

УДК 62.465

КОНТРОЛЬ АСФЕРИЧЕСКИХ ЛИНЗ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ***В. Остен¹, Б. Дёрбанд², Е. Гарбуци¹, К. Прусс¹, Л. Зайферт¹**

¹*Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik,
Pfaffenwaldring 9, D-70569 Stuttgart, Germany
E-mail: osten@ito.uni-stuttgart.de*

²*Carl Zeiss SMT AG,
Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen, Germany*

Оптическая метрология предоставляет уникальную возможность для измерений технических и оптических поверхностей в широком диапазоне от макро до нано. Представлено два новых подхода к измерению асферических линз, отличающихся повышенной гибкостью. Первый подход основан на модифицированном интерферометре Тваймана — Грина, в котором для освещения под разными углами асферической поверхности используется множество источников, что позволяет достичь локальной компенсации градиента и, следовательно, уменьшить число интерференционных полос. Второй подход основан на хроматическом интерферометре Физо с дифракционным элементом в качестве компенсатора (нуль-оптика) для измерения асферик в жёстком ультрафиолете.

Ключевые слова: оптическая метрология, контроль асферики, динамическая адаптация по волновому фронту, динамическая адаптация по длине волны.

Введение. Асферические элементы (асферика) стали синонимом оптики высокой точности. Фактически многие производители линз сделали свои асферические элементы заметной частью рекламы. Асферика всё больше используется в оптических системах всевозможного применения с вариацией степени асферичности и требований по точности. По сравнению с классическими схемами, в которых применяются только сферические поверхности, асферические элементы позволяют получать практически любой желаемый волновой фронт и корректировать aberrации оптических систем с более высокой гибкостью при меньшем числе элементов. В этой связи проектировщики оптических систем интенсивно работают не только над созданием новых конструктивных концепций, но и новыми подходами к технике изготовления и контроля элементов. В силу максимальной степени свободы такого проектирования не существует стандартных методов проверки асферик. В то же время требуются такие технологии, в которых точность будет сочетаться с гибкостью.

В предлагаемом исследовании рассматриваются текущие разработки, не содержащие подвижных механических элементов и основанные на концепциях нестандартного освещения. Первое техническое решение основано на одновременном генерировании множества тестовых волновых фронтов [1–3] с помощью раstra когерентных точечных источников, а второе — на использовании хроматизации интерферометра Физо с дифракционным элементом в качестве компенсатора (нуль-оптики) волнового фронта для измерения асферик в жёстком ультрафиолете [4].

Контроль асферических линз с множеством освещающих источников. Общей проблемой в интерферометрическом контроле асферик является чрезвычайно высокая частота полос, которые производятся асферическими элементами и не могут быть разре-

*Работа выполнена при поддержке Федерального министерства образования, научных исследований и технологий Германии (BMBF) (FKZ 13N8742).

шены датчиком изображения. Эта проблема возникает вследствие высоких градиентов изменения профиля тестируемых поверхностей, что вносит сильные девиации волнового фронта в измерительном и опорном плечах интерферометра. Поэтому динамический диапазон интерферометра часто оказывается ограниченным двумя факторами: чрезвычайно высокой частотой полос и артефактами виньетирования. Для преодоления этих ограничений предложен ряд методов. Современным решением является применение компенсатора волнового фронта — компьютерно-синтезированной голограммы (КСГ) — в качестве компенсирующего элемента в измерительном плече интерферометра. Это позволяет уменьшить либо полностью исключить сильные девиации волнового фронта, вызванные тестируемой поверхностью [5–7]. Такие элементы являются очень гибкими и могут быть использованы для проверки широкой гаммы асферической оптики и даже элементов произвольной формы. Основные их недостатки — высокая стоимость и длительное время производства. Каждый новый тип асферического элемента требует изготовления новой КСГ. Ещё одним подходом к снижению частоты полос является перемещение асферики или оптики интерферометра [8, 9], что обеспечивает получение для последующей оценки интерферограммных субапертур асферики. Однако это сопряжено с необходимостью высокоточного контроля механических перемещений и проведения множества последующих измерений. Другие устройства для измерения асферик методами интерферометрии без компенсаторов волнового фронта предложены в [10–13].

Во избежание смещения асферики предложено решение [14], которое заключено в определённой манипуляции в опорном плече интерферометра в целях компенсации девиаций волнового фронта в измерительном плече интерферометра. Данный интерферометр с динамически изменяющимся опорным плечом обладает увеличенным диапазоном измерений, однако при этом в его составе должна присутствовать также изображающая оптика с высокой числовой апертурой, для того чтобы избежать эффектов виньетирования при высокой асферичности.

В представленной работе излагается новый подход, основанный на модифицированном интерферометре Тваймана — Грина [13, 15]. Суть его сводится к использованию множества источников для освещения асферической поверхности под разными углами. Таким образом обеспечивается локальная компенсация градиента изменения профиля, а следовательно, и уменьшение числа интерференционных полос. В процессе измерений при фиксированном опорном пучке осуществляется активация различных источников. Данная конфигурация позволяет работать с большими асферическими отклонениями, избегая одновременно артефактов виньетирования и высоких частот полос на детекторе. Метод не требует механического смещения проверяемой части и даёт возможность одновременно проводить активацию множества источников, чем достигается предельно малое время измерений по отношению к другим вышеупомянутым методам.

Указанная тестирующая конфигурация без компенсатора волнового фронта увеличивает гибкость измерений. Однако, поскольку падение измеряемого волнового фронта на тестируемую поверхность не является нормальным, требуется тщательная настройка интерферометра для компенсации ошибок, обусловленных расхождением оптических путей. В силу того что путь в измерительном пучке в общем случае может заметно отличаться от пути в опорном пучке (конфигурация без общего хода), необходимо обеспечить выделение дополнительных aberrаций из aberrационных вкладов, обусловленных контролируемой поверхностью. Кроме того, при высоких градиентах изменения профиля проверяемых поверхностей частота полос выходит за пределы, которые может разрешить датчик изображений, и при этом требуется учитывать также эффекты виньетирования волнового фронта.

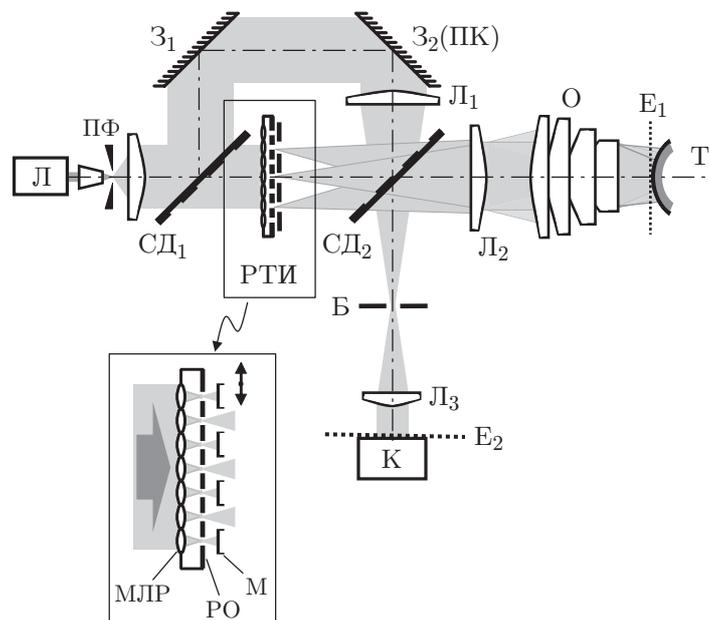


Рис. 1. Экспериментальная схема интерферометра

Схема интерферометра представлена на рис. 1 (Z_1 и Z_2 — поворотные зеркала; ПК — пьезоэлектрический преобразователь; М — маска выбора источника; Т — тестируемая сфера; E_1 — плоскость, соответствующая вершине поверяемого элемента; E_2 — положение камеры К). В его основе лежит интерферометр Тваймана — Грина с модификацией в измерительном плече. Излучение He—Ne-лазера (Л) ($\lambda = 632,8$ нм) фильтруется с помощью пространственного фильтра (ПФ), а затем коллимируется и расщепляется на опорный (верхняя часть) и измерительный (нижняя часть) пучки посредством светоделителя $СД_1$. Дифракционный оптический элемент — растр точечных источников (РТИ), состоящий из микролинзового раstra (МЛР) (на его передней стороне) и согласующего раstra точечных отверстий (РО) (на задней стороне), изготовлен в монолитном исполнении и размещается в измерительном плече интерферометра. Этот элемент генерирует двумерную матрицу точечных источников, являющихся измерительными пучками интерферометра. Линза $Л_2$ коллимирует эти источники, генерируя таким образом набор волновых фронтов с различными наклонами. Для асферики, основная форма которой является сферической, выгодно использовать дополнительный пропускающий объектив О, чтобы компенсировать данную сферическую компоненту волнового фронта. В случае же использования планарных асферических поверхностей (например, геометрия с пластинкой Шмидта) объектив не требуется. После отражения от асферики волновой фронт отображается линзой $Л_3$ на детектор К. Линза $Л_1$ фокусирует пучок верхней ветви интерферометра (опорная волна) на апертуру Б и генерирует после линзы $Л_3$ плоскую волну, которая интерферирует с измерительным пучком, отражённым от асферики. Как правило, апертура Б позиционируется в фурье-плоскости изображающей оптики так, чтобы исключить компоненты измерительного пучка, приводящие к появлению неразрешаемых полос (субвыборке) на детекторе К.

Поскольку данным методом осуществляются измерения, которые не удовлетворяют условиям работы с компенсатором, то следует ожидать большой вклад ошибок ретрассировки в волновой фронт. Как указывалось ранее, неизбежным шагом процедуры является калибровка интерферометра в целях разделения вкладов от интерферометра непосредственно и от контролируемой поверхности. Так как полное описание каждого отдельного

элемента интерферометра представляется достаточно сложным и затратным по времени [16] (параметры изготовления, позиционирования и т. д.), то в [17, 1, 15] был предложен новый метод, исключающий необходимость проведения этой утомительной процедуры. Его основная идея — характеристика aberrаций волновых фронтов, распространяющихся в направлении измерительного пространства (в объёме, где располагается тестируемая поверхность) и от измерительного пространства к детектору. В тестируемом пространстве интерферометра для каждого источника раstra опорная сфера размещается так, чтобы число полос на детекторе было минимальным. Для этого использовано прецизионное устройство позиционирования на аэростатических направляющих фирмы "Aerotech" (США). В ходе процесса оптимизации измеряемые волновые фронты и положения сфер учитываются совместно с условиями обычного расчёта интерферометра. В результате имеем набор параметров, которые описывают aberrации системы для всех возможных направлений распространения зондирующих пучков в интерферометре. Так как aberrации, вносимые интерферометром, являются систематическими и их можно определить, то исходя из этого, нетрудно рассчитать ожидаемую интерферограмму с заранее заданной асферичностью. На указанной стадии осуществляется дополнительный процесс оптимизации. Коррекция каждого из параметров, описывающих асферическую поверхность, осуществляется до тех пор, пока эти параметры не будут согласованы с фазой, измеряемой на детекторе.

Важно отметить, что смежные световые источники генерируют интерферограммы, которые соответствуют смежным областям на асферике. Из-за дифракционных эффектов на краю и перекрытия пучков важно иметь промежутки между отдельными субинтерферограммами. Таким образом, каждый источник генерирует группу зон, располагающихся на различных частях контролируемого элемента. Пример такого расположения зон отображён на рис. 2. Субинтерферограммы для центральной области асферики показаны на рис. 3, а последовательность измерений иллюстрирует рис. 4.

Экспериментально измерена асферика с вращательной симметрией с отклонением приблизительно на 900 мкм от лучшей подгоночной сферы и на 1 мкм от асферики желаемой формы. Использовался растр из $15 \times 15 = 225$ источников с расстоянием между ними 2,5 мм. Каждый источник генерировался с помощью микролинз с числовой апертурой 0,2,

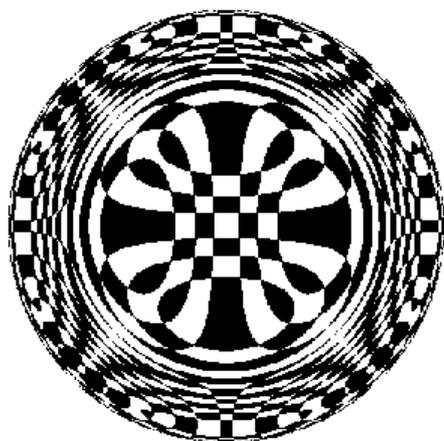


Рис. 2. Пример картины зон для асферического элемента с преимущественно асферической aberrацией. Каждая интерферограмма генерируется конкретным источником раstra

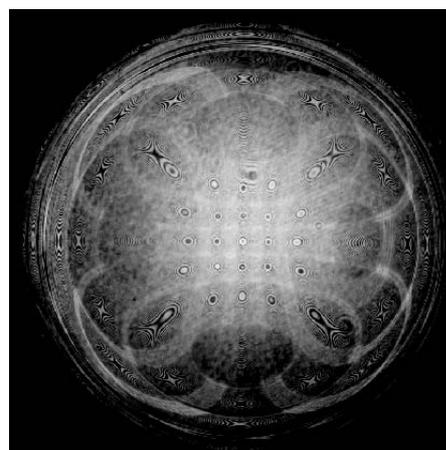


Рис. 3. Пример картины зональных интерферограмм для асферического элемента

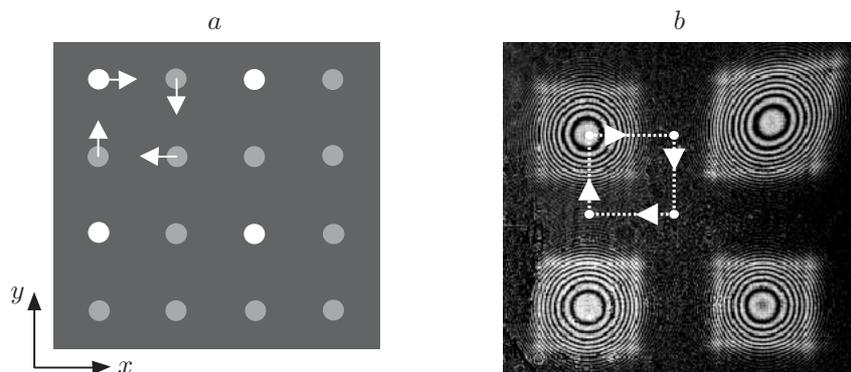


Рис. 4. Последовательность измерений: *a* — движение селективирующей маски по растру источников в направлениях x и y (источники, выделенные белым цветом, являются активными); *b* — последовательность интерферограмм, регистрируемая камерой (интерферограммы соответствуют активным источникам, показанным на рис. 4, *a*)

при этом точечное отверстие имело размер 30 мкм. В соответствии с вышеуказанным замечанием для компенсации сферической компоненты волнового фронта был применён объектив JenFizar 4'' с относительным отверстием 0,75 (с числовой апертурой 0,67). Детектор представлял собой 4-мегапиксельную ПЗС-камеру с шагом пикселей 7,4 мкм.

Для калибровки использована опорная сфера с точностью $\lambda/20$ и почти 90 калибровочных положений. Результаты приведены на рис. 5. Достигнутая точность измерений составляет $\sim 0,13\lambda$ по пику. Планируется довести точность измерений до значения $\lambda/30$. Текущая точность системы ограничивается механической стабильностью пробной первой демонстрационной установки. В предлагаемой работе проведена перекрёстная проверка этих результатов и результатов измерений, полученных при использовании компьютерно-синтезированной голограммы, рассчитанной для данной асферики. Алгоритм оптимизации обеспечивал коррекцию с помощью полиномиального описания асферики. Высокочастотные детали поверхности не моделировались при данном подходе. Таким образом, требуется дополнительная стадия, на которой будет рассчитываться разность между измеренной и ожидаемой фазами исходя из формы асферики, полученной при оптимизации.

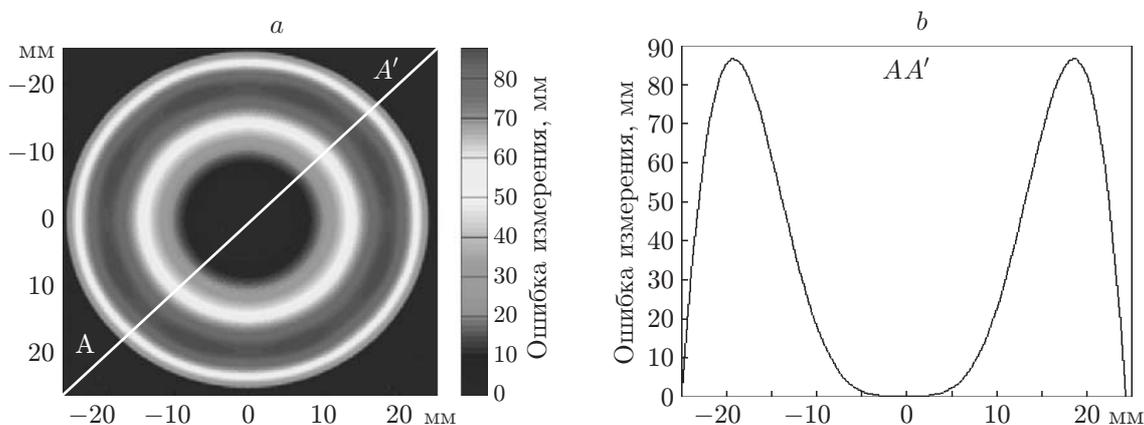


Рис. 5. Экспериментальные результаты: *a* — остаточная ошибка после калибровки профиля поверхности по измерениям составляет $\sim 0,13\lambda$ (пиковое значение); *b* — срез вдоль линии AA' для двумерной карты (рис. 5, *a*)

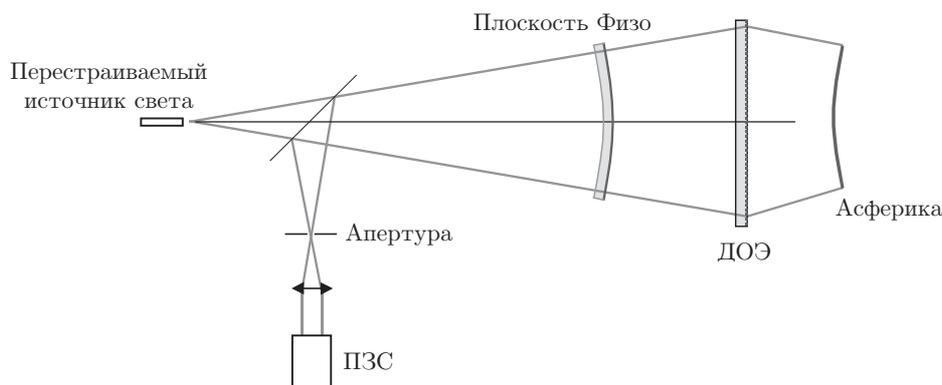


Рис. 6. Хроматический интерферометр Физо. Адаптация по длине волны осуществляется ДОЭ. Так как дифракция зависит от длины волны, то различные участки асферики измеряются на разных длинах волн

Контроль асферических поверхностей хроматическим интерферометром Физо. В современных интерферометрических системах центральная длина волны обычно поддерживается постоянной с высокой точностью, но иногда она изменяется и используется как средство для реализации фазового сдвига или для контроля когерентных свойств. Между тем длину волны можно перестроить также без механических перемещений в измерительной установке, а её точное значение определить динамически с точностью 10^{-6} . Идея данного подхода состоит в изменении длины волны для повышения гибкости асферической метрологии. Для этого предлагается применять хроматический интерферометр Физо, где статический лазер заменяется перестраиваемым когерентным источником света [4].

Измерительная схема с дифракционным оптическим элементом (ДОЭ) в качестве компенсатора волнового фронта показана на рис. 6. В силу принципиального сходства со стандартной схемой Физо может быть непосредственно применён опыт использования монохроматического интерферометра Физо. В плоскости камеры измерительный пучок интерферирует с опорным пучком, отражённым от плоскости Физо в полости интерферометра; и поскольку данная схема в большей части является интерферометром с общим ходом пучков, возмущения в полости вносятся в оба пучка, что не приводит к погрешностям измерений.

Длина когерентности лазера должна быть достаточно большой, для того чтобы вдвое перекрыть зависящую от радиуса разность хода между плоскостью Физо и асферикой. В некоторых случаях для выравнивания оптического пути необходима внешняя полость. При этом 1 бит динамического диапазона камеры теряется из-за некогерентного фонового света. Требованиям высокого качества пучка, длины когерентности и перестройки по длине волны более чем на 100 нм удовлетворяют титан-сапфировые лазеры. В связи с этим при последующем моделировании использовался титан-сапфировый лазер Sirah Matisse (Германия) [18], который может перестраиваться на $\lambda = 740\text{--}880$ нм с помощью одного и того же набора зеркал.

В зависимости от длины волны угол дифракции света на ДОЭ и соответственно угол падения светового пучка на асферическую линзу будут изменяться. Зависимость угла дифракции от длины волны данного лазера показана на рис. 7. Этот угол можно выставить с точностью $\sim 5^\circ$ при частоте штрихов ДОЭ 500 пар линий/мм. Наша идея состояла в измерении асферики с использованием набора различных длин волн. В этом случае при нуль-тестировании для каждой длины волны измеряется определённая часть асферики. Если асферика является радиально-симметричной, это означает, что для каждого волнового фронта может

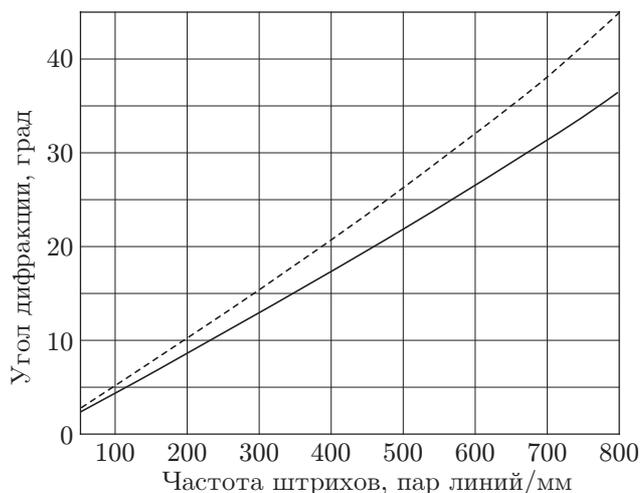


Рис. 7. Зависимости угла дифракции от частоты штрихов ДОЭ (сплошная кривая — $\lambda = 740$ нм, пунктирная — $\lambda = 880$ нм)

быть измерена своя кольцевая зона.

Измерение асферики в жёстком ультрафиолете. В качестве демонстрации принципа измерений представим результаты моделирования измерений четырёх асферик для перспективных систем литографии в жёстком ультрафиолете. Все асферические элементы могут быть измерены на одной и той же установке. Промышленные требования к таким измерительным установкам следующие: стабильная реализация процесса измерений, интервал не превышает нескольких минут, среднеквадратичная ошибка менее 0,2 нм и минимальное поперечное разрешение не хуже 1000 пикселей на диаметр. Для ограничения стоимости изготовления ДОЭ частота штрихов должна быть менее 550 пар линий/мм, а максимальный диаметр дифракционного элемента не более 105 мм. Размеры четырёх асферик для жёсткого ультрафиолета приведены в табл. 1. Для моделирования асферической формы изначально использовалась сферическая аберрация, поскольку точная форма асферики не является важной на этапе исследования принципа измерения. Число измерений на различных длинах волн может быть рассчитано аналитически [19], если известно значение асферичности A , центральная длина волны λ и максимальное число полос N , допускаемое при одном измерении:

$$\text{Число измерений} = \frac{64A}{3\lambda N}. \quad (1)$$

Ширина зон уменьшается квадратично с возрастанием радиуса. Наименьшая зона может

Таблица 1

Параметры четырёх асферик для жёсткого ультрафиолета, которые должны быть измерены за один цикл

Номер асферики	Диаметр, мм	Радиус сферы, мм
1	200	400
2	460	-550
3	100	200
4	300	-260

быть рассчитана по известному числу пикселей P на апертуру:

$$\text{Минимальная ширина зон} = \frac{PN\lambda}{128A}. \quad (2)$$

Для измерения контролируемой асферики с асферичностью 20 мкм при $\lambda = 0,81$ мкм, $P = 2000$ и максимальном числе полос $N = 10$ требуется провести 53 измерения в процессе полного тестирования. Минимальная ширина зон при этом равна 6 пикселей. Для разработки схемы измерений всех асферик следует учесть следующие параметры: положение ДОЭ, расстояние между ДОЭ и асферикой, фокальное расстояние системы формирования изображений, разрешение ПЗС-камеры, радиус и частоту штрихов ДОЭ, а также числовую апертуру и диапазон перестройки лазерного источника по длине волны. Целью является нахождение схемы, в которой все параметры будут постоянными за исключением длины волны и расстояния между ДОЭ и асферикой. После того как измерение одной асферики закончено, следует выставить следующую асферику. При этом расстояние от каждой асферики до ДОЭ может изменяться в зависимости от геометрических ограничений и размера ДОЭ. Вогнутые асферики измеряются в -1 -м порядке дифракции. Для радиусов вогнутых асферик, больших радиуса ДОЭ, должно выдерживаться минимальное расстояние между ДОЭ и асферикой, так чтобы можно было осветить всю асферику. Если это расстояние будет большим, асферика не сможет быть измерена в пределах полного радиуса. Выпуклые асферики измеряются в $+1$ -м порядке дифракции. Для небольших выпуклых асферик должно быть выдержано соответствующее максимальное расстояние между ДОЭ и асферикой.

Зависимости измеряемых параметров и ограничения на них описываются сложными функциями. Чтобы найти область параметров, в которой возможно измерение всех четырёх асферик, разработана программа для демонстрации всех возможных комбинаций параметров. Следующим шагом была проверка выделенной области на наличие наборов параметров, которые дают наименьшие ошибки измерения. Как отмечалось ранее, желаемой комбинацией порядков дифракции для выпуклой асферики является $+1$ -й порядок как на пути к асферике, так и на обратном пути (эту комбинацию обозначим как $+1/+1$). К сожалению, и другие дифракционные порядки также дают вклад в интерферограмму (рис. 8). Сплошные линии отображают пример комбинации нежелательных порядков дифракции ($+3/-1$), которые не блокируются апертурой. Вследствие высоких требований к

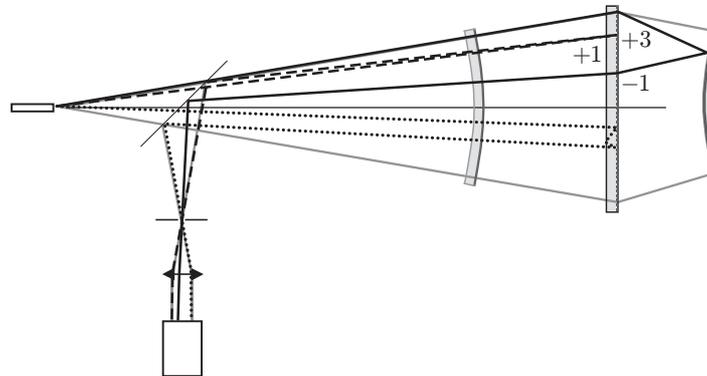


Рис. 8. Нежелательные пути световых лучей, которые вносят вклад в ошибку измерения. Дифракционные комбинации, подобные $(+3/-1)$ (сплошные линии), однократные отражения (штриховые) и двукратные отражения (точечные) интерферируют с измерительным сигналом, так как они не фильтруются апертурой

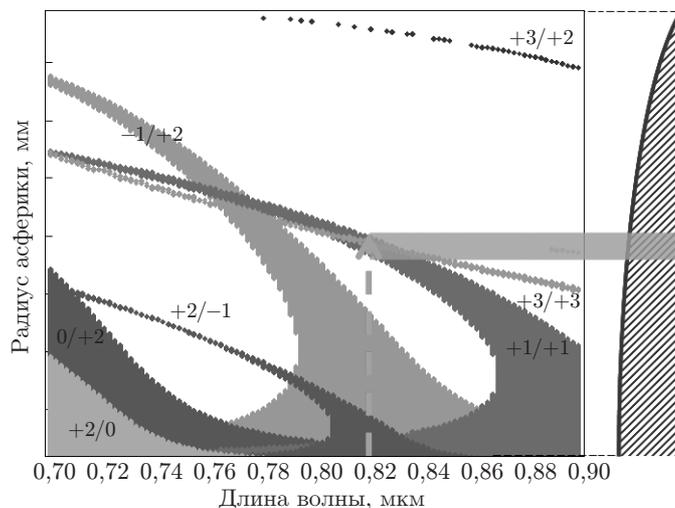


Рис. 9. Пример распределения желаемой комбинации порядков (+1/+1) и небольшая часть выборок нежелательных порядков вдоль радиуса асферики. Справа показан эскиз асферики. Измерение возмущается комбинацией дифракционных порядков (+3/+3), например на длине волны 0,82 мкм

точности измерений необходимо учитывать даже высокие дифракционные порядки. Распределение небольшой части выборок дифракционных порядков для асферики показано на рис. 9. В данном случае измерение возмущается комбинациями (+3/+3) и (-1/+2), которые отображены среди прочих комбинаций порядков. Другими нежелательными эффектами являются отражения на различных оптических поверхностях, порядки дифракции, отражённые от ДОЭ (штриховые линии), и комбинации из них (точечные линии) (см. рис. 8).

Для заданного набора параметров измерения требовалось рассчитать результирующие ошибки, вызванные нежелательными дифракционными порядками и отражениями. Блок-схема алгоритма расчёта ошибок измерения показана на рис. 10. Трассировка хода лучей осуществлена с помощью программы оптического проектирования ZEMAX [20]. Моделированию помогает радиальная симметрия асферики. Каждый луч рассчитывался

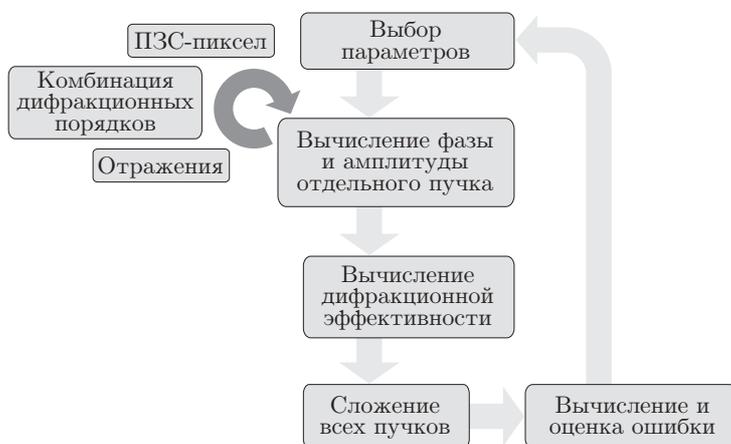


Рис. 10. Блок-схема для оптимизации параметров измерения по минимуму ошибки измерения

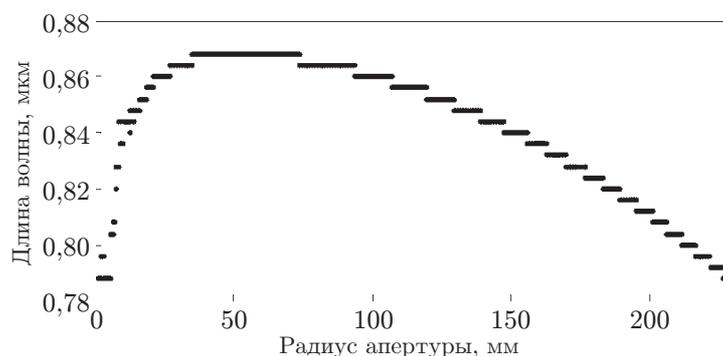


Рис. 11. Зависимость между длиной волны и радиальной зоной асферики

для каждого возможного порядка дифракции и для отражений. Нами были рассмотрены все порядки вплоть до 20-го. Определение ограничений, выбор параметров и анализ расчётных данных выполнены в системе MATLAB.

Следующий пример анализа результатов моделирования для асферики 2 является показательным и для трёх других асферик. Расстояние от лазера до ДОО в этой установке составляло 1100 мм. Расстояние между лазером и асферикой произвольное. Последующий анализ был проведён для расстояния 333 мм, поскольку здесь согласно моделированию ошибки измерения минимальные.

Анализ результатов моделирования для асферики 2. Зависимость между длиной волны и соответствующей частью асферики, которая может быть измерена, отображена на рис. 11. Использована только часть перестраиваемого по длине волны диапазона (740–870 нм). Моделирование проведено для расстояния между ДОО и асферикой 333 мм. Распределение нежелательных дифракционных порядков вдоль радиуса показано на рис. 12. Число ошибок измерения возрастает вблизи оптической оси. Результирующая ошибка измерений не является линейной функцией числа нежелательных порядков. Причина состоит в изменении интенсивности отдельных комбинаций порядков из-за различных дифракционных эффективностей порядков ДОО. Это видно из рис. 13. Расчётная ошибка измерений также возрастает вблизи оптической оси (рис. 14). Для данной схемы измерений наиболее существенной комбинацией дифракционных порядков является высший отрицательный порядок на пути к асферике и 0-й порядок дифракции на обратном пути. Такой вид ошибки измерений может быть устранён путём введения небольшой блокирующей апертуры на оптической оси. При этом эффективно ослабляется как число нежелательных порядков дифракции (рис. 15), так и результирующая ошибка измерений (рис. 16). Для данной

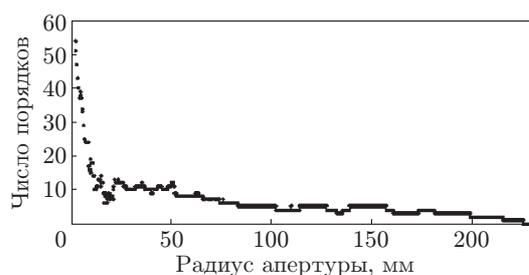


Рис. 12. Распределение нежелательных порядков дифракции вдоль радиуса асферики 2

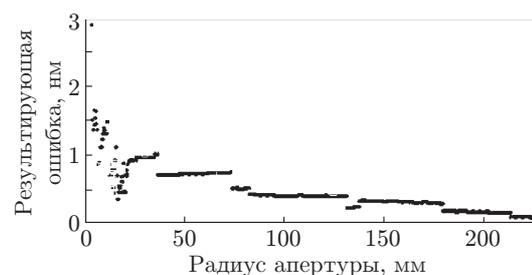


Рис. 13. Результирующая ошибка измерений для асферики 2

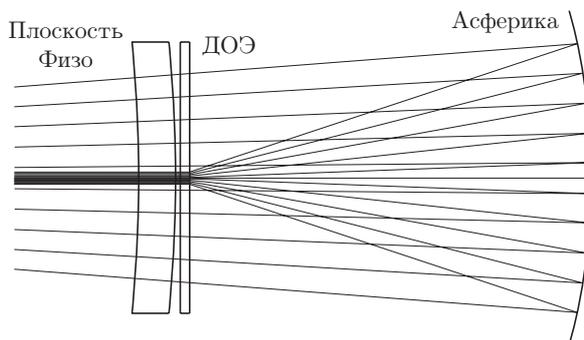


Рис. 14. Схема, объясняющая рост ошибки измерений вблизи оптической оси

конфигурации ошибки являются достаточно малыми и вполне удовлетворяют указанным ранее требованиям.

Конфигурации измерений для всех четырёх асферик. По аналогии с подходом для асферики 2 можно определить параметры измерений для других трёх асферик. Конфигурации всех асферик показаны на рис. 17. Здесь приведены случаи измерения асферик с наименьшими и наибольшими длинами волн. Как было указано выше, ширина зон, которые могут быть измерены, уменьшается с ростом радиуса. Поэтому наименьшая зона расположена на максимальном радиусе. Для перехода к следующей асферике не требуется вносить изменения в схему, необходимо лишь выбрать другое расстояние между ДОЭ и асферикой. Это является преимуществом схемы, поскольку нет необходимости осуществлять калибровку интерферометра для каждой новой асферики. Важно отметить, что особые трудности возникают при измерении асферики 1. Величина диаметра допускает лишь небольшую вариацию положения асферики при минимизации ошибок измерений.

Имеются и другие возможные пути для ослабления влияния нежелательных порядков дифракции. Использование ДОЭ большего размера увеличивает свободу для позиционирования асферики. Устранение возмущений расчётным путём является сложной задачей (но в принципе разрешимой), так как их положение, интенсивность и фаза могут быть рассчитаны. Перспективным для такой коррекции представляется итеративный алгоритм. Используя различные положения ДОЭ либо асферики при одном измерении, можно ослабить влияние измерений дифракционных порядков на ошибку, однако это приводит к потере преимущества, связанного с отсутствием движущихся деталей.

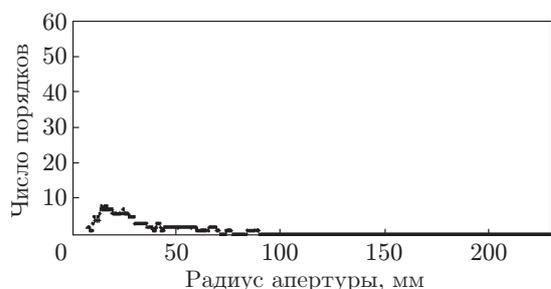


Рис. 15. Уменьшение числа действующих паразитных дифракционных комбинаций вследствие использования небольшой блокирующей апертуры на оптической оси (радиусом 3 мм)

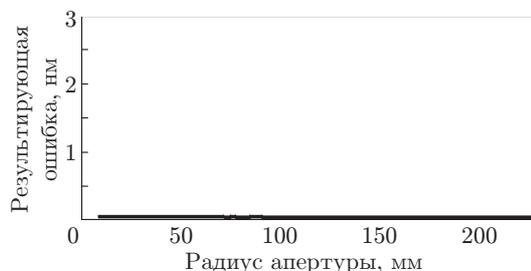


Рис. 16. Результирующая ошибка измерений при введении блокирующей апертуры на оптической оси

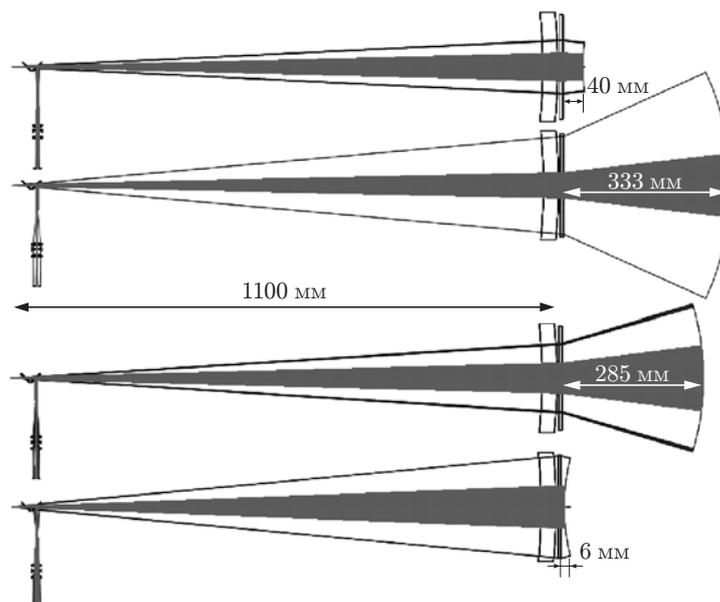


Рис. 17. Результирующие конфигурации измерений для четырёх асферик

Таблица 2

Параметры и результаты измерений четырёх асферик в жёстком ультрафиолете

Номер асферики	Расстояние между ДОЭ и асферикой, мм	Радиус изображения, мм	Поперечное разрешение (апертурный диаметр $d = 3,5$ мм), мм/пиксел	Диапазон по длине волны, нм	Неоцениваемый центральный радиус, мм
1	25,0	7,1	0,29	744–770	3
2	333,0	7,0	0,70	788–880	3
3	40,0	3,8	0,28	774–733	4
4	282,5	5,0	0,64	754–782	10

Все асферики требуют небольшой блокирующей апертуры на оптической оси. Это сопоставимо с особенностями монохроматического интерферометра Физо, в котором величины измерений вблизи оптической оси являются неточными из-за отражений. В табл. 2 приведены величины поперечного разрешения асферики при использовании 4-мегапиксельной камеры, требуемый диапазон длин волн и величина (неоцениваемого) центрального радиуса.

Заключение. В данной работе представлены два новых метода контроля поверхностей средствами оптической метрологии. В первом из них предложен новый интерферометр для характеристики крутых асферических волновых фронтов, порождаемых оптическими поверхностями. Благодаря параллелизму, связанному с использованием множества источников, измерение поверхности в пределах полного поля может быть осуществлено предельно быстро в сравнении с другими методами. Конфигурация интерферометра спроектирована так, чтобы можно было тестировать элементы с девиацией прогиба до 1000 мкм и девиацией наклона до $\pm 10^\circ$ при потенциальной точности с пиковым значением

$\lambda/30$. Текущая точность системы ограничена величиной $0,13\lambda$ и обусловлена механической стабильностью первой демонстрационной установки. Хроматический интерферометр Физо (второй метод) основан на хорошо известной монохроматической схеме. Накопленный опыт по конструированию и работе стандартной измерительной системы может быть непосредственно применён к предложенному новому типу измерительной системы во многих аспектах. Хроматический вариант является при этом существенно более гибким. В [4, 19] продемонстрировано, что измерение различных асферик, по меньшей мере четырёх, удаётся проводить с помощью одной схемы.

Авторы выражают благодарность промышленным партнёрам — фирмам "Jenoptik L.O.S." и "Zeiss/SMT" (Германия) — за контроль асферик указанными методами с повышенной гибкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Garbusi E., Pruss C., Liesener J., Osten W.** New technique for flexible and rapid measurement of precision aspheres // Proc. SPIE. 2007. **6616**. 661629-1–661629-11.
2. **Pruss C., Garbusi E., Osten W.** Testing aspheres // Opt. and Photon. News. 2008. **19**, Is. 4. P. 24–29.
3. **Garbusi E., Pruss C., Osten W.** Novel interferometer for precise and flexible asphere testing // Opt. Lett. 2009. **33**, Is. 24. P. 2973–2975.
4. **Seifert L., Pruss C., Dörband B., Osten W.** Measuring aspheres with a chromatic Fizeau interferometer // Proc. SPIE. 2009. **7389**. 738919-1–738919-9.
5. **Wyant J. C., O'Neill P. K.** Computer generated holograms: null lens test of aspheric wavefronts // Appl. Opt. 1974. **13**, Is. 12. P. 2762–2765.
6. **Pruss C., Reichelt S., Tiziani H. J., Osten W.** Computer-generated holograms in interferometric testing // Opt. Eng. 2004. **43**, N 11. P. 2534–2540.
7. **Полецук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. и др.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2002. **38**, № 3. С. 3–19.
8. **Murphy P., Fleig J., Forbes G. et al.** Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres // Proc. SPIE. 2006. **6293**. 62930J.
9. **Küchel M. F.** Absolute measurement of rotationally symmetrical aspheric surfaces // OSA Topical Meeting "Optical Fabrication and Testing". Rochester, USA, 2006.
10. **Greivenkamp J. E.** Sub-Nyquist interferometry // Appl. Opt. 1987. **26**, Is. 24. P. 5245–5258.
11. **Greivenkamp J. E., Gappinger R. O.** Design of a non-null interferometer for aspheric wavefronts // Appl. Opt. 2004. **43**, Is. 27. P. 5143–5151.
12. **Liu Y.-M., Lawrence G. N., Koliopoulos C. L.** Subaperture testing of aspheres with annular zones // Appl. Opt. 1988. **27**, Is. 21. P. 4504–4513.
13. **Melozzi M., Pezzati L., Mazzoni A.** Testing aspheric surfaces using multiple annular interferograms // Opt. Eng. 1993. **32**, N 5. P. 1073–1079.
14. **Liesener J., Tiziani H. J.** Interferometer with dynamic reference // Proc. SPIE. 2004. **5252**. P. 264–271.
15. **Pat. 10 2006 057 606 DE.** Verfahren und Messvorrichtung zur Vermessung einer optisch glatten Oberfläche /J. Liesener, E. Garbusi, C. Pruss, W. Osten. Priority: 2006.11.24.

16. **Gappinger R. O., Greivenkamp J. E.** Iterative reverse optimization procedure for calibration of aspheric wave-front measurements on a nonnull interferometer // Appl. Opt. 2004. **43**, Is. 27. P. 5152–5161.
17. **Liesener J.** Zum Einsatz räumlicher Lichtmodulatoren in der interferometrischen Wellenfrontmesstechnik. PhD-Thesis. Univ. Stuttgart. Stuttgart: ITO, 2007. 112 S.
18. **Sirah** Matisse Titan Sapphire Laser. URL: <http://www.sirah.com/>
19. **Seifert L.** Flexible Verfahren zur Vermessung asphärischer Flächen. PhD-Thesis. Univ. Stuttgart. Stuttgart: ITO, 2009. 151 S.
20. **Optical Design Program ZEMAX.** URL: <http://www.zemax.com/>

Поступила в редакцию 18 февраля 2010 г.
