

Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля всех типов оптических асферических поверхностей Вклад ГИПО в развитие направления

А. В. Лукин

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе рассматриваются исторический аспект и тенденции развития технологий формообразования и методов лазерно-голографического контроля всех типов оптических асферических поверхностей в контексте деятельности ГИПО.

Ключевые слова: Асферическая оптика, Технологии формообразования, Методы лазерно-голографического контроля, Комбинированный оптический элемент, Прецизионная репликация, Мастер-матрица, Исторический аспект, Тенденции развития.

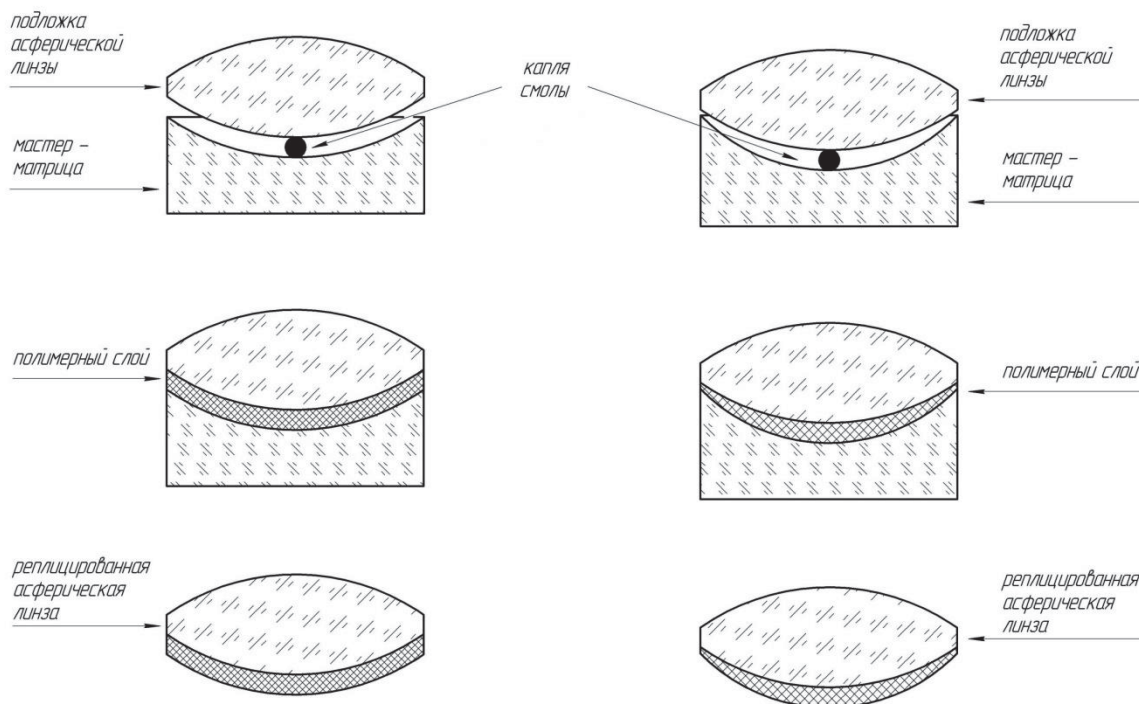
Цитирование: Лукин, А. В. Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля всех типов оптических асферических поверхностей Вклад ГИПО в **развитие направления** / А. В. Лукин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. —Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 24–28.

С начала 1960-х годов, еще будучи в ранге филиала Государственного оптического института им. С.И. Вавилова, Государственный институт прикладной оптики (ГИПО) был определен головным предприятием в отрасли по ряду научных направлений, в том числе по прикладной голографии, теневым и спектральным приборам и по разработке технологий и оборудования для изготовления асферических оптических деталей. Дальнейшее ускоренное развитие этих трех важнейших для отрасли научно-технологических направлений осуществлялось в рамках созданного по инициативе руководства ГИПО, поддержанной Министерством оборонной промышленности, научно-технологического комплекса (НТК) дифракционной, асферической и интегральной оптики, возглавить который было предложено автору. Все подразделения НТК были сосредоточены в отдельном специализированном 4-х этажном здании с общей технологической площадью 7000 м². В относительно короткие сроки были разработаны новые прецизионные технологии формообразования оптических асферических поверхностей (АП) на основе использования ряда автоматизированных шлифовально-полировальных станков нового поколения серии «Планета» и упруго-деформируемого инструмента [1]. Разработка этих станков была выполнена Минским механическим заводом по техническим заданиям и под общим научным руководством специалистов ГИПО. Были разработаны четыре модели станков, обеспечивающие формообразование АП диаметром от 20 до 500 мм. После организации серийного выпуска станков в Минске и Сморгони ими были оснащены оптические производства всех оптико-механических предприятий отрасли [2]. За период с 1971 по 1988 год всего было выпущено их около 100 штук.

В дальнейшем на смену упруго-деформируемому инструменту пришел менее затратный и более производительный полноразмерный жесткий прецизионный инструмент [2, 3].

За период с 1962 по 1996 год в ГИПО было изготовлено около 15000 штук прецизионных светосильных АП, в том числе уникальные АП для оснащения нескольких искусственных спутников Земли серии «Космос», орбитальной станции «Салют-4», автоматических станций «Марс-1» и «Марс-2», спускаемых аппаратов межпланетных станций «Вега-1», «Вега-2», «Венера-Галлея».

Другим важным этапом развития данного научно-технологического направления явилась разработка производительных технологий формообразования практически всех видов оптических асферических поверхностей путем прецизионной репликации АП с высокоточных мастер-матриц в относительно тонком полимерном слое на стеклянную подложку (см. рис. 1) с последующим интерферометрическим контролем на основе использования осевых синтезированных голограмм в качестве оптических образцов и компенсаторов. Тем самым был открыт путь для кардинального решения одной из самых актуальных проблем современного объективостроения — двуединой проблемы серийного высокоточного формообразования и аттестационного контроля асферической оптики, в том числе инфракрасных (ИК) объективов для тепловизионной аппаратуры [3, 4].



а) форма рабочей поверхности подложки так же асферическая (близкая по форме к рабочей поверхности мастер-матрицы), поэтому полимерный слой во всех зонах имеет приблизительно равную толщину и влиянием его усадок можно пренебречь

б) копирование на ближайшую трехточечную сферу; полимерный слой в различных зонах светового диаметра имеет разную толщину и его усадки вызывают соответствующие аберрации

Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема процесса репликации выпуклой асферической поверхности двояковыпуклой линзы

Применение *иерархической системы мастер-матриц*, предназначенных для серийного и массового производства комбинированных оптических элементов (КОЭ), включающей эталонные, контрольные и рабочие матрицы (по аналогии со сферическими пробными стеклами), позволяет обеспечить высокую стабильность и рентабельность такого производства. Следует отметить, что полномасштабная реализация этой иерархической системы мастер-матриц целесообразна лишь при массовом и периодически повторяющемся производстве КОЭ.

В случае же даже очень крупных, но разовых партий оптимальным представляется изготовление только одной пары эталонных мастер-матриц (выпуклая + вогнутая) и уже непосредственно с одной из них реплицирование необходимого количества *рабочих* мастер-матриц. При этом мастер-матрица противоположного знака будет выполнять важную метрологическую функцию *эталоны*, обеспечивая возможность периодической аттестации основной мастер-матрицы, чтобы вовремя обнаружить недопустимые изменения формы ее рабочей поверхности. Идея введения в практику серийного реплицирования оптических поверхностей *иерархической системы классификации* мастер-матриц была предложена нами ранее [3].

Следует отметить три важнейшие отличительные особенности КОЭ, выявленные нами в ходе исследований:

- по сохраняемости (долговечности) и устойчивости к внешним механическим и климатическим воздействиям они близки соответствующим стеклянным аналогам;
- по себестоимости при серийном и массовом производстве они не уступают чисто полимерным элементам;
- оптическое качество рабочих поверхностей КОЭ (общая N и местные ΔN отклонения, параметр шероховатости, класс чистоты и др.) при соблюдении технологических требований идентично качеству соответствующей мастер-матрицы.

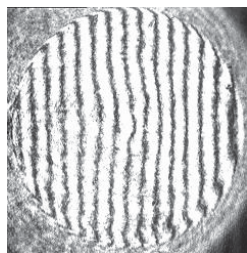
Именно эти особенности КОЭ обеспечивают возможность достижения предельно низкой себестоимости серийного выпуска на их основе объективов различного назначения при высоком оптическом качестве и долговечности. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований КОЭ с двумя идентичными реплицированными АП, выполняющего функцию однокомпонентного коллиматорного объектива.

В настоящее время наибольшую практическую значимость может получить серийное изготовление сферических КОЭ-зеркал и линз в силу наличия у большинства отечественных и зарубежных предприятий с традиционным оптическим производством уже имеющихся эталонных мастер-матриц *высочайшего оптического качества* в виде накопленного за долгие годы их производственной деятельности значительного архива основных (эталонных) пробных стекол, полная номенклатура которых согласно действующим стандартам имеет около трех тысяч дискретных номиналов. Заметим, что на некоторых оптических

производствах до сих пор существуют участки сферических пробных стекол, где функционируют, по возможности, оптики-рабочие самой высокой



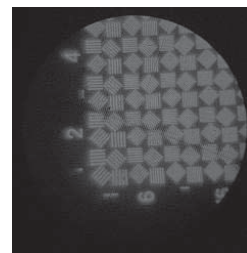
а) интерферограмма вогнутой асферической рабочей поверхности мастер-матрицы (интерферометр типа Тваймана-Грина, $\lambda = 632,8$ нм, среднеквадратичное отклонение волнового фронта от расчетного менее 60 нм)



б) интерферограмма двояковыпуклой линзы (среднеквадратичное отклонение волнового фронта от расчетного значения не более 65 нм)



в) микрофотография кружка рассеяния этой линзы ($\lambda = 632,8$ нм, диаметр кружка рассеяния — 4 мкм, увеличение $\sim 1000\times$)



г) фрагмент изображения стандартной миры (расчетное разрешение в центре поля зрения — 620 мм^{-1} при контрасте 0,1)

Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований однокомпонентного коллиматорного объектива (двояковыпуклая линза с двумя идентичными реплицированными асферическими поверхностями) световым диаметром 20 мм и относительным отверстием 1:2

квалификации, хорошо владеющие искусством ретуши и притира. Важно и то, что до сих пор значительная часть оптических элементов современных объективов различного назначения имеет сферические рабочие поверхности.

В АО «НПО ГИПО» имеется опыт успешного изготовления КОЭ-зеркал диаметром до 700 мм [1].

Открывается перспектива организации автоматизированного конвейерного изготовления линз и зеркал, а также процессов сборки объективов на их основе. При этом специалисты-оптики высокой квалификации здесь не потребуются. Но они будут полностью задействованы на производственных участках изготовления и аттестации эталонных мастер-матриц, а также уникальных «штучных» и мелкосерийных изделий из стекла и других оптических материалов, где должны быть использованы предельные точностные возможности методов формообразования всех видов оптических поверхностей, как традиционных (ретушь, притир, полноразмерный прецизионный инструмент и др.), так и современных (алмазное микроточение, уникальные ультрапрецизионные оптические станки с числовым программным управлением и т.п.) [4].

Таким образом, оптическое производство примет совершенно другой облик. Произойдут поистине кардинальные преобразования: громоздкие и энергоемкие шлифовально-полировальные станки и даже высокопроизводительные оптические станки с числовым

программным управлением будут перемещены на заготовительные участки, обеспечивающие производство подложек для КОЭ заданных типоразмеров в требуемом количестве из стекла и других материалов, а основное серийное производство КОЭ и сборка объективов на их основе станут действительно оптически чистыми, высокоавтоматизированными и «малолюдными», подобно производству изделий современной микроэлектроники [4].

Список источников

- [1] **Карлин, О. Г.** Изготовление и контроль асферической оптики / О. Г. Карлин, В. Г. Кукс, Л. Е. Липовецкий, А. В. Лукин, К. С. Мустафин, А. З. Хабиров, А. Г. Хуснутдинов. — М.: ЦНИИ Информации, 1980. — 272 с.
- [2] **Научно-технический сборник** «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (1957–1997 гг.). Часть 1 / Под ред. С.О. Мирумянца. — Казань: Изд-во «Дом печати», 1997. — С. 119–131.
- [3] **Лукин, А. В.** Реплицированная асферическая оптика: основные аспекты организации серийного и массового производства / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, М. М. Ахметов, А. В. Берденников, Гайнутдинов И. С. и др. // Контенант. — 2017. — Том 16. — № 2. — С. 167–172.
- [4] **Лукин, А. В.** Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42 – 50.

Shaping technologies and methods of laser-holographic control of all types of aspherical optical surfaces. GIPO's contribution to the development in the field

A. V. Lukin

JSC «Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics» (GIPO), Kazan, Russia

The report considers the historical aspect and development trends of shaping technologies and methods of laser-holographic control of all types of aspherical optical surfaces in the context of GIPO's research activities.

Keywords: Aspherical optics, Shaping technologies, Laser-holographic control methods, Combined optical element, Precision replication, Master matrix, Historical aspect, Development trends.