

М 794663
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Наталья Леонидовна ЛАЗАРЕВА

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИНЗ НА ЛАЗЕРНЫХ
ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

(05.11.07 — Оптические приборы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент Пуряев Д. Т.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, проф. Афанасьев В. А.
кандидат технических наук Скоков И. В.

Ведущее предприятие — Лыткаринский завод оптического
стекла

Автореферат разослан «19» *мая* 1973 г.

Защита диссертации состоится «20» *июня* 1973 г.

на заседании Совета фа-
ского ордена Ленина и
высшего технического
ресу: Москва, 107005, 2

Ваши отзывы в 2-х
сылать по указанному

С диссертацией мо-
ща.

Ученый секретарь
г.т.и., доц.

М 194663

В связи с развитием приборостроения требуются все более совершенные методы и оптические приборы для наблюдения и фотографирования удаленных объектов. Разрешающая способность таких приборов в основном определяется разрешающей способностью объективов, которые состоят из крупногабаритных линз и зеркал. Несовершенство методов и приборов для контроля качества оптических поверхностей большого размера задерживает создание таких объективов.

Особо важна проблема контроля формы выпуклых поверхностей большого диаметра. Сложность этой проблемы характеризуют высказывания ведущих ученых нашей страны. Член-корр. АН СССР Д.Д.Максутов указывал в 1948 г., что исследование выпуклых поверхностей - задача трудная, так как их невозможно исследовать без посредства крупногабаритных вспомогательных элементов. Спустя двадцать лет академик В.П.Линник отмечает: "Для контроля больших поверхностей сплошное пробное стекло неприменимо... Вопрос о контроле выпуклых поверхностей по-прежнему остается сложным".

При серийном изготовлении фотообъективов дальнего действия проблема создания специальных приборов для контроля формы поверхностей крупногабаритных линз в цеховых условиях стала весьма актуальной. Серийно изготавливаются объективы, состоящие из линз со сферическими поверхностями, световые диаметры которых превышают 400мм. Допустимые отклонения формы каждой поверхности от ее теоретического профиля составляют величины порядка долей длины волны света. Вогнутые и плоские поверхности линз можно с необходимой точностью контролировать известными интерференционными способами, тогда как контроль выпуклых поверхностей представляется задачей нерешенной.

Целью настоящей диссертации является разработка и исследование высокоточных методов и приборов для контроля выпуклых сферических поверхностей линз большого диаметра. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения.

В первой главе проводится анализ существующих и теоретически возможных методов, выбирается оптимальный метод и рассматривается новая схема неравноплечного лазерного интерферо-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1194663

Лазарева Н.П. Разработка

метра. На основе анализа требований, предъявляемых к качеству сферических поверхностей современных высококачественных оптических систем, условий и известных способов их контроля, формулируются основные принципы разработки методов и приборов, удовлетворяющие поставленным требованиям:

1. для достоверной оценки качества поверхности необходимо контролировать всю поверхность одновременно;
2. возможность повреждения поверхности в процессе контроля должна быть исключена;
3. вспомогательную деталь большого диаметра целесообразно использовать только в том случае, если она имеет универсальное применение и простую конфигурацию;
4. вспомогательные элементы индивидуального назначения должны быть значительно меньше контролируемой детали и иметь простейшую конструкцию.

Наиболее перспективно и целесообразно осуществлять контроль в системе интерферометра. Рациональной схемой можно считать автоколлимационную, в которой выпуклая поверхность контролируется с обратной стороны. В этом случае не требуется громоздких вспомогательных элементов для создания рабочего волнового фронта нужной формы. Роль вспомогательного элемента выполняет передняя поверхность контролируемой линзы, которая, даже будучи идеально выполненной, вносит аберрации в сферический волновой фронт. Для линзы, центрированной относительно оси падающего на нее светового пучка, получена формула, определяющая величину отступления формы реального волнового фронта от сферы как функцию, зависящую от параметров линзы:

$$N_A = -\frac{1}{8} h_A n_A (n_A - 1) \frac{(r_{2A} - r_{1A} - d_A)^2 [(n_A + 1)r_{1A} - n_A(r_{2A} - d_A)]}{[r_{1A}(r_{2A} - d_A)]^3},$$

где r_{1A} - радиус кривизны передней поверхности; r_{2A} - радиус кривизны отражающей поверхности; d_A - толщина линзы по оптической оси; n_A - показатель преломления материала линзы; h_A - высота над оптической осью точки пересечения лучом передней поверхности линзы. Расчеты показали, что обычно величины волновых аберраций достигают нескольких сотен длин

волн. Поэтому для реализации автоколлимационной схемы в системе интерферометра необходимо компенсировать эти аберрации, т.е. включить специальный элемент, который бы преобразовывал сформированный источником излучения сферический волновой фронт во вполне определенный несферический. Таким образом, для реализации автоколлимационной схемы в системе интерферометра необходимо разрабатывать компенсационный метод контроля.

Для получения рабочей интерференционной картины необходимо иметь два волновых фронта: эталонный и рабочий. Предлагается два варианта расположения эталонного элемента схемы относительно системы компенсатор-контролируемая линза. В первом варианте эталонная деталь устанавливается перед системой компенсатор-контролируемая линза и может иметь небольшие габариты. Тогда компенсатор участвует только в создании рабочего волнового фронта и поэтому требования к его изготовлению, установке и степени компенсации в системе определяются допусками на изготовление контролируемой детали. Если эталон и компенсатор идеальны, то искажения в рабочий волновой фронт вносят ошибки обеих поверхностей контролируемой линзы, а также неоднородности стекла. Влияние ошибок поверхностей на величину деформации волнового фронта вследствие этих ошибок различно: задняя (отражающая) поверхность вносит в $\frac{n_1}{n_1 - 1}$ раз большие деформации, чем передняя (преломляющая). Это соотношение позволяет определить принадлежность ошибок определенной поверхности, выполнив контроль линзы с обеих сторон. Наличие неоднородностей в стекле можно причислять к ошибкам поверхностей и выполнять ретушь поверхностей с поправкой на эти неоднородности.

Во втором варианте эталонная деталь устанавливается за контролируемой линзой и поэтому ее диаметр должен быть не менее диаметра последней. Компенсатор здесь становится элементом осветительно-наблюдательной ветви и поэтому к нему не предъявляются высокие требования. Ошибки формы передней поверхности контролируемой детали и неоднородность стекла также не оказывают влияния на вид рабочей интерференционной картины.

В обоих вариантах схем ход лучей через контролируемую де-

таль одинаков, поэтому они могут быть реализованы в единой системе неравноплечного интерферометра, имеющего общие осветительную и наблюдательную ветви. Анализ известных схем интерферометров показал, что ни одна из них не может быть признана оптимальной применительно к контролю линз большого диаметра. Поэтому была предложена принципиально новая схема лазерного неравноплечного интерферометра с совмещенными ветвями [2], представленная на рис. 1.

Выходящий из лазера волновой фронт проходит через телескопическую систему и светоделитель, а затем преобразуется объективом в сферический, который направляется в совмещенные ветви интерферометра. Рабочая интерференционная картина проецируется объективом наблюдательной ветви на экран или фоточувствительный слой. Данный интерферометр является универсальным: можно контролировать крупногабаритные линзы с выпуклыми поверхностями компенсационным методом в обоих вариантах автоколлимационных схем, а также вогнутые сферические и асферические поверхности. Теоретически схема не вносит погрешностей в измерения. Если контроль линз проводится по первому варианту, то единственным элементом, который может внести погрешности в измерения, является компенсатор. Однако необходимость его точного изготовления и установки можно отнести не к недостаткам схемы интерферометра, а к особенностям метода. Применение в качестве источника излучения лазеров с большим временем когерентности позволяет при реализации второго варианта автоколлимационной схемы использовать небольшой набор крупногабаритных эталонных зеркал, так как в этом случае величины воздушных промежутков могут достигать значительных размеров.

Во второй главе диссертации разрабатывается компенсационный метод контроля линз большого диаметра с выпуклыми сферическими поверхностями.

Для внедрения компенсационного метода в производство необходимо, чтобы компенсаторы были простейшей конструкции, имели световые диаметры в пределах диаметров стандартных пробных стекол, а также обеспечивали необходимую степень компенсации. Важным моментом является разработка методики расчета компенса-

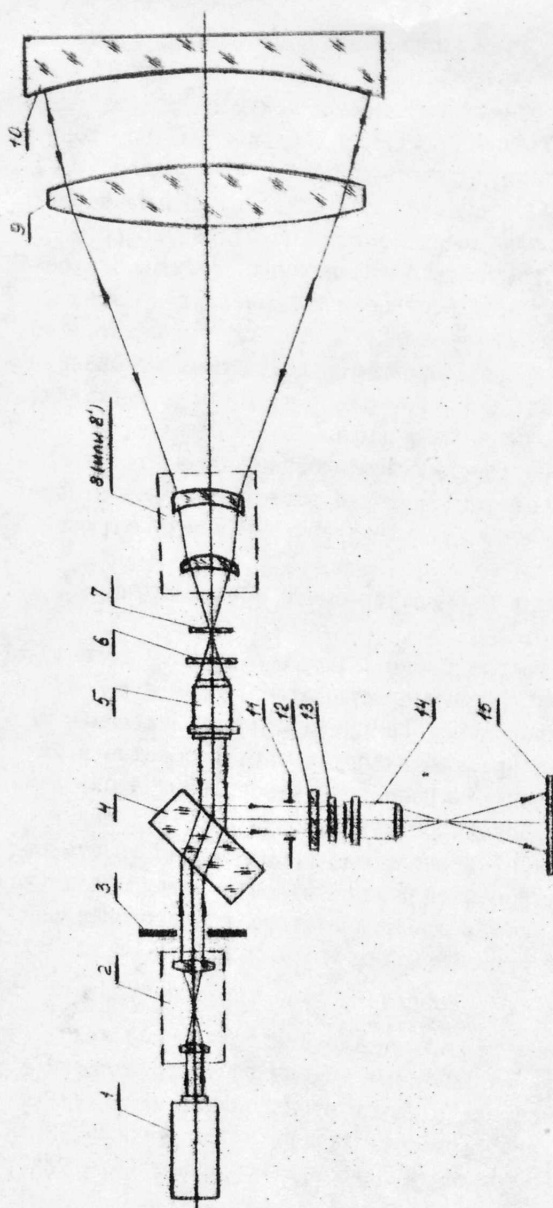


Рис. 1. Принципиальная схема интерферометра с совмещенными ветвями.

1 - оптический квантовый генератор; 2 - телескопическая система; 3 - экран с отверстиями; 4 - светодетектор; 5 - объектив; 6 - фазовая пластинка; 7 - тонкая плоскопараллельная пластинка; 8 - блок эталон-компенсатор (8' - компенсатор); 9 - контролируемая деталь; 10 - эталонное зеркало; 11 - диафрагма; 12 - анализатор; 13 - шкала; 14 - объектив; 15 - экран.

торов с учетом особенностей компенсационного метода контроля линзовых элементов.

Применительно к оптимальным схемам контроля рассматриваются требования к необходимой степени компенсации. При контроле линз без применения крупногабаритного эталонного зеркала остаточные aberrации системы контролируемая линза-компенсатор должны быть на порядок меньше допустимой общей ошибки поверхностей. Если контроль выполняется с помощью эталонного зеркала, то требования к степени компенсации не зависят от допусков на изготовление детали. В этом случае остаточные волновые aberrации не должны превышать допустимых искажений световой волны, входящей в интерферометры, и могут составлять величины порядка нескольких длин волн.

На основании теоретических исследований предлагается методика расчета компенсаторов, которая состоит из трех этапов:

1. Определение aberrационных характеристик контролируемой линзы.
2. Расчет приближенных параметров схемы контролируемая линза-компенсатор.
3. Оптимизация параметров схемы с помощью расчета хода лучей на ЭВМ по стандартным программам.

Для выполнения второго этапа проводится исследование возможности использования простейших оптических элементов в качестве компенсаторов при контроле крупногабаритных линз. В результате исследования выводятся зависимости для трех видов простейших компенсаторов, позволяющие сравнительно просто выполнять предварительный расчет компенсаторов, исходя из допустимых конструктивных габаритов компенсатора и всего интерферометра. При расчете по этим формулам исходными данными являются

$\delta s'_k$ и $tg u'_k$, которые получают в результате оп-

ределения aberrационных характеристик контролируемой линзы. Остальные параметры рассчитываются исходя из определенного хода лучей через компенсатор, а затем производится их оптимизация на ЭВМ. Эта методика проверена при расчетах компенсаторов для контроля более чем двадцати линз трех серийных крупногабаритных систем.

При реализации компенсационного метода контроля линз с применением первого варианта автоколлимационной схемы наиболее выгодно использовать границу раздела двух сред (плоскую или сферическую). Тогда блок эталон-компенсатор может быть выполнен в виде простой линзы, одна поверхность которой эталонная, а вторая - компенсирующая.

При реализации второго варианта автоколлимационной схемы выгодно использовать компенсатор универсального назначения. В этом случае оптимально применение простой линзы, перемещаемой вдоль оси системы в сходящемся пучке лучей.

Результаты расчета схем компенсации для контроля реальных крупногабаритных линз показали, что в большинстве случаев компенсаторы в виде границы раздела сред обеспечивают такую степень компенсации, что при двойном ходе лучей остаточные волновые aberrации системы составляют величины порядка $0,2\lambda$ (λ - длина волны света). При этом световые диаметры компенсаторов не превышают диаметра эталонных пробных стекол (130 мм). В отдельных случаях невозможно обеспечить высокую степень компенсации с помощью простейшего оптического элемента небольшого диаметра. Поэтому для этих случаев рассчитан универсальный компенсатор для контроля линз в схеме с эталонным зеркалом. Здесь остаточные волновые aberrации системы контролируемая линза-компенсатор изменяются от нуля до нескольких длин волн, что допустимо при действующих здесь апертурах.

Исходным моментом компенсационного метода контроля является то, что при идеально выполненной контролируемой поверхности, суммарные aberrации системы контролируемая линза-компенсатор представляют собой заранее известную функцию. Отступления реальной функции от расчетной относятся на счет ошибок контролируемой поверхности. Расчет компенсатора проводится для идеальной линзы, параметры которой известны и предполагается, что система идеально центрирована. Реально параметры любой линзы имеют отклонения в пределах допусков. Установка элементов схемы относительно друг друга производится в процессе юстировки и не является идеальной. Поэтому выясняется соответствие расчетных остаточных волновых aberrаций aberrациям реальной системы, если ее элементы изготовлены и установлены

в пределах допусков.

Предлагается способ определения критического сочетания отклонений параметров, которое вызывает максимальное отклонение остаточных волновых аберраций от их начальных значений. Способ основывается на оценке изменений рабочих отрезков элементов схемы в параксиальной области, так как максимальное изменение этих отрезков соответствует максимальному изменению волновых аберраций. Такая оценка позволяет сократить количество вариантов, подлежащих расчету на ЭВМ, и дает полное представление о влиянии критических сочетаний отклонений параметров на выходные характеристики системы. В работе выводятся формулы для расчета изменения параксиальных отрезков элементов схемы в зависимости от допусков на их изготовление. Для контролируемой линзы $\Delta S'_M = f(\Delta n_n; \Delta d'_n; \Delta \gamma_n; \Delta \gamma_{2n})$:

$$\Delta S'_M = \frac{1}{[n_n \gamma_n - (n_n - 1)(\gamma_{2n} - d'_n)]^2} \left[\gamma_n (\gamma_{2n} - d'_n)(\gamma_{2n} - \gamma_n + d'_n) \Delta n_n - n_n \gamma_n^2 \Delta d'_n - (n_n - 1)(\gamma_{2n} - d'_n) \Delta \gamma_n + n_n \gamma_n^2 \Delta \gamma_{2n} \right].$$

Для блока эталон-компенсатор, представляющего линзу с первой поверхностью эталонной ($\gamma_{кэ}$), а второй - компенсирующей (γ_k) $\Delta S'_K = f(\Delta n_k; \Delta d'_k; \Delta \gamma_{кэ}; \Delta \gamma_k)$.

а) Компенсирующая поверхность - сфера:

$$\Delta S'_K = \frac{[\gamma_k n_k - S'_k (n_k - 1)]^2 (\Delta \gamma_{кэ} + \Delta d'_k) + \gamma_k S'_k (S'_k - \gamma_k) \Delta n_k - S'^2_k (n_k - 1) \Delta \gamma_k}{\gamma_k^2 n_k}.$$

б) Компенсирующая поверхность - плоскость:

$$\Delta S'_K = n_k (\Delta \gamma_{кэ} + \Delta d'_k) - \frac{S'_k}{n_k} \Delta n_k.$$

Приводятся примеры расчетов с использованием полученных формул. Анализ результатов расчета свыше десяти схем компенсации показал, что в большинстве случаев величина отклонений волновых аберраций не превышает $0,1 \lambda$, что вполне допустимо.

В третьей главе рассматриваются особенности конструкции разработанного интерферометра, разрабатывается методика его юстировки, приводятся результаты экспериментального исследования и проводится усовершенствование схемы по результатам экспериментального исследования.

Отличительной особенностью разрабатываемой схемы интерферометра является использование компенсаторов для контроля крупногабаритных линзовых элементов. Здесь контролируемая деталь, блок эталон-компенсатор и эталонное зеркало являются сменными элементами, для которых необходимо обеспечить совмещение оптических осей с необходимой точностью, а также соответствие расчетным значениям действительных воздушных промежутков между элементами в совмещенных ветвях. Отсутствие готовой методики юстировки потребовало разработки нового метода, основанного на высокоточном центрировании и последующей фокусировке. Центрирование линзовых элементов предлагается выполнять, используя тонкий и практически параллельный пучок лучей лазера. Критерием правильного центрирования служит концентрическая интерференционная картина, которая образуется при взаимодействии волновых фронтов, отраженных от центральных зон линз. Число колец, наблюдаемых на экране, удаленном от линзы на расстояние L определяется по полу-ченной формуле:

$$k = \left| \frac{1}{s'_1 + L} - \frac{1}{s'_2 + L} \right| \frac{D_{min}^2}{8\lambda}$$

где s'_1 и s'_2 - расстояния от линзы до точек схода лучей, отраженных от ее поверхностей; D_{min} - диаметр минимального автоколлимационного пятна на экране.

Точная фокусировка рабочей ветви осуществляется для получения такой формы интерференционной полосы, которая обуславливается только расчетными остаточными аберрациями системы и ошибками контролируемой линзы. Фокусировку предлагается производить способом выведения интерференционной картины на минимальное число колец плюс одно кольцо посредством смещения центра подвижного фронта волны в обе стороны по оси относительно неподвижного и отсчетом по шкале микрометренного винта (которым задаются перемещения) середины диапазона переме-

щений, в пределах которого наблюдается ровное поле или минимальное число колец. Установка по шкале отсчета, соответствующего середине диапазона, приводит к совмещению центров фронтов. Расчеты, проведенные для оценки точности юстировки, показали, что вполне возможно настроить систему таким образом, что действительные аберрации системы контролируемая линза-компенсатор вследствие неточности настройки будут отличаться от расчетных остаточных аберраций на величину порядка $\pm 0,01 \lambda$, что допустимо.

Для проверки теоретических положений, выдвинутых в настоящей работе, а также выяснения целесообразности использования предложенной системы интерферометра для контроля крупногабаритных оптических деталей и компенсационного метода контроля линзовых элементов были проведены экспериментальные исследования. Все работы проводились в цеховых условиях крупнейшего оптико-механического завода. Объектом контроля служили детали серийных крупногабаритных объективов.

Экспериментальная установка была выполнена в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. В качестве источника излучения применялся оптический квантовый генератор ЛГ-36А, работающий в одномодовом режиме. Экспериментальные исследования проводились в несколько этапов в течение длительного времени, выполнено несколько десятков измерений. Интерферограммы подвергались тщательному анализу и сравнивались с данными о качестве контролируемых деталей, полученными методом переналожений малых эталонов.

Результаты экспериментов подтвердили основные теоретические положения и показали, что метод вполне надежен и применим в производственных условиях.

На основе экспериментальных исследований проведено усовершенствование принципиальной схемы интерферометра (рис. 1). Введены: белый экран с отверстием и концентричными кругами, служащий для центрирования линзовых элементов; тонкая пластинка (устанавливается в фокальной плоскости объектива), предназначенная для наблюдения на ее поверхности автоколлимационных бликов от эталонной и контролируемой поверхностей. Фазовая пластинка совместно с анализатором поляризации применяется

для устранения вредного фона в наблюдательной ветви. Перед объективом наблюдательной ветви устанавливается шкала для проверки степени концентричности колец и прямолинейности полос на интерференционных картинах при их визуальном наблюдении.

В ы в о д ы

1. Предложен, разработан и исследован новый метод высокоточного контроля крупногабаритных линз, содержащих выпуклые поверхности, на базе новой схемы лазерного интерферометра с совмещенными ветвями.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проектирования, изготовления, юстировки и эксплуатации интерферометра нового типа.

3. Разработана методика расчета компенсаторов и получены новые формулы для предварительного расчета их параметров. Проведен анализ возможностей простейших оптических элементов в качестве компенсаторов для контроля крупногабаритных линз.

4. Разработана методика определения критического сочетания отклонений параметров реальной системы контролируемая линза-компенсатор, которое вызывает наибольшее изменение остаточных волновых аберраций по сравнению с их расчетными значениями. Приведены примеры расчета.

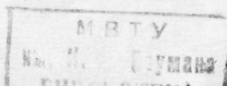
5. Разработан и изготовлен действующий макет интерферометра нового типа. Экспериментальная проверка точности метода и его возможностей полностью подтвердила теоретические положения. Проведен контроль ряда линз серийных крупногабаритных объективов. Метод внедрен в производство на оптико-механическом заводе. Акты о внедрении приложены к диссертации.

6. Компенсационный метод является наиболее точным и рациональным из всех существующих методов контроля формы поверхностей линз большого диаметра.

7. Метод снижает трудоемкость процесса контроля и осуществим в производственных условиях.

8. Расчет компенсаторов на ЭИМ практически осуществим и не является трудоемким.

9. Предложенный метод и схема интерферометра могут быть



применены для контроля линз большого диаметра, как со сферическими, так и с асферическими поверхностями, а также крупногабаритных зеркал.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Лазарева Н.Л., Анализ методов контроля оптических поверхностей большого диаметра. Сборник трудов МВТУ им. Н.Э.Баумана, № 143, 1971.
2. Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л., Интерферометр для контроля качества оптических деталей. Авторское свидетельство № 373519. Бюллетень изобретений № 14, 1973.
3. Лазарева Н.Л., Новые схемы контроля выпуклых поверхностей линз большого диаметра. Тезисы докладов второй научно-технической конференции "Приборостроение", 1973.