

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-95-114

УДК 520.2.066 + 520.2.062 + 520.2.03 + 681.7.022 + 681.786.5 + 687.7.022.32

Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля оптических асферических поверхностей в Государственном институте прикладной оптики. Обзор

Анатолий Васильевич Лукин

Государственный институт прикладной оптики, Казань, Россия
gipo@telebit.ru <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>

Аннотация

Предмет исследования. Эволюция технологии формообразования асферических оптических поверхностей различных типов, методы и средства их контроля, метрологическое обеспечение процессов и аппаратуры в Государственном институте прикладной оптики. **Цель работы.** Обосновать и проиллюстрировать на конкретных примерах актуальность и целесообразность радикальных преобразований в современном серийном оптическом производстве и объективостроении на основе реализации производительных технологий прецизионного фотополимерного реплицирования различных типов оптических поверхностей и лазерно-голографических методов их контроля. **Метод.** В основе большинства традиционных технологий формообразования асферических рабочих поверхностей оптических элементов (линз, зеркал) лежат шлифование и полирование. Заметное место в производстве асферики занимают станки алмазного микрооточения. Особую значимость для серийного и массового изготовления асферических деталей имеют моллирование и реплицирование. **Основные результаты.** Показано, что для осуществления возможности как уникального, так и серийного изготовления асферической оптики необходимо решение триединой проблемы создания производительных технологий прецизионного формообразования оптических асферических поверхностей, методов и средств их высокоточного контроля и метрологического обеспечения этих технологий и контрольно-измерительной аппаратуры. Такое решение найдено в Государственном институте прикладной оптики на основе технологий прецизионного реплицирования и контроля формы асферических поверхностей методами лазерно-голографической интерферометрии с использованием осевых синтезированных голограмм в качестве образцовых оптических элементов и оптических компенсаторов (нуль-корректоров). Предложена иерархия мастер-матриц: эталонные, контрольные и рабочие, причем эталонные мастер-матрицы для крупносерийного и массового производства асферических оптических элементов целесообразно изготавливать парами (выпуклая + вогнутая). **Практическая значимость.** В результате резкого роста потребностей оптико-электронного приборостроения в объективах различного назначения (смартфоны, планшеты, цифровые фотоаппараты, тепловизионная аппаратура, системы видеонаблюдения и безопасности и др.) возникла острая необходимость многократного повышения производительности и существенного снижения себестоимости изготовления базовых оптических элементов. Технологии прецизионного реплицирования и лазерно-голографические методы контроля асферических поверхностей открыли принципиальную и практическую возможности решения этой проблемы.

Ключевые слова: формообразование асферических поверхностей, прецизионное реплицирование, комбинированный оптический элемент, составное крупноформатное зеркало, интерферо-

метрический контроль формы асферических поверхностей, квазиавтоколлимация, подложка с конической рабочей поверхностью, каскад отражательных оптических компенсаторов

Ссылка для цитирования: 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>

Коды OCIS: 240.6700, 160.5470, 110.6770, 350.1260

Shaping technologies and methods of optical aspherical surfaces laser-holographic control at the State Institute of Applied Optics. A review

ANATOLY V. LUKIN

State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

gipo@telebit.ru <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>

Abstract

Subject of study. The evolution of technologies for the various types formation of aspherical optical surfaces, methods and means of their control, metrological support for processes and equipment at the State Institute of Applied Optics. **The purpose of the work** is to substantiate and illustrate with specific examples the relevance and feasibility of radical transformations in modern serial optical production and lens construction based on the implementation of productive technologies for precision photopolymer replication of various types of optical surfaces and laser-holographic methods for their control. **The research method.** The majority of traditional technologies for shaping aspherical working surfaces of optical elements (lenses, mirrors) are based on grinding and polishing. Diamond microturning machines occupy their noticeably expanding niche in the production of aspherical optics. Molding and replication are of particular importance for serial and mass production of aspherical parts. **Main results.** It has been shown that, in order to implement the possibility of both one-off and serial production of aspherical optics, it is necessary to solve the triune problem of creating productive technologies for precision shaping of optical aspherical surfaces, methods and means of their high-precision control, and metrological support of these technologies and control instrumentation. Such a solution was found at the State Institute of Applied Optics based on the technologies of precision replication and aspherical surfaces shape control via laser-holographic interferometry based on the use of on-axis computer-generated holograms as exemplary optical elements and optical compensators (zero correctors). Given paper work suggests the following hierarchy of master-details: reference detail coming first, followed by calibration and working; it is in this way that it is advisable to produce pairs (convex + concave) of reference master details for serial and mass production of aspherical optical elements via the precision replication method. **Practical significance.** As a result of the recent sharp increase in the needs of optoelectronic instrumentation in lenses for a wide spectral region and for various purposes (smartphones, tablets, digital cameras, thermal imaging equipment, video surveillance and security systems, etc.) there is an urgent need to significantly increase productivity and reduce the manufacturing costs of basic optical elements. Precision replication technologies and laser-holographic aspherical surfaces control methods have opened up theoretical and practical possibilities for solving this problem.

Keywords: aspherical surface shaping, precision replication, combined optical element, composite large-format mirror, interferometric aspherical surfaces shape control, quasi-autocollimation, substrate with a conical working surface, cascade of reflective optical compensators

For citation: Lukin A.V. Shaping technologies and methods of optical aspherical surfaces laser-holographic control at the State Institute of Applied Optics. A review // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 3. P. 95–114. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-95-114>

OCIS codes: 240.6700, 160.5470, 110.6770, 350.1260

ВВЕДЕНИЕ

Применение асферики — наиболее эффективное и универсальное средство улучшения качества и массо-габаритных характеристик оптических систем различного назначения [1–6]. Существует два типа производства асферики — уникальное и серийное.

Уникальные, преимущественно крупноформатные оптические системы (прежде всего — оптические телескопы) в большинстве своем изготавливаются без жесткой регламентации установленных сроков, при этом до сих пор используются традиционная технология ретуши, а также геодезические и теневые методы контроля [7, 8]. Конечный результат стопроцентно зависит от мастерства (вернее — искусства!) рабочего-оптика, поэтому в значительной степени благодаря таланту и усердию таких работников изготавливаемая асферика неизбежно принимает заданную форму.

Серийное производство асферики требует изготовления оптических деталей, как правило, в жестко установленные сроки, в заданном количестве и с требуемым качеством. И всегда этому было два основных препятствия [2–4, 9]

- относительно низкая производительность формообразования асферических поверхностей (АП) в оптическом производстве,
- несовершенство применяемых методов и средств контроля их формы.

Фактически, для каждой новой достаточно серьезной асферики приходилось разрабатывать свою «особенную» контрольную схему с соответствующим компенсационным объективом (нуль-корректором), который не всегда удавалось даже рассчитать с необходимой точностью, а тем более изготовить его с требуемым качеством и в установленный срок. Заметим, что аттестация зеркально-линзовых компенсаторов нередко до сих пор представляет непростую задачу.

Таким образом, чтобы современное серийное оптическое производство и объективостроение стало эффективным и производительным, необходимы радикальные преобразования. И один из наиболее реальных путей — реализация производительных технологий прецизионного фотополимерного реплицирования различных типов оптических поверхностей и лазерно-голографических методов их контроля.

Цель работы — обосновать и проиллюстрировать на конкретных примерах актуальность и целесообразность радикальных преобразований в современном серийном оптическом производстве и объективостроении на основе реализации производительных технологий прецизионного фотополимерного реплицирования различных типов оптических поверхностей и лазерно-голографических методов их контроля.

ЗАРОЖДЕНИЕ И СТАНОВЛЕНИЕ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ГИПО

С начала 60-х гг. прошлого века в мировом и отечественном оптическом приборостроении резко возросла потребность в асферической оптике высокого качества для ряда ведущих отраслей науки и техники: тепловидение, наблюдательная астрономия, дистанционное зондирование Земли, камеры наблюдения и значительно позднее — фотокамеры мобильных телефонов и смартфонов.

В это время, еще будучи в ранге филиала ГОИ им. С.И. Вавилова, Государственный институт прикладной оптики (ГИПО) был определен головным предприятием в отрасли по ряду научных направлений, в том числе по разработке технологий и оборудования для изготовления асферических оптических деталей, а несколько позднее — и по прикладной голографии [10].

Дальнейшее ускоренное развитие этих двух важнейших для отрасли научно-технологических направлений осуществлялось в рамках созданного по инициативе руководства ГИПО, поддержанной руководством отрасли, научно-технологического комплекса дифракционной, асферической и интегральной оптики, возглавить который было поручено автору настоящей статьи. Работы в научно-технологическом комплексе были организованы преимущественно по замкнутым циклам: от оптических расчетов и изготовления подложек до аттестации изготовленных изделий и отправки их заказчикам.

Особо надо отметить высокую значимость развернутых в это время работ по внедрению технологий формообразования АП, в частности, в ГИПО было организовано изготовление и аттестация асферических пробных стекол как для внутреннего использования, так и для передачи другим предприятиям отрасли,

имеющим оптическое производство. Был разработан и вступил в действие с 01.01.1981 г. сборник отраслевых стандартов [11].

ТРАДИЦИОННОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В относительно короткие сроки были разработаны устойчивые технологии прецизионного формообразования АП на основе использования линейки автоматизированных шлифовально-полировальных станков нового поколения серии «Планета» и упруго-деформируемого инструмента [2, 10].

Разработка этих станков была выполнена Минским механическим заводом по техническим заданиям и под общим научным руководством ГИПО. В результате были разработаны 4 модели, обеспечивающие формообразование АП диаметром от 20 до 500 мм. После организации их серийного выпуска ими были оснащены оптические производства всех оптико-механических предприятий отрасли. С 1971 по 1988 г. было выпущено около 100 таких станков [10].

В этот период в течение ряда лет шлифование АП выполнялось на основе использования упруго-деформируемых многолепестковых инструментов с профилем переменной толщины [2, 12]. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведена фотография одного из типичных образцов такого инструмента.

Видно, что инструмент этого типа имеет довольно сложную конструкцию, а его расчет, изготовление и настройка представляют в совокупности непростую и весьма трудоемкую техническую задачу. Именно по этой причине с конца 1990-х гг. пришлось отказаться от него в пользу жесткого прецизионного полноразмерного инструмента.

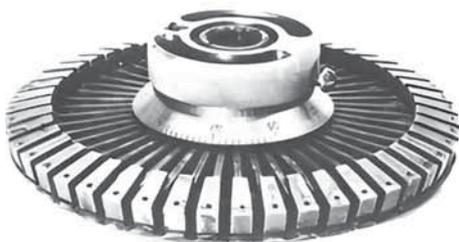


Рис. 1. Внешний вид упруго-деформируемого многолепесткового инструмента

Fig. 1. Layout of elastically deformable multi-leaf tool

Следует отметить весьма важную роль прецизионной ретуши на доводочных этапах формообразования АП. Здесь практически все зависит от мастерства рабочего-оптика, научившегося «читать» теневые и интерференционные картины, получаемые в лазерно-голографических контрольных приборах, и соответственно корректировать рабочую поверхность полировальника [2, 9].

ЛАЗЕРНО-ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Параллельно с созданием новых технологий формообразования АП в ГИПО велись разработки лазерно-голографических методов и аппаратуры для интерферометрического контроля разнообразных типов асферики. Было найдено кардинальное решение данной проблемы на основе использования осевых синтезированных голограмм в качестве оптических образцов и компенсаторов (нуль-корректоров) [2, 5].

В первых зарубежных работах, посвященных рассмотрению возможности применения синтезированных голограмм для контроля оптических АП, использовались неосевые (лейтовские) схемы голографических интерферометров и внеосевые синтезированные голограммы фраунгоферовского типа. Было предложено несколько различных методов их синтеза, отличающихся способами кодирования и отображения расчетных значений комплексной амплитуды голографического поля [13]. Наиболее популярным стал метод Ломана [14]. Его сущность заключается в том, что апертура голограммы условно разделяется на множество непрозрачных одинаковых прямоугольников — так называемых «ячеек разрешения», и в их центрах рассчитываются значения комплексной амплитуды объектной волны. Фаза волны отображается соответствующим смещением отверстия в непрозрачной ячейке относительно ее центра, а модуль амплитуды — площадью этого отверстия. Максимальное смещение отверстия от центра до края в каждой ячейке соответствует изменению фазы волны на $\pm\pi$. Таким образом, для восстановления волнового фронта (ВФ) расчетной формы с помощью голограммы, синтезированной этим методом, необходимо направить на нее наклонную плоскую волну под углом, соответствующим пространственной

частоте выборки. Такая голограмма действует подобно антенной решетке с заданным распределением фаз излучающих элементов, функции которых выполняют отверстия в ячейках голограммы [5, 13–15]. В другом известном методе синтеза голограмм (метод Ли [16]) дискретные значения функции комплексной амплитуды голографического поля кодируются четырьмя действительными величинами. Здесь голограмма также разделяется на множество одинаковых «ячеек». Но при этом каждая из них поделена на четыре секции. Из рассчитанного комплексного значения поля в центре каждой ячейки выделяются действительная и мнимая части. Положительная действительная часть отображается отверстием в первой секции каждой ячейки, причем его площадь пропорциональна значению действительной части. Аналогично в остальных трех секциях отображаются соответственно положительная мнимая, отрицательная действительная и отрицательная мнимая части комплексной амплитуды рассчитанного поля. Очевидно, в каждой ячейке может быть не более двух отверстий.

Изготовление голограммы обоими методами осуществлялось следующим образом. Сначала рассчитанную на компьютере бинарную картину распределения отверстий вычерчивали в крупном масштабе (как правило, с помощью прецизионного графопостроителя). Затем ее фотографически уменьшали до требуемых размеров и получали негатив на высоко разрешающей фотопластинке.

Точность изготовленных таким способом голограмм, очевидно, зависит как от точностных характеристик графопостроителя, так и от качества объектива, применяемого на этапе фотографического уменьшения. Так, например, для синтеза методом Ломана голограммы, использованной при контроле параболического зеркала с асферичностью всего $16\lambda^1$, было затрачено 5 мин машинного времени мощного по тому времени компьютера, а на ее изготовление — 10 час [17].

В отличие от первых зарубежных работ, в ГИПО изначально было решено использовать осевые (габоровские) голографические контрольные схемы и осевые синтезированные голограммы френелевского типа [18, 19]. В данном случае расчет голограммы заклю-

чается в вычислении распределения пропускания или отражения, соответствующего распределению интенсивности в картине интерференции, которая образовалась бы в результате суперпозиции заданных аналитически объектной и опорной монохроматических волн на основе представления о дифрагированном световом луче [5, 20, 21]. Важно отметить, что принципиальной физической основой для синтеза таких голограмм и применения их в качестве оптических эталонов и компенсаторов явилось предложенное нами обобщение теоремы Малюса–Дюпина и обратной теоремы Леви–Чивита (см. С. 158–161 [22]) на случай дифракции (см. С. 34–39 [23])

- нормальная прямолинейная конгруэнция световых лучей остается нормальной после любого числа преломлений, отражений и дифрагирований,

- две любые нормальные прямолинейные конгруэнции световых лучей можно перевести друг в друга с помощью одного преломления, отражения или дифрагирования.

Как прямое следствие обратной теоремы предлагаем более адекватный для данного рассмотрения вариант ее формулировки: «Два любых волновых фронта можно перевести друг в друга с помощью одного преломления, отражения или дифрагирования»².

Именно реализация этого фундаментального свойства пучка (конгруэнции) световых лучей и является принципиальным основанием возможности создания и использования всех типов оптических компенсаторов: линзовых, зеркальных и дифракционных (голограммных), а также всех без исключения контрольных схем на их основе. При этом предпочтительно применение осевых синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ) [9, 20, 21].

Трудоемкость расчета и изготовления таких голограмм, естественно, многократно меньше, чем внеосевых голограмм, синтезированных методами Ломана и Ли, поскольку достаточно рассчитать голографическое поле (в данном случае это простейшая картина интерференции двух геометрических ВФ с осевой симметрией) лишь в его радиальном сечении, а изготовление производится на круговой делительной машине с помощью специального

¹ λ — длина волны излучения.

² В случае дифракции следует иметь в виду лишь геометрический волновой фронт [21].

алмазного резца или сфокусированного лазерного пучка в масштабе 1:1, т.е. фотографическое уменьшение здесь не требуется [5, 9].

Еще большему упрощению процесса изготовления осевых СГОЭ поспособствовало введение «несущей» пространственной частоты. Сущность метода заключается в том, что каждое расчетное кольцо (или полоса — в случае цилиндрической АП) отображается в виде группы колец или прямолинейных полос с постоянным шагом [19].

Время показало, что применение неосевых (лейтовских) голографических контрольных схем и, соответственно, внеосевых синтезированных голограмм в качестве оптических элементов при контроле АП крайне нецелесообразно. Во всех дальнейших зарубежных и отечественных публикациях ставка сделана на реализацию осевых (габоровских) контрольных схем с использованием в них в качестве оптических эталонов или оптических компенсаторов (нуль-корректоров) осевых СГОЭ [24–29]. Показательно, что соавтором одной из первых зарубежных публикаций, в которой также была рассмотрена возможность и отмечена целесообразность реализации осевых голографических интерферометров и круговых синтезированных голограмм, был все тот же W. Lohmann [29]³.

В качестве иллюстрации отображающих возможностей осевых синтезированных голограмм на рис. 2 представлены изображения двух протяженных объектов (стандартной миры № 4 и фрагмента статьи [17]), полученные с помощью осевой голограммной линзы с фокусным расстоянием 200 мм и световым диаметром 20 мм. В качестве источника света использована ртутная лампа ($\lambda = 546$ нм).

С помощью лупы на рис. 2б вверху можно было рассмотреть бинарную структуру («ячейки разрешения») приведенного там фотоснимка голограммы, синтезированной методом Ломана. Эти данные являются также и наглядным свидетельством возможности достижения достаточно высокого уровня отношения сигнал/шум в плоскости регистрации даже при значительных отступлениях испытываемой

оптической поверхности от заданной формы, приводящих к увеличению кружка рассеяния. Более детальные экспериментальные исследования энергетических характеристик осевых синтезированных голограмм показали, что распределение интенсивности в изображениях точки и полуплоскости, формируемых осевой голограммной линзой, а также их первой производной, близки к теоретическому виду [31]. То есть было установлено, что функция рассеяния в обоих случаях при использовании монохроматического источника излучения ($\lambda = 632,8$ нм) соответствует идеальной дифракционно-ограниченной системе [5, 19–21].

В дальнейшем эти высокие точностные возможности осевых СГОЭ были реализованы, в частности, при решении метрологической задачи создания поверочной установки для проверки и калибровки контактных и бесконтактных средств измерений, применяемых в современном оптическом производстве [32, 33]. Используется эталонный набор, включающий в себя осевую синтезированную голограмму на заданный радиус кривизны и пару соответствующих сферических эталонных пробных стекол (выпуклое + вогнутое) с предельно высоким сопряжением [34, 35].

Таким образом, основным результатом первого этапа нашей работы явилось теоретическое и экспериментальное обоснование возможности и целесообразности применения осевых голографических контрольных схем и осевых СГОЭ для технологического и аттестационного тестирования АП оптических деталей, а также содержащих их централизованных оптических систем в объективно- и телескопостроении [5, 9].

Предложенные лазерно-голографические контрольные схемы на основе использования осевых СГОЭ были реализованы в ряде макетных и экспериментальных образцов. После их надлежащих испытаний была разработана рабочая конструкторская документация для мелкосерийного выпуска лазерно-голографической аппаратуры в виде нескольких моделей голографических асферометров серий АГ и ГИП для оснащения оптических цехов и измерительных лабораторий предприятий отрасли [7, 8].

Отметим, что изготовленный в ГИПО прототип голографического асферометра типа АГ был установлен в цехе крупнобаритной оптики ЛЗОС (Лыткарино) на расстоянии около

³ Интересно отметить, что первую осевую бинарную рельефно-фазовую голограмму изготовил Р.В. Вуд еще в начале прошлого века. Она была выполнена в тонком желатиновом слое, нанесенном на стеклянную пластинку, с помощью оригинального устройства и специального иглообразного резца [30].

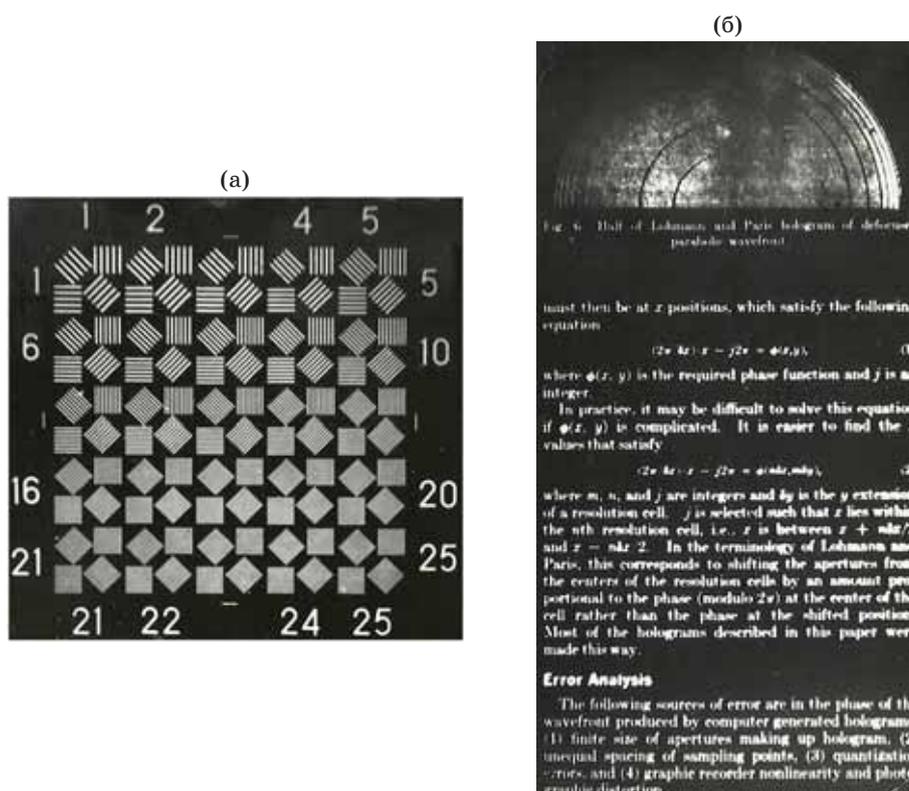


Рис. 2. Изображения стандартной штриховой миры (а) и фрагмента статьи [17] (б), полученные с помощью осевой синтезированной голограммной линзы в свете ртутно-дуговой лампы типа ПРК-4

Fig. 2. Images of (a) standard line map and (б) fragment of an article obtained using an axial synthesized hologram lens in the light of a ПРК-4 type mercury-arc lamp

50 м от оптического станка, на котором изготавливалось параболическое главное зеркало телескопа БТА диаметром 6 м. Для его контроля были выбраны два варианта схемы голографического интерферометра с автоколлимационным и неавтоколлимационным ходом лучей в рабочей ветви, а также рассчитаны, изготовлены и аттестованы два соответствующих СГОЭ-компенсатора [36]. К сожалению, по ряду причин, главной из которых, вероятно, была недостаточная на то время признанность голографических методов в телескопостроении [6–8], эту установку и оба изготовленных СГОЭ-компенсатора не удалось применить по прямому назначению.

Позднее с помощью дополнительно более компактного голографического асферометра типа АГ-3 в этом же цехе был успешно выполнен голографический контроль вогнутого параболического зеркала диаметром 2,4 м с вертикальной ориентацией его оптической оси, а также нескольких вогнутых гиперболи-

ческих и параболических зеркал диаметром 1,5 м с горизонтальной ориентацией их осей.

На рис. 3 представлены основные варианты принципиальных схем традиционного лазерно-голографического контроля с использованием пропускающих СГОЭ-компенсаторов для вогнутых АП, выпуклых АП и линз с любым типом АП. При этом для каждого типа контролируемой детали возможны схемы контроля как с автоколлимационным, так и с неавтоколлимационным ходом лучей.

Аналогично реализуются схемы с отражательными компенсаторами. При автоколлимационном ходе лучей конгруэнция нормалей к АП совпадает с конгруэнцией световых лучей. Обращение ВФ здесь осуществляет контролируемая поверхность. В случае неавтоколлимационного хода лучей («из точки в другую точку») обращение ВФ отсутствует. На практике используются преимущественно автоколлимационные схемы с различными типами оптических компенсаторов, однако

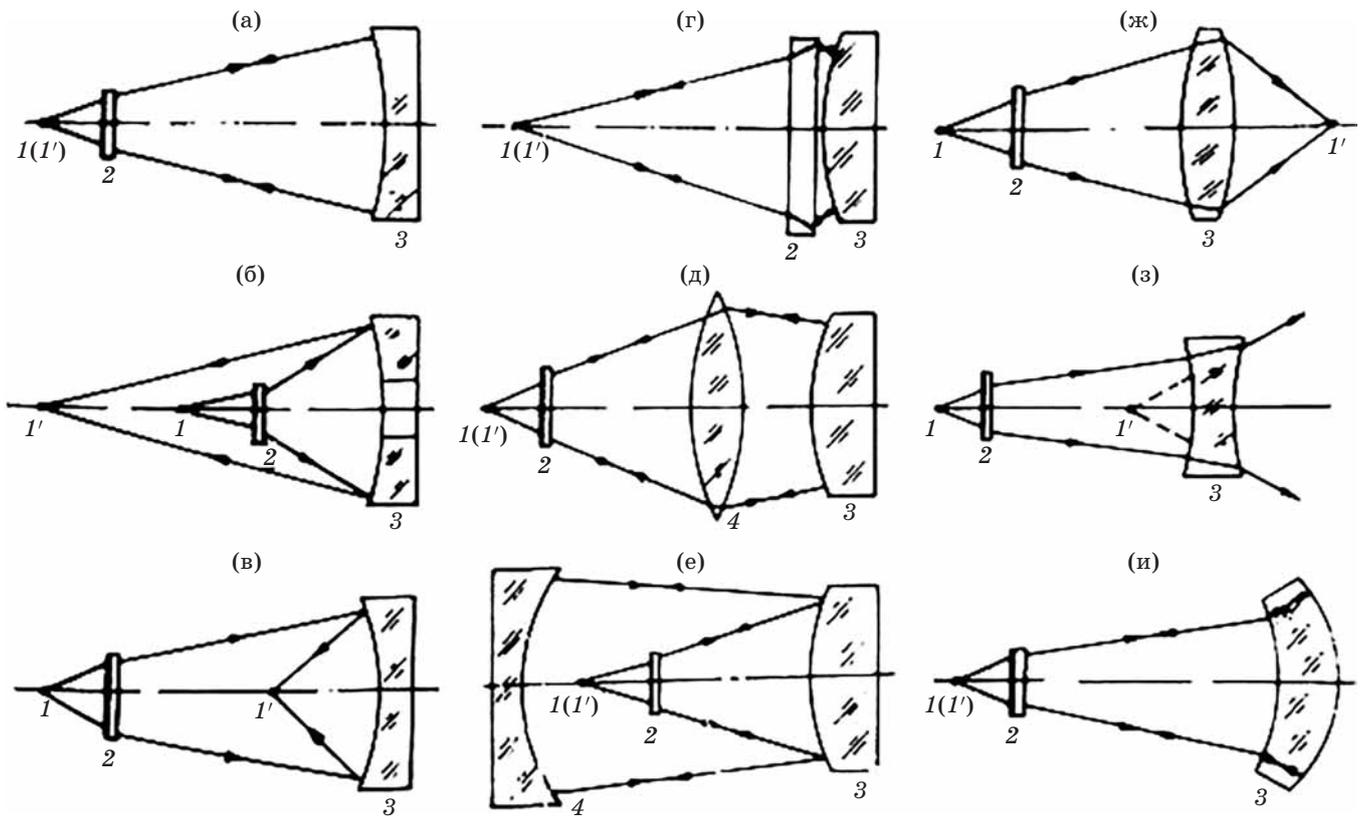


Рис. 3. Варианты схемы лазерно-голографического контроля АП с использованием пропускающих СГОЭ-компенсаторов для контроля вогнутых АП ((а), (б), (в)), выпуклых АП ((г), (д), (е)) и линз с любым типом АП ((ж), (з), (и)). 1, 1' — точечный источник и его изображение, 2 — голограммный оптический компенсатор, 3 — контролируемая АП, 4 — вспомогательный оптический элемент (линза, сферическое зеркало)

Fig. 3. Variants of the scheme for laser-holographic control of aspherical surface using transmitting synthesized hologram optical compensators for monitoring ((a), (b), (v)) concave aspherical surface, ((g), (d), (e)) convex aspherical surface and ((z), (z), (i)) lenses with any type of aspherical surface. (1, 1') Point source and its image, (2) hologram optical compensator, (3) controlled aspherical surface, (4) auxiliary optical element (lens, spherical mirror)

для таких схем характерны дисторсиеподобные (бочкообразные или подушкообразные) искажения в изображении контролируемой оптической поверхности [23, 37].

Особого внимания заслуживает вариант квазиавтоколлимационной модификации схемы на рис. 3а, обеспечивающий возможность реализации интерферометрии радиального сдвига как в «чистом виде», так и в комбинации с одновременным боковым и/или продольным сдвигом [5, 38, 39].

Рисунок 4 поясняет принцип его осуществления. Голограмма рассчитывается как картина интерференции, которая образовалась бы в результате суперпозиции асферической волны, отраженной от контролируемой опти-

ческой поверхности при освещении ее из точки 1 (в 0-ом порядке дифракции голограммы), и виртуальной опорной сферической волны, сходящейся в этой же точке 1. При освещении такой голограммы из точки 1 будет восстановлен ряд волн, из которых лишь две — сферические, сходящиеся после отражения от контролируемой поверхности в точках 1' и 1''. Видно, что они имеют разные апертуры в плоскости голограммы, благодаря чему и осуществляются радиальные сдвиги их ВФ. На рис. 4а они представлены отрезками CD и $C'D$ и соответствуют зонам A и A' контролируемой поверхности.

Рисунок 4б иллюстрирует действительное наличие в интерферометре этих двух сопря-

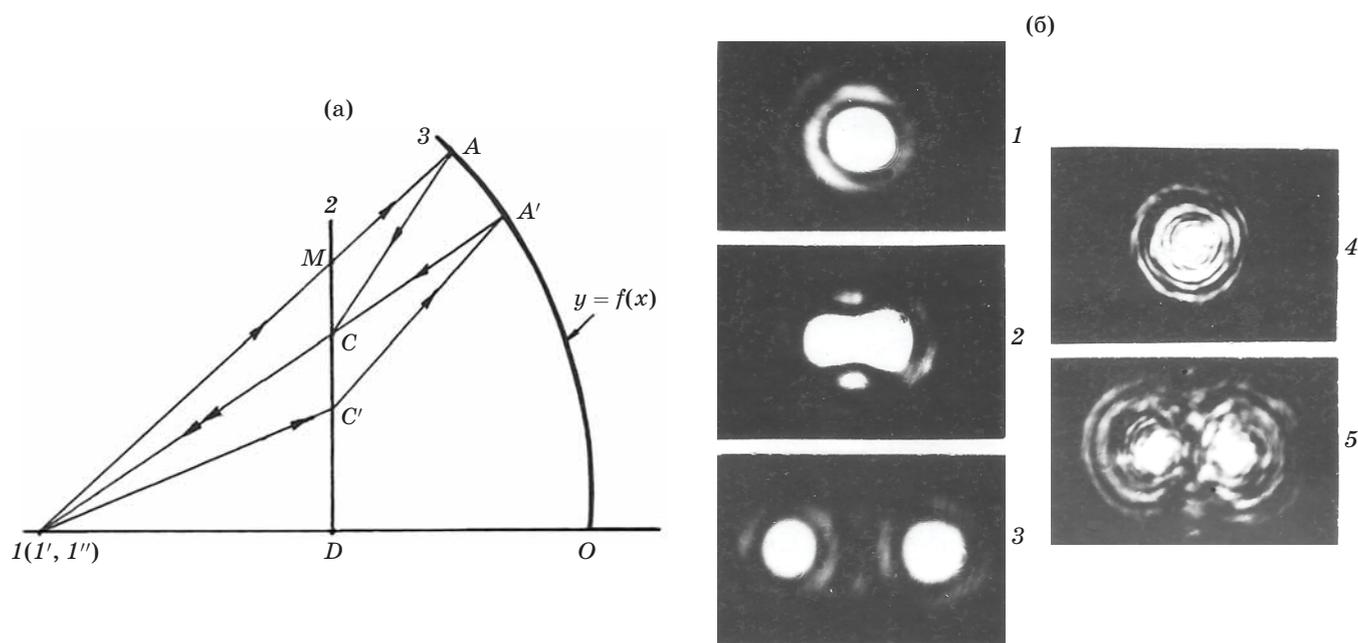


Рис. 4. Принципиальная упрощенная оптическая схема голографического интерферометра радиального сдвига на основе осевого СГОЭ (а) и фотоснимки кружков наименьшего рассеяния двух типов контролируемой поверхности (б). На схеме 1 — монохроматический точечный источник, 1' и 1'' — два его квазиавтоколлимационных изображения, одно из которых формируется 0-ым и 1-ым, а второе — 1-ым и 0-ым порядками дифракции, т.е. в прямом (1') и обратном (1'') ходе лучей, 2 — СГОЭ, 3 — контролируемая оптическая поверхность. Кружки рассеяния (1, 2, 3) — поверхности хорошего качества, а (4, 5) — АП с небольшими зональными дефектами при отсутствии (1, 4) и наличии бокового сдвига точечного источника 1 (2, 3, 5)

Fig. 4. (a) Principal simplified optical scheme of a holographic radial shear interferometer based on axial synthesized hologram optical element and (b) photographs of circles of least scattering for two types of controlled surface. Designations on the scheme: (1) monochromatic point source, (1') and (1'') are two of its quasi-autocollimation images, one of which is formed by the zero and 1st, and the second by the 1st and zero orders of diffraction, that is, in the (1') forward and (1'') reverse paths of rays, (2) synthesized hologram optical element, (3) controlled optical surface. (1, 2, 3) Scattering circles are presented for the case of a surface of good quality, and (4, 5) for an aspherical surface with small zonal defects in (1, 4) the absence and (2, 3, 5) the presence of a lateral shift of point source 1

женных волн — прямой и обратной. Здесь представлены изображения кружков наименьшего рассеяния для поверхности хорошего оптического качества и для АП с заметными зональными дефектами. При отсутствии бокового сдвига точечного источника распределение интенсивности в них имеет осевую симметрию (1, 4). Небольшой боковой сдвиг точечного источника нарушает ее (2), а при достаточно большом сдвиге (3, 5) наблюдается четко выраженное «раздвоение» кружков наименьшего рассеяния. Известно, что в традиционной интерферометрии радиального сдвига асферические ВФ порождают сложную интерференционную картину [40, 41]. Принципиальное отличие предложенного голографического

интерферометра радиального сдвига [38, 39] состоит в том, что в нем интерференционная картина не зависит от асферичности контролируемой поверхности и всегда имеет простейший вид системы прямолинейных полос, искажаемых лишь ее дефектами [5]. При этом значение радиального сдвига определяется отрезком CC' (рис. 4а), соответствующим кольцевой зоне AA' контролируемой поверхности. Выбором положения точечного источника и голограммы относительно вершины контролируемой поверхности можно регулировать значение и характер радиального сдвига ВФ в контрольной схеме.

Важно пояснить, что в голографическом интерферометре, построенном по схеме рис. 4а,

осевая синтезированная голограмма выполняет одновременно три функции: собирающей и рассеивающей длиннофокусных асферических линз-компенсаторов в ± 1 -ых порядках дифракции и тонкой плоскопараллельной пластинки в 0-ом порядке. Исходя из этого, при боковом сдвиге точечного источника следовало бы иметь не «раздвоение», а «утроение» его изображения. Третье изображение точечного источника, порожденное двукратной дифракцией в 0-ом порядке и однократным отражением от контролируемой поверхности, в нашем эксперименте (см. рис. 4б) практически не наблюдается, так как плоскость его кружков наименьшего рассеяния находится на значительном удалении от точечного источника. Он находится вблизи плоскости параксиального изображения точки, формируемого в 0-ом порядке голограммы, контролируемой вогнутой поверхностью.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Полноразмерный прецизионный инструмент

На смену упруго-деформируемому инструменту пришел существенно менее затратный и более производительный жесткий полноразмерный прецизионный инструмент (ППИ) [42]. В отличие от упруго-деформируемого инструмента (см. рис. 1) он представляет собой всего одну деталь с выпуклой или вогнутой рабочей поверхностью заданной формы и может быть изготовлен из стекла, металла или другого подходящего материала. Важнейшим параметром такого инструмента является высокая износоустойчивость, которая достигается путем алмазирования его рабочей поверхности. При использовании алюминиевых сплавов возможно применение глубокого оксидирования, получающийся при этом относительно толстый слой Al_2O_3 (корунд) также обеспечивает высокую износоустойчивость ППИ. Весьма привлекательным здесь представляется также применение интенсивно разрабатываемой в последнее время технологии вакуумного осаждения алмазоподобных покрытий, отличающихся повышенной твердостью [3].

Такие инструменты активно использовались в ГИПО в 1980–1990 гг. при мелкосерийном изготовлении светосильной асферической оптики различного назначения [10, 12].

С помощью такого ППИ в 2012 г. изготовлена предмакетная модель контррефлектора телескопа «Миллиметрон» (проект обсерватории космического базирования в точке Лагранжа L2 [43]) (см. рис. 5) – выпуклый гиперболоид диаметром 200 мм, материал модели — карбид кремния. Деталь изготовлена на станке «Планета 250/100». Ее технологический и аттестационный контроль выполнялся по принципиальной схеме рис. 3е при использовании вспомогательного вогнутого сферического зеркала с радиусом кривизны 830 мм и световым диаметром 840/300 мм.

Образцы должны были иметь предельно возможное облегчение за счет тонкостенной ячеистой структуры. Были рассмотрены различные материалы, применяемые в космическом телескопостроении, в том числе карбид кремния, бериллий, *Zerodur*, ситалл СО-115М. Результаты механического анализа предложенной конструкции модели контррефлектора и технологического образца показали, что она соответствует требованиям по устойчивости к механическим нагрузкам с приемлемым запасом.

Наиболее подходящим материалом для контррефлектора был признан *Zerodur* фирмы SCHOTT. Было проработано изготовление двух образцов модели диаметром 204 мм и одного полноразмерного технологического образца контррефлектора диаметром 562 мм.



Рис. 5. Фотография предмакетной модели контррефлектора телескопа «Миллиметрон» на финишной стадии формообразования АП

Fig. 5. A photograph of a pre-model model of the counter-reflector of the “Millimtron” telescope at the final stage of aspherical surface shaping

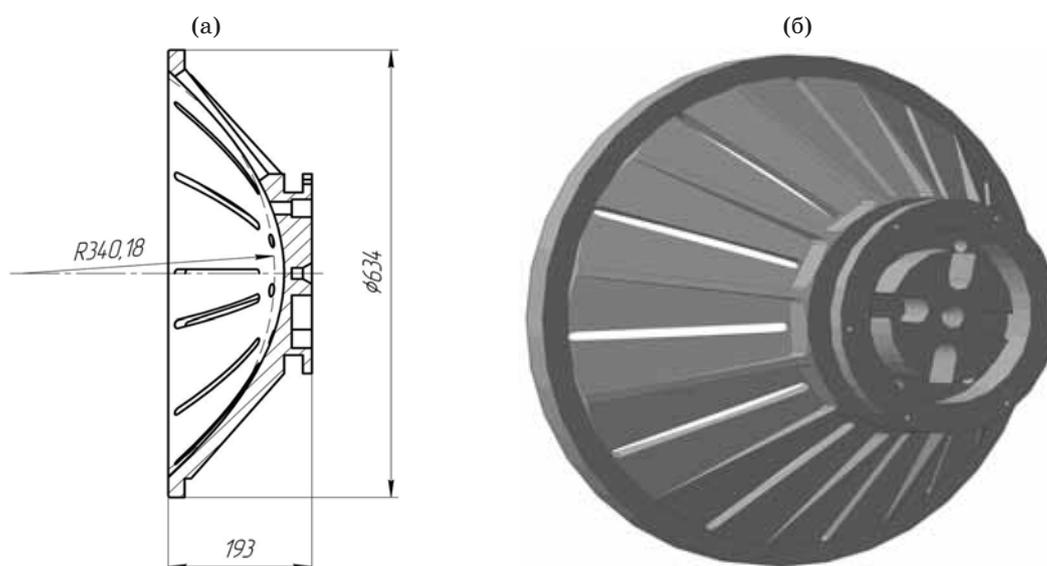


Рис. 6. Полноразмерный жесткий прецизионный инструмент для формообразования выпуклой гиперболической поверхности технологического образца контррефлектора телескопа «Миллиметрон». Меридиональное сечение (а) и внешний вид (б). Радиальные сквозные пазы предназначены для подачи шлифующих и полирующих суспензий и эмульсий

Fig. 6. A full-size rigid precision tool for shaping the convex hyperbolic surface of a technological sample of the counter-reflector of the “Millimetron” telescope. (a) Meridian section and (b) its layout. Radial through grooves are designed for feeding grinding and polishing suspensions and emulsions

Их формообразование предполагалось осуществить на станках типа «Планета» с помощью соответствующих жестких ППИ, для чего была разработана их конструкция. На рис. 6 представлен общий вид одного из них. Одновременно прорабатывались и вопросы технологического и аттестационного контроля зеркала контррефлектора. Была предложена контрольная схема с асферо-голограммным пробным стеклом, пригодная для реализации в термобарокамере [44].

К сожалению, данный проект в дальнейшем был приостановлен.

Метод прецизионного реплицирования

Разрабатываемые в ГИПО методы прецизионного реплицирования АП открывают возможность подготовки производства и организации серийного и массового выпуска АП в кратчайшие сроки и с минимальными затратами [45–47]. Исследования показали, что оптическое качество реплицированных поверхностей (местные и общие погрешности, уровень шероховатости, класс чистоты) при соблюдении технологической дисциплины идентично качеству породившей их мастер-матрицы. При этом не требуются высококвалифицирован-

ный персонал и дорогостоящее оборудование; возможна конвейерная форма производства [45–47]. Данный метод применим практически ко всем оптическим материалам заготовки.

Технология реплицирования АП уже долгое время используется для получения комбинированных оптических элементов — линз и зеркал диаметром от 20 до 700 мм. В ГИПО имеется опыт их успешного изготовления [2, 45].

Метод прецизионного реплицирования был использован для разработки технологии промышленного производства комбинированных оптических элементов — линз для проекционного широкоформатного телеобъектива, оптическая схема которого была рассчитана А.Ф. Ширанковым (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

По этой технологии также был изготовлен однокомпонентный коллиматорный объектив со световым диаметром 20 мм и относительным отверстием 1:2 для работы в ближней инфракрасной области спектра в виде двояковыпуклой линзы с двумя идентичными АП, что потребовало изготовления лишь одной мастер-матрицы [45].

Следует особо отметить уникальные «реставрационные» способности репликационной

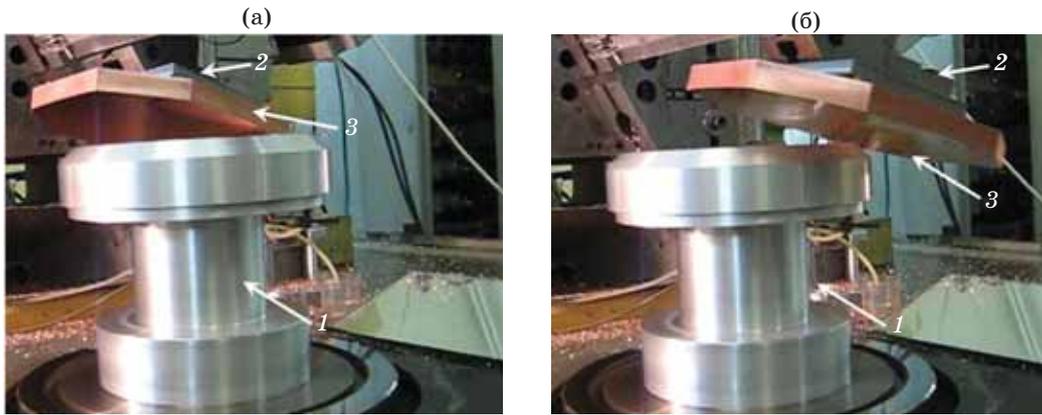


Рис. 7. «Построчное» формобразование АП методом лезвийного алмазного инструмента на станке алмазного микроточения типа МК-6502. 1 — держатель алмазного резца, смонтированный на шпинделе станка, 2 — фрагмент приставки, 3 — медная заготовка. Показаны два состояния приставки в крайнем левом (а) и крайнем правом (б) положениях заготовки

Fig. 7. “Line-by-line” shaping of the aspherical surface using a diamond blade tool on a diamond microturning machine of type МК-6502. (1) Diamond cutter holder mounted on the machine spindle, (2) fragment of the attachment, (3) copper perform workpiece. Two states of the attachment are shown in the (a) extreme left and (б) extreme right positions of the workpiece

технологии при серийном производстве оптики — возможности восстановления оптических деталей из брака по форме рабочей поверхности, классу чистоты и параметрам шероховатости. Эти способности были нами специально исследованы и экспериментально подтверждены [48].

Важнейшим этапом подготовки производства для серийного реплицирования АП являются изготовление и аттестация эталонных мастер-матриц. Особенно важным он становится для внеосевой асферики. Одним из возможных путей их получения можно рассматривать метод микроточения с использованием лезвийного алмазного инструмента [49]. Его оригинальная разновидность — метод «построчного» формобразования АП, рассмотрена ниже. Представляется весьма реалистичным и экономически целесообразным использовать эту технологию и для изготовления элементов (сегментов или панелей) крупноформатных составных зеркал ЕЛТ⁴-телескопов [43, 50, 51]. В этом случае для каждого «яруса» составного главного зеркала с идентичными элементами должна быть изготовлена и аттестована эталонная пара мастер-матриц (выпуклая + вогнутая). И это, возможно, самый надежный способ успешного изготовления составных зеркал любых ЕЛТ-телескопов [50].

⁴ Extremely large telescope.

«Построчное» формобразование асферических поверхностей

Методика «построчного» формобразования АП с использованием лезвийного алмазного инструмента была разработана и впервые реализована в 2011–2012 гг. в рамках изготовления комплекта внеосевых светосильных параболических и длиннофокусных тороидальных зеркал с высокой лучевой стойкостью (не менее 10 кВт/см²) из бескислородной меди с золотым покрытием размером 160×230×20 мм для первого отечественного лазера на свободных электронах. На базе серийного отечественного станка алмазного микроточения типа МК-6502 было создано уникальное устройство, обеспечившее реализацию идеи «построчного» формобразования вогнутой АП, и разработаны оригинальная приставка к этому станку и управляющее программное обеспечение (рис. 7).

Алмазный резец, жестко закрепленный на шпинделе станка и имеющий балансировку радиальных биений, вращается с постоянной угловой скоростью, а заготовка изготавливаемой АП, установленная в специальной оправе, дискретно перемещается на ширину «строки» (в нашем случае 1–100 мкм) в меридиональном сечении изготавливаемой АП в соответствии с уравнением ее профиля. Одновременно она совершает периодическое возвратно-поступа-

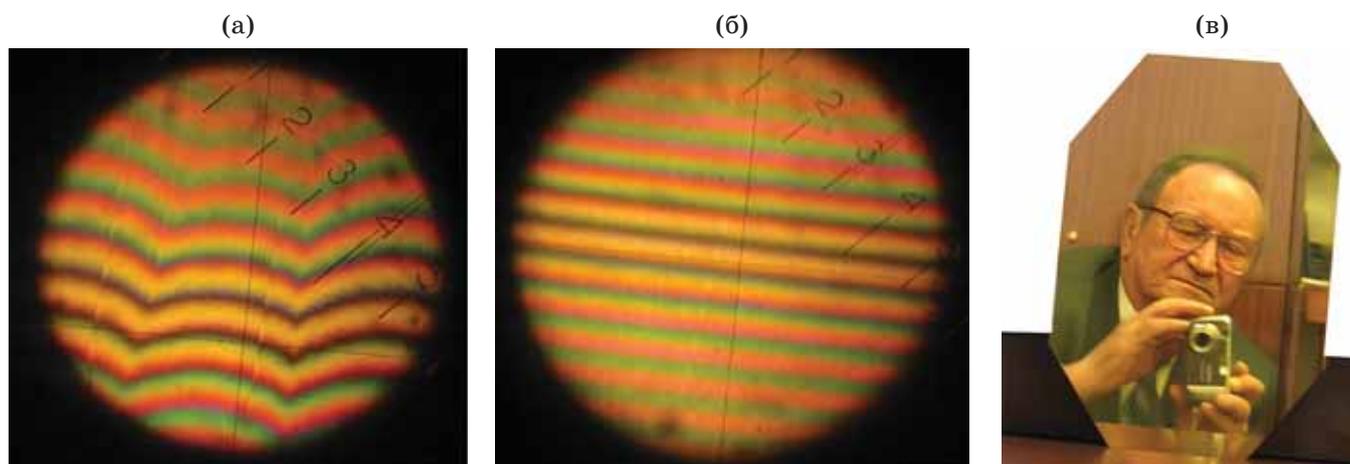


Рис. 8. Интерферограммы фрагмента внеосевого тороидального зеркала, полученные в микроинтерферометре Линника в результате лезвийного алмазного микроточения (а) и после его финишной доводки свободным абразивом на станке типа «Тороид» (б). Фотография этого зеркала с изображенным на нем автором статьи (в)
Fig. 8. Interferograms of a fragment of an off-axis toroidal mirror obtained in a Linnik microinterferometer as a result of (a) blade diamond microturning and (б) after its finishing with a free abrasive on a “Toroid” type machine. (в) A photograph of this mirror with the author of the article depicted on it

тельное движение по дуге окружности в плоскости, перпендикулярной меридиональному сечению. При этом оптическая ось АП перемещается в пространстве в меридиональной плоскости, оставаясь строго параллельной самой себе. В нашем случае время одного полного цикла формообразования АП не превышало нескольких часов. Финишная доработка изготовленных таким методом медных АП осуществлялась «вслепую» кратковременным (до нескольких десятков секунд) притиром свободным абразивом с помощью смоляного инструмента с малой амплитудой на станке типа «Тороид». На рис. 8 приведены интерферограммы фрагментов рабочей поверхности внеосевого длиннофокусного (около 20 м) тороидального зеркала, полученные в микроинтерферометре Линника до (а) и после (б) финишной доводки, а также для иллюстрации общего вида этого зеркала приведена его фотография с портретом автора статьи (в).

Следует отметить значительное формальное родство рассматриваемой технологии «построчного» формообразования АП с процессом изготовления нарезных дифракционных решеток-эшелеттов на делительных машинах роуландовского типа [52]. В обоих случаях используется специальный лезвийный алмазный инструмент, а сам процесс отличается большой длительностью (непрерывно, до не-

скольких суток). Поэтому такое формообразование АП потребует высокой стабильности температуры и виброзащиты.

В рассмотренном способе «построчного» формообразования оптических поверхностей весьма интересной и привлекательной представляется реализация режимов «квазипластического» резания [49, 53]. При этом появляется возможность обработки хрупких оптических материалов, в частности кварцевых стекол, без образования трещиноватого подповерхностного слоя [3].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ АФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ В ГИПО

За более чем полувековой период был выполнен комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, разработан ряд нормативных материалов и организовано устойчивое мелкосерийное производство асферических оптических элементов в ГИПО и на ряде предприятий отрасли [2, 10–12, 42, 54].

И в том числе:

- Изготовлено свыше 15000 шт. асферических линз и зеркал — преимущественно для собственного опытного и мелкосерийного производства оптико-электронных систем различного назначения.

- Изготавливалась уникальная светосильная асферика для нескольких спутников серии «Космос», орбитальной станции «Салют-4», автоматических станций «Марс-1» и «Марс-2», спускаемых аппаратов межпланетных станций «Вега-1», «Вега-2», «Венера-Галлея».

- Разработана, изготовлена, аттестована предмакетная модель из карбида кремния контррефлектора телескопа «Миллиметрон».

Следует кратко упомянуть еще о двух оригинальных направлениях исследований, выполненных в ГИПО в это время,

- Исследована возможность использования нерассеянной составляющей лазерного излучения для интерферометрического контроля шлифованных оптических поверхностей в отраженном и проходящем свете [55–59]. Это открыло возможность применения лазерно-голографических методов контроля на начальных стадиях формообразования АП.

- Предложена и исследована интерферометрия выпуклых АП на основе использования СГОЭ-компенсатора и обращения ВФ [60, 61].

ИННОВАЦИОННЫЕ СХЕМЫ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Схемы с квазиавтоколлимационным ходом лучей и обращением волнового фронта, осуществляемым отражательным оптическим компенсатором

В нашей недавно опубликованной работе [37] дано подробное описание двух вариантов схем контроля крупноформатных вогнутых АП с зафокальным и предфокальным расположением отражательного оптического компенсатора, который может быть выполнен либо в виде СГОЭ на подложке с плоской, сферической или конической рабочей поверхностью, либо в виде выпуклой зеркальной АП. Отличительной особенностью этих схем является то, что обращение ВФ здесь осуществляется оптическим компенсатором, а не контролируемой поверхностью, как это имеет место в традиционных автоколлимационных схемах [4–6].

На рис. 9 приведена полная принципиальная оптическая схема лазерно-голографического

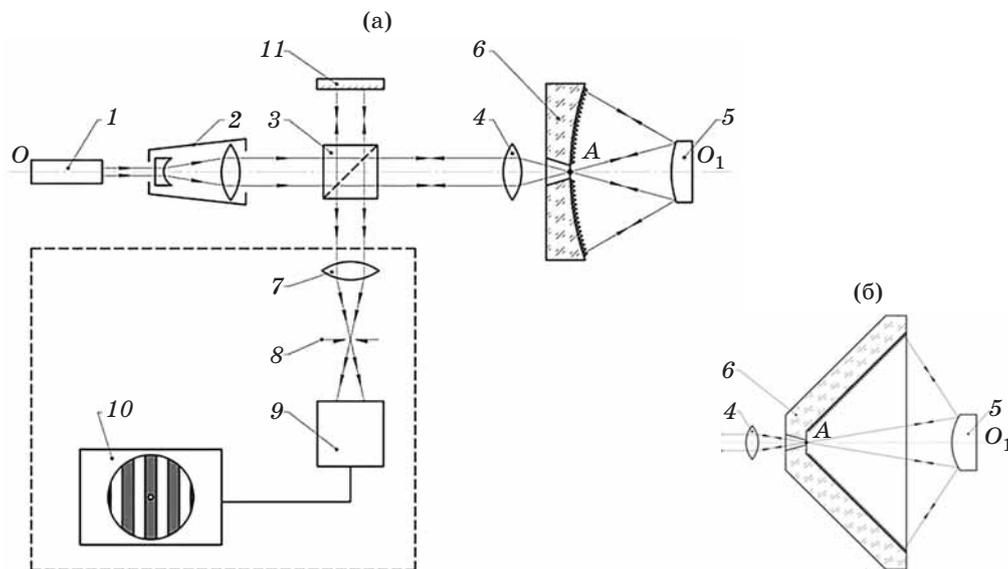


Рис. 9. Схемы голографического устройства для контроля формы АП со сферическим СГОЭ (а) и конического СГОЭ (б). OO_1 — оптическая ось, A — точечный источник и его изображение, 1 — лазерный излучатель, 2 — расширитель, 3 — светоделитель, 4 — формирующий объектив, 5 — контролируемая деталь с выпуклой АП, 6 — отражательный голограммный компенсатор, 7 — проекционный объектив, 8 — диафрагма, 9 — видеокамера, 10 — персональный компьютер со специальным программным обеспечением, 11 — зеркало

Fig. 9. Schematics of holographic device for monitoring the shape of an aspherical surface with (a) a spherical synthesized hologram optical element and (б) a conical synthesized hologram optical element. OO_1 is optical axis, A is point source and its image, (1) laser emitter, (2) expander, (3) beam splitter, (4) forming lens, (5) controlled part with a convex aspherical surface, (6) reflective hologram compensator, (7) projection lens, (8) aperture, (9) video camera, (10) personal computer with special software, (11) mirror

ческого контроля формы светосильных выпуклых АП с двумя вариантами исполнения отражательного компенсатора (позиция б на рис. 9а и 9б) с квазиавтоколлимационным ходом лучей. Видно, что в обоих случаях СГОЭ-компенсатор не участвует в формировании сопряженного изображения рабочей поверхности контролируемой детали и поэтому не вносит искажений в результаты контроля. В данном случае изображение АП строится только формирующим и проекционным объективами в видеокамере. При этом дополнительно достигается удвоение чувствительности контроля, поскольку свет от монохроматического точечного источника А дважды отражается от выпуклой поверхности контролируемой детали. Очевидно, эти схемы удобны при малых и средних размерах контролируемой асферики.

При этом использование конической формы рабочей поверхности СГОЭ-компенсатора (рис. 9б) способствует существенному уменьшению его максимальной пространственной частоты [62, 63].

Схемы контроля крупнобаритных вогнутых асферических поверхностей на основе использования каскада соосных отражательных компенсаторов

Световой диаметр одиночного отражательного компенсатора и его пространственная частота напрямую зависят от размеров контролируемой АП и при контроле крупнобаритных зеркал синтез однокомпонентного компенсатора становится невозможным из-за слишком больших его размеров. Так, например, при реализации лазерно-голографических контрольных схем для главного зеркала телескопа «Миллиметрон», как показывает расчет, потребовался бы компенсатор диаметром около 8 м [37].

Первоначально нами было предложено техническое решение — своеобразная «разбивка» светового диаметра АП на зоны контроля, каждой из которых соответствует отдельный голограммный компенсатор. Эти СГОЭ-компенсаторы расположены вдоль оптической оси АП на разных расстояниях от ее вершины и функционируют независимо: каждый со своим точечным источником, неравноплечим автоколлимационным интерферометром типа Тваймана–Грина и системой

регистрации, что снимает принципиальные ограничения на световой диаметр и крутизну контролируемой АП. Так, для контроля главного составного зеркала телескопа «Миллиметрон» оказалось достаточно четырех отдельных голограммных компенсаторов диаметром не более 300 мм, синтезированных для относительно узких зон зеркала в местах стыковки ярусов [64]. Ограничением данного метода является невозможность контроля всей АП целиком.

От этого ограничения свободен вариант своеобразного «составного» трехмерного оптического компенсатора в виде последовательности нескольких компенсаторов, преимущественно в виде осевых СГОЭ, который был назван каскадом соосных отражательных оптических компенсаторов, работающих в квазиавтоколлимационном режиме и осуществляющих обращение ВФ [37, 63]. Каждый отдельный компенсатор (звено каскада) может быть выполнен на плоской, сферической или конической поверхности, располагается на оптической оси в заданном положении и используется для контроля одной определенной зоны АП. Но в отличие от метода, изложенного в работе [64], здесь при контроле используется только один интерферометр с единственным монохроматическим источником излучения и общим блоком регистрации, что значительно упрощает процесс контроля и позволяет одновременно тестировать всю АП.

Представляет интерес еще один вариант классической неавтоколлимационной схемы («из точки в другую точку») — своеобразный синтез двух описанных выше методов, где общими являются точечный источник света и блок регистрации. Единообразно функционирует только одно звено, поскольку последующие по ходу лучей звенья экранируют ход лучей от него и на время измерений данной зоны контролируемого зеркала должны отсутствовать! В этом варианте контрольной схемы обращение ВФ не используется. Ее целесообразно применять на начальных этапах сборки и юстировки крупноформатных АП, когда имеют место значительные отступления элементов составных зеркал от расчетных положений [37]. При этом можно использовать и метод оконтуривания, упрощающий интерферометрическую оценку и измерение больших деформаций формы контролируемой АП [65].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный материал отображает основные вехи на пройденном в ГИПО пути поиска кардинального решения триединой проблемы производительного и прецизионного формообразования элементов асферической оптики, лазерно-голографического контроля их оптического качества и метрологического обеспечения этих технологических операций и разрабатываемых контрольно-измерительных средств. При этом очевидно, в данном рассмотрении вопросы технологии формообразования асферики играют первостепенную роль.

Приведены результаты некоторого опыта практической реализации предложенных технических решений. Значительное внимание уделено лазерно-голографическим методам контроля процессов сборки и юстировки содержащих асферику центрированных оптических систем, в том числе крупноформатных составных зеркал оптических телескопов. Эта своего рода летопись более чем полувековой работы, выполненной в ГИПО коллективом трех поколений высококлассных специалистов.

Автор благодарит всех участников данной работы и в том числе

Аверьянова С.И., Аверьянову Г.И., Агачева А.Р., Акашкина А.С., Афанасьеву В.Л., Ахметова М.М., Бажанова Ю.В., Балоева В.А., Балясникова Н.М., Баранова В.А., Белозерова А.Ф., Белокопытова А.А., Белякова Ю.М., Берденникова А.В., Бердинского А.А., Буйнова Г.Н., Булатова И.М., Бывальцева А.И.,

Быковского С.А., Былинкина А.Ф., Вендеревскую И.Г., Гайнутдинова И.С., Гайнутдинова Л.Р., Гайнутдинова Н.И., Гербранта В.В., Гибушина И.Ф., Городецкого А.А., Горшкова В.А., Григорьева В.О., Гришкевича А.А., Грушина В.В., Дедюхина Е.Ф., Дучицкого А.С., Жолудева А.А., Захарова А.Л., Знаменского М.Ю., Иванова В.П., Казанкову В.В., Камардина Ю.Б., Карлина О.Г., Козлова С.Д., Контиевского Ю.П., Краснова А.В., Краснова В.С., Кукса В.Г., Курта В.И., Ларионова Н.П., Лахтионова В.И., Лесникову А.Г., Липовецкого Л.Е., Лисову Е.Г., Лошманову М.И., Лукашевича Я.К., Лукину Т.А., Маврина С.В., Макарова А.С., Мельникова А.Н., Миронову Т.А., Мирумьянца С.О., Мирханова Н.Г., Могилюка И.А., Муслимова Э.Р., Мустафина К.С., Мустафину Л.Т., Нагибину С.К., Назмеева М.М., Насырова А.Р., Насырова З.А., Насырову О.В., Нигметзянова М.И., Новоселова В.А., Нюшкина А.А., Павлычеву Н.К., Палладий Т.В., Петрова Г.Н., Петрановского Н.А., Понкратова Б.Т., Пугачеву Л.В., Рафикова Р.А., Садрутдинова А.И., Садыкову А.И., Семенова Ю.Е., Сибгатову Т.Ф., Скочилова А.Ф., Стрельникова Ю.П., Сюткина В.А., Таишева Р.Х., Топоркову И.А., Ураинского В.М., Ураскина А.М., Феохтистову Е.А., Федорову Л.В., Хабирова А.Х., Хайруллина К.Г., Хафизова Н.Р., Хузина Ф.Г., Хорошкова К.П., Хуснутдинова А.Г., Циглера Ю.Н., Чередилина В.А., Чугунова Ю.П., Щеглова Ю.Д., Шигапову Н.М., Штыркова Е.И., Якимова Н.В., Якимычева А.Ю.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем, 2-е изд. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
Slyusarev G.G. Optical systems design methods, 2nd ed. [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1969. 672 p.
2. Карлин О.Г., Кукс В.Г., Липовецкий Л.Е. и др. Изготовление и контроль асферической оптики. М.: ЦНИИ информации, 1980. 272 с.
Karlin O.G., Kuks V.G., Lipovetsky L.Y., et al. Manufacture and testing of aspherical optical elements [in Russian]. Moscow: Central Research Institute of Information Press., 1980. 272 p.
3. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика / под ред. Окатова М.А. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
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.
4. Оптический производственный контроль / под ред. Малакары Д. / пер. с англ. Мазуровой Е.В. и др. под ред. Соснова А.Н. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
Optical shop testing / Ed. by Malakara D. N.Y., Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1978. 862 p.
5. Лукин А.В. Исследование свойств голограмм как оптических элементов и возможностей их применения для контроля качества поверхностей сложной формы // Диссерт. канд. техн. наук. Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1975. 180 с.
Lukin A.V. Research on the properties of holograms as optical elements and on the possibilities of their application for quality control of complex shape surfaces [in Russian] // PhD (Engineering) Thesis. Leningrad: Vavilov State Optical Institute, 1975. 180 p.
6. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: «Машиностроение», 1976. 262 с.

- Puryaev D.T. Optical aspherical surfaces control methods [in Russian]. Moscow: "Mashinostroenie" Publ., 1976. 262 p.
7. МаксUTOв Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. М.: Наука, 1984. С. 16–18.
Maksutov D.D. Manufacture and research of astronomical optics [in Russian]. Moscow: "Nauka" Publ., 1984. P. 16–18.
 8. Бронштейн Ю.Л. Крупногабаритные зеркальные системы (контроль геометрии, юстировка). М.: ДПК Пресс, 2015. 600 с.
Bronstein Y.L. Large-size mirror systems (geometry control, alignment) [in Russian]. Moscow: DPK Press, 2015. 600 p.
 9. Белозеров А.Ф., Ларионов Н.П., Лукин А.В. и др. Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения // Фотоника. 2014. Ч. 1: № 4(46). С. 12–32 / Ч. 2: № 5(47). С. 30–41.
Belozеров A.F., Larionov N.P., Lukin A.V., et al. On-axis computer-generated hologram optical elements: History of development and use [in Russian] // Photonics. 2014. Part 1: № 4(46). P. 12–32 / Part 2: № 5(47). P. 30–41.
 10. Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики». Науч.-техн. сб. / под ред. Мирумянца С.О. Казань: изд. Дом Печати, 1997. 348 с.
Scientific and Production Association "State Institute of Applied Optics". Collected scientific articles [in Russian] / Ed. Mirumyants S.O. Kazan: "Dom Pechati" Press., 1997. 348 p.
 11. ОСТ 3–4730–80 – ОСТ 3–4732–80. Сборник отраслевых стандартов. Детали оптические с асферическими поверхностями. Метод контроля с использованием синтезированных голограмм.
OST (Industry Standard) 3–4730–80 – OST 3–4732–80. Collection of industry standards. Optical parts with aspherical surfaces. A testing method involving computer-generated holograms [in Russian].
 12. Карлин О.Г., Кукс В.Г. Получение оптических деталей с асферическими поверхностями посредством упругого инструмента // ОМП. 1966. № 12. С. 57–61.
Karlin O.G., Kuks V.G. Obtaining optical parts with aspherical surfaces by means of an elastic tool [in Russian] // Soviet Journal of Optical Technology. 1966. № 12. P. 57–61.
 13. Хуанг Т. Цифровая голография // в кн. Применение голографии / под ред. Гудмана Дж. М.: Мир, 1973. С. 65–78.
Huang T.S. Digital holography // Proc. IEEE. 1971. V. 59. Iss. 9. P. 1335–1346.
 14. Lohmann A.W., Paris D.P. Binary Fraunhofer holograms generated by computer // Appl. Opt. 1967. V. 6. P. 1739–1748.
 15. Wyant J.C., Bennett V.P. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts // Appl. Opt. 1972. V. 11. № 12. P. 2833–2839.
 16. Lee W., Sampled H. Fourier-transform hologram generated by computer // Appl. Opt. 1970. V. 9. № 3. P. 639–643.
 17. MacGowern A.J., Wyant J.C. Computer-generated holograms for testing optical elements // Appl. Opt. 1971. V. 10. P. 619–624.
 18. Буйнов Г.Н., Лукин А.В., Мустафин К.С. и др. Голографический способ контроля оптических поверхностей // Авт. свид. № 277269 от 19.03.69 г. Бюлл. изобр. № 24. 1970.
Buynov G.N., Lukin A.V., Mustafin K.S., et al. Holographic control method of optical surfaces [in Russian] // Certificate of Authorship № 277269. Dated 19.03.1969. Bulletin of Inventions № 24. 1970.
 19. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. Искусственная голограмма оптической поверхности // Авт. свид. № 371857 от 05.11.1970 г. Бюлл. изобр. № 7. 1978.
Larionov N.P., Lukin A.V., Mustafin K.S. Artificial hologram of the optical surface [in Russian] // Certificate of Authorship № 371857. Dated 05.11.1970. Bulletin of Inventions № 7. 1978.
 20. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 80–87.
Lukin A.V. Holographic optical elements // J. Opt. Technol. 2007. V. 74. P. 65–70. <https://doi.org/10.1364/JOT.74.000065>
 21. Лукин А.В. Волновой фронт: некоторые вопросы его восстановления и формообразования в голографии и дифракционной оптике // Фотоника. 2019. Т. 13. № 5. С. 463–467. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.462.467>
Lukin A.V. Wavefront: Some issues of its restoration and shaping in holography and diffraction optics // Photonics Russia. 2019. V. 13. № 5. P. 463–467. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.462.467>
 22. Борн М., Вольф Э. Основы оптики, 2-е изд. / пер. с англ. Бреуса С.Н., Головашкина А.И., Шубина А.А. под ред. Мотулевич Г.П. М.: Наука, 1973. 720 с.
Born M., Wolf E. Principles of optics. London, N.Y., Paris: Pergamon Press Publ., 1970. 808 p.
 23. Лукин А.В. Комплекс прецизионных методов и устройств контроля оптических элементов и многокомпонентных центрированных систем на основе осевых синтезированных голограмм // Диссерт. доктора техн. наук. Казань, 2002. 264 с.
Lukin A.V. A set of precision methods and devices for control of optical elements and multicomponent centered systems based on on-axis computer-generated holograms [in Russian] // Dr. Sci. (Engineering) Thesis. Kazan, 2002. 264 p.
 24. Корольков В.П., Коронкевич В.П., Полящук А.Г. и др. Киноформы: технология, новые компоненты и оптические системы. // Автотометрия. 1989. Ч. I: № 3. С. 91–98 / Ч. II: № 4. С. 49–66.
Korolkov V.P., Koronkevich V.P., Poleshchuk A.G., et al. Kinoforms: Technology, new components and optical systems [in Russian] // Avtometriya. 1989. Part I: № 3. P. 91–98 / Part II: № 4. P. 49–66.
 25. Pruss C., Reichelt S., Tiziani H.J., et al. Computer-generated holograms in interferometric testing // Opt. Eng. 2004. V. 43. P. 2534–2540. <https://doi.org/10.1117/1.1804544>
 26. Pruss C., Garbusi E., Osten W. Testing aspheres // Optics and Photonics News. 2008. V. 19. Iss. 4. P. 24–29. <https://doi.org/10.1364/OPN.19.4.000024>
 27. Poleshchuk A.G. Computer generated holograms for aspheric optics testing // Proc. SPIE. 7133, Fifth Internat. Symp. Instrumentation Sci. and Technol. January 12, 2009. <https://doi.org/10.1117/12.821243>
 28. Wyant J.C. Computerized interferometric surface measurements // Appl. Opt. 2013. V. 52. № 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1364/AO.52.000001>
 29. Ichioka Y., Lohmann A.W. Interferometric testing of large optical components with circular computer holograms // Appl. Opt. 1972. V. 11. № 11. P. 2597–2602.

30. Вуд Р.В. Физическая оптика / Пер. с англ. проф. Афанасьева А.П., проф. Баумгарта К.К., акад. Вавилова С.И. и др. под ред. акад. Рождественского Д.С. М.-Л.: ОНТИ, 1936. 880 с.
Wood R.W. Physical optics. N.Y.: The Macmillan Co. Publ., 1934. 907 p.
31. Буйнов Г.Н., Лукин А.В., Мустафин К.С. Простой метод измерения функции рассеяния оптической системы // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. 1971. Т. 16. Вып. 1. С. 46–48.
Vuyunov G.N., Lukin A.V., Mustafin K.S. A simple way of measuring the scattering function of an optical system [in Russian] // Journal of Scientific and Applied Photography and Cinematography. 1971. V. 16. Iss. 1. P. 46–48.
32. Лукин А.В., Курт В.И., Мельников А.Н. и др. Голографическая поверочная установка на основе комплекта эталонных наборов в составе осевых синтезированных голограмм и основных пробных стекол // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 7. С. 23–27. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-07-23-27>
Lukin A.V., Kurt V.I., Melnikov A.N., et al. Holographic calibration setup based on a set of reference kits comprising axial computer-generated holograms and base test plates // J. Opt. Technol. 2021. V. 88. № 7. P. 368–371. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000368>
33. ГОСТ Р 8.744–2011/ISO/TR 14999–3:2005. Государственная система обеспечения единства измерений. Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Ч. 3. Калибровка и аттестация интерферометров, методика измерений оптических волновых фронтов.
GOST R (Russian National Standard) 8.744–2011/ISO/TR 14999–3:2005. State system for ensuring uniformity of measurements. Optics and photonics. Interference changes of optical elements and systems. Part 3. Calibration and certification of interferometers, methods of measurement optical wave fronts [in Russian].
34. ГОСТ 2782–82. Стекла пробные для проверки радиусов и формы сферических оптических поверхностей. Технические условия.
GOST (Russian National Standard) 2782–82. Test glasses for checking the radius and shape of spherical optical surfaces. Specifications [in Russian].
35. ГОСТ 1807–75. Радиусы сферических поверхностей оптических деталей. Ряды числовых значений.
GOST (Russian National Standard) 1807–75. Radii of spherical surfaces of optical parts. Rows of numeric values [in Russian].
36. Аверьянова Г.И., Ларионов Н.П., Лукин А.В. и др. Контроль больших асферических поверхностей с помощью круговых искусственных голограмм // ОМП. 1975. № 6. С. 61–63.
Averyanova G.I., Larionov N.P., Lukin A.V., et al. Controlling large aspherical surfaces by using ring holograms // Soviet Journal of Optical Technology. 1975. № 6. P. 61–63.
37. Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. Новые уникальные возможности лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки крупноформатных составных зеркал телескопов // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 10. С. 80–94. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-10-80-94>
Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F. New capabilities for laser holographic testing during assembly and collimation of large segmented telescope mirrors // J. Opt. Technol. 2022. V. 89. № 10. P. 615–625. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000615>
38. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. и др. Интерферометр радиального сдвига // Авт. свид. № 534644 от 10.08.1973. Бюлл. изобр. 1976. № 41.
Larionov N.P., Lukin A.V., Mustafin K.S., et al. Radial shear interferometer [in Russian] // Certificate of Authorship № 534644. Dated 10.08.1973. Bulletin of Inventions 1976. № 41.
39. Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Получение интерферограмм радиального сдвига // Опт. и спектр. 1975. Т. 38. Вып. 2. С. 350–355.
Lukin A.V., Mustafin K.S., Rafikov R.A. Obtaining radial shear interferograms [in Russian] // Opt. and Spectrosc. 1975. V. 38. № 2. P. 31–35.
40. Комиссарук В.А. Об интерферограмме сдвига в случае волнового фронта, обладающего симметрией вращения // ОМП. 1969. № 7. С. 8–10.
Komissaruk V.A. On shear interferograms under a wavefront possessing rotation symmetry // Soviet Journal of Optical Technology. 1969. № 7. P. 8–10.
41. Hariharan P., Sen D. Interferometric measurements of the aberrations of microscope objectives // Optica Acta. 1962. V. 9. P. 159–166.
42. Кукс В.Г. Шлифование асферических поверхностей оптических деталей полноразмерным инструментом // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 3. С. 43–46.
Kuks V.G. Grinding aspherical surfaces of optical parts using a full-sized tool // J. Opt. Technol. 2012. V. 79. № 3. P. 157–159. <https://doi.org/10.1364/JOT.79.000157>
43. Электронный ресурс URL: <http://millimetron.ru> (Астрокосмический центр ФИАН. Космическая обсерватория «Миллиметрон»)
Electronic source URL: <http://millimetron.ru> (Astronomy Center of the Physical Institute of the Academy of Sciences. “Millimetron” Space Observatory).
44. Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. Лазерный интерферометр с асферо-голограммным пробным стеклом для термобарокамеры // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 65–66.
Lukin A. V., Melnikov A. N., Skochilov A. F. Laser interferometer with aspherical holographic test glass for thermal vacuum chamber // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. № 3. P. 212–213. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000212>
45. Лукин А.В., Мельников А.Н. Прецизионное репликация всех видов оптических поверхностей — научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 10. С. 42–50. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50>
Lukin A.V., Melnikov A.N. Precision replication of all types of optical surfaces: The scientific and technological basis for radical transformation in modern optical production // J. Opt. Technol. 2022. V. 89. № 10. P. 589–594. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000589>
46. Лукин А.В., Мельников А.Н. Основные пробные стекла: две новые и актуальные возможности их реализации в оптических технологиях // Фотоника. 2020. Т. 14. № 1. С. 68–74. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.1.68.74>
Lukin A.V., Melnikov A.N. Basic test plates: Two new and relevant uses in optical technologies // Photonics Russia. 2020. V. 14. № 1. P. 68–74. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.1.68.74>

47. Лукин А.В., Гурин Н.А., Мельников А.Н. и др. Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 107–115. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115>
Lukin A.V., Gurin N.A., Melnikov A.N., et al. Experimental use of precision replication technology to recover optical parts from rejects in batch production // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. Iss. 7. P. 417–421. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000417>
48. Лукин А.В., Мельников А.Н. Основные пробные стекла как эталонные мастер-матрицы для серийного и массового производства сферических зеркал и линз // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 8. С. 49–51. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-08-49-52>
Lukin A.V., Melnikov A.N. Base test plates as reference master molds for serial and mass production of spherical mirrors and lenses // J. Opt. Technol. 2020. V. 87. № 8. P. 485–486. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000485>
49. Захаревич Е.М., Шавва М.А. Современные направления и тенденции в области обработки оптических материалов // Лазер-Информ. 2021. № 4(691). С. 1–3. Zakharevich Y.M., Shavva M.A. Current trends in optical materials processing [in Russian] // Lazer-Inform. 2021. № 4(691). P. 1–3.
50. Электронный ресурс URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_optical_telescope_primary_mirrors.svg (Сравнение диаметров главных зеркал основных крупноформатных телескопов по состоянию на март 2021 г.).
Electronic source URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_optical_telescope_primary_mirrors.svg (Comparison of the diameters of primary mirrors of notable large-sized telescopes as of March 2021).
51. Golubev E.S., Kotsur E.K., Arkhipov M.Yu., et al. Primary mirror panels of the Millimetron space observatory // Proc. SPIE. 2020. V. 11451. P. 114510K-1–114510K-13. <https://doi.org/10.1117/12.2562838>
52. Герасимов Ф.М. Современные дифракционные решетки // ОМП. 1965. № 10. С. 33–48.
Gerasimov F.M. Modern diffraction gratings [in Russian] // Optical-Mechanical Industry. 1965. № 10. P. 33–48.
53. Теплова Т.В. Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности // Науч. вестн. МГГУ. 2010. № 8. С. 73–88.
Teplova T.V. Quasi-plastic removal of the surface layer of hard brittle materials while obtaining nanometric surface relief [in Russian] // MGGU Scientific Bulletin. 2010. № 8. P. 73–88.
54. Полвека в мире оптики / Под ред. Иванова В.П. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 212 с.
Half a century in the world of optics [in Russian] / Ed. Ivanov V.P. Kazan: Center of Innovative Technologies Press., 2007. 212 p.
55. Островский Ю.И. Голография и ее применение. Л.: Наука, 1973. 180 с.
Ostrovsky Yu.I. Holography and its application [in Russian]. Leningrad: "Nauka" Publ., 1973. 180 p.
56. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.
Bobrov S.T., Greysukh G.I., Turkevich Y.G. Optics of diffraction elements and systems [in Russian]. Leningrad: "Mashinostroenie" Publ., 1986. 223 p.
57. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. Голографический контроль формы неполированных поверхностей // ОМП. 1972. № 3. С. 35–38.
Larionov N.P., Lukin A.V., Mustafin K.S. Holographic shape control of unpolished surfaces // Soviet Journal of Optical Technology. 1972. № 3. P. 35–38.
58. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. Голографический контроль шлифованных поверхностей в отраженном свете // ОМП. 1973. № 1. С. 66–71.
Larionov N.P., Lukin A.V., Mustafin K.S. Holographic shape control of unpolished surfaces in reflected light // Soviet Journal of Optical Technology. 1973. № 1. P. 66–71.
59. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. О нерасеянной составляющей лазерного излучения, прошедшего через шероховатую поверхность // Опт. и спектр. 1973. № 35. С. 907–910.
Larionov N.P., Lukin A.V., Mustafin K.S. On the non-dispersed component of laser radiation transmitted through a rough surface [in Russian] // Opt. and Spectrosc. 1973. № 35. P. 907–910.
60. Городецкий А.А., Ларионов Н.П., Лукин А.В. и др. Голографический контроль выпуклых поверхностей на основе обращения волнового фронта // ОМП. 1983. № 12. С. 53–54.
Gorodetsky A.A., Larionov N.P., Lukin A.V., et al. Holographic control of convex surfaces based on wavefront reversal // Soviet Journal of Optical Technology. 1983. № 12. P. 53–54.
61. Ибрагимов Р.А., Городецкий А.А., Ларионов Н.П. и др. Интерферометр для контроля формы оптических поверхностей // Авт. свид. № 996857. Бюлл. изобр. № 6. 1983.
Ibragimov R.A., Gorodetsky A.A., Larionov N.P., et al. Interferometer for controlling the shape of optical surfaces [in Russian] // Certificate of Authorship № 996857. Bulletin of Inventions № 6. 1983.
62. Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. Осевой синтезированный голограммный оптический элемент // Патент РФ № 2766855. 2022.
Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F. Axial synthesized holographic optical element // RF Patent № 2766855. 2022.
63. Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. Голографическое устройство для контроля формы крупногабаритных вогнутых асферических оптических поверхностей // Патент РФ на изобретение № 2766851. 2022.
Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F. Holographic device for controlling the shape of large-size concave aspherical optical surfaces // RF Invention Patent № 2766851. 2022.
64. Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. и др. О возможностях лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки составного главного зеркала телескопа на примере космической обсерватории «Миллиметр» // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 12. С. 45–49.
Lukin A.V., Melnikov A.N., Skochilov A.F., et al. Possibilities of laser-holographic monitoring of assembly

and alignment of a segmented primary telescope mirror using the Millimetron space observatory as an example // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. № 12. P. 828–832. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000828>

65. Лукин А.В. К вопросу о когерентных свойствах лазерных источников в интерферометрии и голо-

графии // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 3. С. 91–96.

Lukin A.V. The coherent properties of laser sources in interferometry and holography // J. Opt. Technol. 2012. V. 79. № 3. P. 194–197. <https://doi.org/10.1364/JOT.79.000194005>.

АВТОР

Анатолий Васильевич Лукин — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, 420075, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>; gipo@telebit.ru

Статья поступила в редакцию 07.02.2023

Одобрена после рецензирования 06.10.2023

Принята к печати 28.01.2024

AUTHOR

Anatoly V. Lukin — Dr. Sci. (Engineering), Full Professor, Chief Researcher, JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, 420075, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-2422-663X>; gipo@telebit.ru

The article was submitted to the editorial office 07.02.2023

Approved after review 06.10.2023

Accepted for publication 28.01.2024