–1–113411L–8. DOI: 10.1117/12.2547477.
18. **Семенов А. П.** Metod opredeleniya decentrirrovki asfericheskoy poverhnosti otноситel'no geometricheskogo centra astronomicheskogo zerkala. *Opticheskij zhurnal*. 2015; 82(2):43–50. OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260; DOI: 10.1364/JOT.82.000095.
- Семенов А. П. Метод определения децентрировки асферической поверхности относительно геометрического центра астрономического зеркала. *Оптический журнал*. 2015; 82(2):43–50. OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260; DOI: 10.1364/JOT.82.000095.
19. RU Patent 2534815. *A method for measuring the decentering of the optical axis of an aspherical surface and a spherometer for implementing the method / Semenov A. P., Patrikeev V. E.* Патент RU 2534815. *Способ измерения децентрировки оптической оси асферической поверхности и сферометр для осуществления способа / Семенов А. П., Патрикеев В. Е.*
20. RU Patent 2758928. *A method for measuring the decentering of the optical axis of an aspherical surface / Semenov A. P., Patrikeev V. E., Nikonov A. B., Morozov A. B., Nasyrov R. K.* Патент RU № 2758928. *Способ измерения децентрировки оптической оси асферической поверхности / Семенов А. П., Патрикеев В. Е., Никонов А. Б., Морозов А. Б., Насыров Р. К.*
21. **Novak M., Zhao C., Burge J. H.** Distortion mapping correction in aspheric null testing. *Proc. of SPIE*. 2008; 7063: 706313–1–706313–8. DOI: 10.1117/12.798151.
22. **Burmeister F., Ehrhardt S., Benkenstein T., Lammers T., Klein A. C., Schleicher P. et al.** CGH for ESO's ELT M2 reference plate: fabrication of high precision CGHs. *Proc. SPIE* 11451. *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*. 2020; 114510W. DOI: 10.1117/12.2562827.
23. **Семенов А. П., Абдулкадыров М. А., Ignatov A. N., Morozov A. B., Nikonov A. B., Patrikeev V. E., Pridnya V. V., Polyanchikov A. V., Nasyrov R. K.** Methods used to test surface figure and optical parameters of axial and off-axis surfaces of large-sized mirrors at the stage of Figuring. *Proc. SPIE* 11451. *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*. 2020; 114513E–1–114513E–11. DOI: 10.1117/12.2561082.

АВТОРЫ

- Семенов Александр Павлович – ведущий инженер АО «Лыткаринский завод оптического стекла», канд. тех. наук
ORSID ID 0000-0001-8769-8111
Участие: программно-математическая реализация обработки результатов контроля, формообразование асферической оптики, анализ и подготовка технических материалов.
- Абдулкадыров Магомед Абдуразакович – помощник главного инженера АО «Лыткаринский завод оптического стекла», канд. тех. наук
Участие: общее руководство, административное сопровождение.
- Патрикеев Владимир Евгеньевич – зам. начальника АО «Лыткаринский завод оптического стекла»
Участие: математическое моделирование обработки результатов оптического контроля.
- Морозов Алексей Борисович – начальник бюро АО «Лыткаринский завод оптического стекла»
Участие: разработка и монтаж стенда контрольного оборудования, проведение контроля асферики, разработка методики контроля и его анализа.
- Насыров Руслан Камильевич – и. о. зав. лаборатории Института автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, канд. тех. наук, Новосибирск, Россия
Участие: расчет и изготовление корректоров волнового фронта.

increasing the formation accuracy due to precise positioning of the processing tool on the part surface and automation of the distortion determination process. It has reduced the processing time for the surface shape testing results. In a number of cases, during the CGH testing processes, the formation of extra-axial highly aspherical surfaces without distortion determination by this method and with mathematical transformation is not possible at all.

The decentering consideration is also important when processing the convex secondary mirrors, when it is necessary to match the aspherical surface with the geometric center of the part. When it is possible to make a full-aperture CGH hologram, this is a simpler and more reliable adjustment method for the controlled surface with CGH. If the part dimensions significantly exceed the hologram ones, then the problem becomes more complicated. However, it can be solved if there are focusing elements on the substrate in the controlled surface plane.

CONCLUSION

LZOS JSC applies the advanced testing tools, such as the interferometers with diffractive optical elements to perform their alignment relative to the optical part surface and high-precision formation of axial and extra-axial large-sized optics, to determine the working surface parameters of the optical parts, with due regard to the distortions induced by the diffractive optical elements, to determine the mirror optical vertex, etc. As a result, this made it possible to significantly expand the possibilities for processing a wide range of extra-axial aspherical optics.

ABOUT AUTHORS

- Semenov Aleksander Pavlovich – a leading engineer of Lytkarinsky Optical Glass Plant JSC, Cand. of sciences (Engin.)
ORSID ID 0000-0001-8769-8111
Participation: software and mathematical implementation of the testing results, formation of aspherical optics, technical materials analysis and preparation.
- Abdulkadyrov Magomed Abdurazakovich – assistant chief engineer of Lytkarinsky Optical Glass Plant JSC, Cand. of sciences (Engin.).
Participation: overall supervision, administrative support.
- Patrikeev Vladimir Evgenievich – deputy head of Lytkarinsky Optical Glass Plant JSC
Participation: mathematical modeling of the optical inspection results.
- Morozov Aleksey Borisovich – head of the bureau, Lytkarinsky Optical Glass Plant JSC
Participation: development and installation of a control equipment stand, aspheric control, development of control methods and its analysis.
- Nasyrov Ruslan Kamilevich – acting laboratory head of the Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Ph.D. in technical sciences, Novosibirsk, Russia
Participation: design and production of wavefront correctors.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Цена 2 600 руб.

Ян Гибсон, Дэвид Розен, Брент Стакер

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство

Перевод с англ. книги издательства «Springer»
под ред. д.ф.-м.н., проф. И.В. Шишковского
М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 648 с. ISBN 978-5-94836-447-6

Предисловие к русскому изданию

Я был очень рад, когда услышал, что профессор Игорь Шишковский будет научным редактором русского издания нашей монографии. Обладая многолетним и богатым опытом в данной области, этот известный ученый и педагог сможет гарантировать как техническую точность, так и ясность изложения. Поскольку русский язык является одним из самых распространенных языков в мире, этот перевод позволит значительно расширить аудиторию, которая сможет впервые получить доступ к данной информации. Я надеюсь, что исследователи, студенты и преподаватели найдут эту книгу прекрасным дополнением к своей коллекции, и что она расширит их познания в быстро развивающихся областях аддитивных технологий.

Брент Стакер
профессор, университет Луисвилля (Кентукки, США)

Содержание

Предисловие

Глава 1. Введение и описание основных принципов

Глава 2. Развитие технологий АП

Глава 3. Общая последовательность процесса АП

Глава 4. Процесс фотополимеризации в ванне

Глава 5. Плавление порошков в сформированном слое

Глава 6. Экструзионные системы

Глава 7. Распыление материала методом струйной печати

Глава 8. Распыление связующего для струйной печати

Глава 9. Процессы ламинирования листовых (слоистых) материалов

Глава 10. Процессы направленного энерговклада

Глава 11. Технологии прямой записи

Глава 12. Преимущества бюджетных систем АП

Глава 13. Руководство по выбору процесса

Глава 14. Постобработка

Глава 15. Задачи программного обеспечения в АП

Глава 16. Прямое цифровое производство

Глава 17. Проектирование для АП

Глава 18. Быстрое изготовление инструмента

Глава 19. Применения АП

Глава 20. Возможности для бизнеса и будущее АП



**ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ:
www.technosfera.ru**

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По телефону: (495) 234-01-10
E-mail: knigi@technosfera.ru
sales@technosfera.ru