

ГИБРИДНАЯ РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННАЯ НУЛЕВАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВЕТОСИЛЬНЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А. Г. Полещук, Е.Г. Чурин, В.П. Корольков
(Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск)
poleshchuk.a.g@iae.nsk.su
Жан-Мишель Асфор
(DIOPTIC GmbH, Offenbach, Germany)
asfour@dioptric.de

Аннотация

Разработан и исследован гибридный рефракционно-дифракционный корректор волнового фронта (нулевая система) для высокоточного контроля светосильных ($f/1.5$) асферических поверхностей с помощью интерферометра Физо. Предложен и проверен простой новый метод для юстировки всех оптических компонентов оптической системы. Представлены экспериментальные результаты исследования оптической системы и проверки формы поверхности асферического зеркала.

1. Введение

Для контроля качества асферических поверхностей разработано много различных методов контроля. В последние годы наибольшее распространение получил компенсационный метод контроля асферики. В этом методе, особенно удобном для контроля в процессе изготовления оптических деталей, применяется вспомогательная оптическая система, рассчитываемая так, что совместно с контролируемой асферикой формирует стигматическое изображение точечного источника [1]. Такие оптические системы получили название нулевых линз, корректоров или компенсаторов. Для асферических зеркал с большой апертурой и светосилой требуются большие диаметры и толщина компенсирующих линз, в которых даже очень маленькие ошибки ($\sim 10^{-7}$) показатели преломления стекла приводят к появлению значительной погрешности измерения [2]. Решить эту проблему можно, заменив рефракционные линзы на дифракционные элементы или синтезированные голограммы [3], которые изготавливаются, как правило, на поверхности достаточно тонких плоских оптических пластин.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются как альтернатива обычным рефракционным или отражающим нулевым системам [4]. Однако при аттестации высокоапертурной асферической оптики ($f/3$ - $f/0.7$), дифракционные однокомпонентные компенсаторы имеют малые размеры дифракционных зон и ошибки изготовления уменьшают точность измерения. Использование комбинации рефракционных и дифракционных элементов позволяет улучшить свойства нулевой системы. Качество интерференционной картины зависит от точности юстировки дифракционного и рефракционного элементов друг относительно друга. Обычные классические методы юстировки не позволяют получить требуемую точность и эти ошибки могут стать главным ограничением для применения таких гибридных систем [5].

В настоящей работе представлены результаты разработки и исследования гибридной нулевой системы

состоящей из сферической плоско - выпуклой линзы и ДОЭ, которые используются совместно с обычным интерферометром Физо для проверки асферических поверхностей. Описаны простые и эффективные методы юстировки линзы относительно ДОЭ и всей гибридной системы относительно асферической поверхности. Экспериментальные результаты демонстрируют высокую точность настройки изготовленной нулевой системы.

2. Конструкция нулевой системы

Гибридная нулевая система (компенсатор) состоит из двух элементов (рис.1): плоско - выпуклой сферической линзы и плоскопараллельной оптической подложки с несколькими аксиально-симметричными ДОЭ. В центральной части располагается главный ДОЭ, а по бокам (четыре сектора) располагаются вспомогательные ДОЭ, которые служат для взаимной юстировки гибридной системы и контролируемой асферической поверхности.

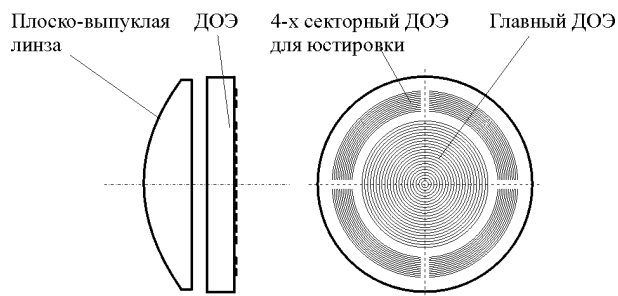


Рис. 1. Конструкция гибридной нулевой системы

Параллельный пучок когерентного света с амплитудой A_0 из интерферометра Физо проходит эталонную пластину (при этом часть света с амплитудой A_1 отражается назад) и преломляется на сферической поверхности линзы, как показано на рис.2. В 1-м и 3-м секторах расположены вспомогательные отражательные ДОЭ, рассчитанные таким образом, что дифрагированный световой поток с амплитудой A_3 возвращается точно назад и интерферирует с волной A_1 (Рис.2а). Во 2-м и 4-м секторах располо-

жены вспомогательные ДОЭ, рассчитанные таким образом, что дифрагированный световой поток с амплитудой A_4 фокусируется в центр кривизны асферической поверхности, отражается, и возвращается точно назад интерферируя с волной A_1 (Рис.2в).

Расположенный в центре пластины главный ДОЭ совместно с линзой преобразует плоский входной волновой фронт в асферический, форма которого совпадает с теоретической формой контролируемой поверхности. При этом все лучи, выходящие из компенсирующей системы, направлены по нормальям к асферической поверхности. Если поверхность идеальна, то отраженные лучи после обратного прохождения через дифракционный элемент и линзу вновь образуют плоскую волну, которая интерферирует с плоской волной сравнения. Отступление поверхности от идеальной формы измеряется по искривлению интерференционных полос.

Оптическая система с положительной линзой имеет действительный фокус (точка F на рис.2в). Это несколько увеличивает габаритную длину системы, однако, значительно облегчает ее настройку. Радиус линзы и расстояние до асферической по-

верхности выбираются из соображения обеспечения достаточно приемлемых параметров главного ДОЭ (внешний диаметр около 20 мм и размер дифракционных зон >17 мкм). Функция оптической длины пути $L(r)$, где r это расстояние от центра ДОЭ была рассчитана численно для 100 лучей и затем интерполирована как полином с коэффициентами b_K :

$$L(r) = \sum_{K=1}^N b_K r^{2K} .$$

Максимальная степень $2N$ была выбрана для обеспечения точности расчета оптического пути (погрешность менее 0.001 мкм). Границы r_j круговых дифракционных зон бинарного ДОЭ рассчитывались итеративным методом Ньютона из выражения:

$$L(r_j) = jm\lambda / 2 ,$$

где λ – длина волны, m номер порядка дифракции. Вспомогательные ДОЭ, которые были предназначены для взаимной юстировки оптических компонентов, рассчитывались аналогично.

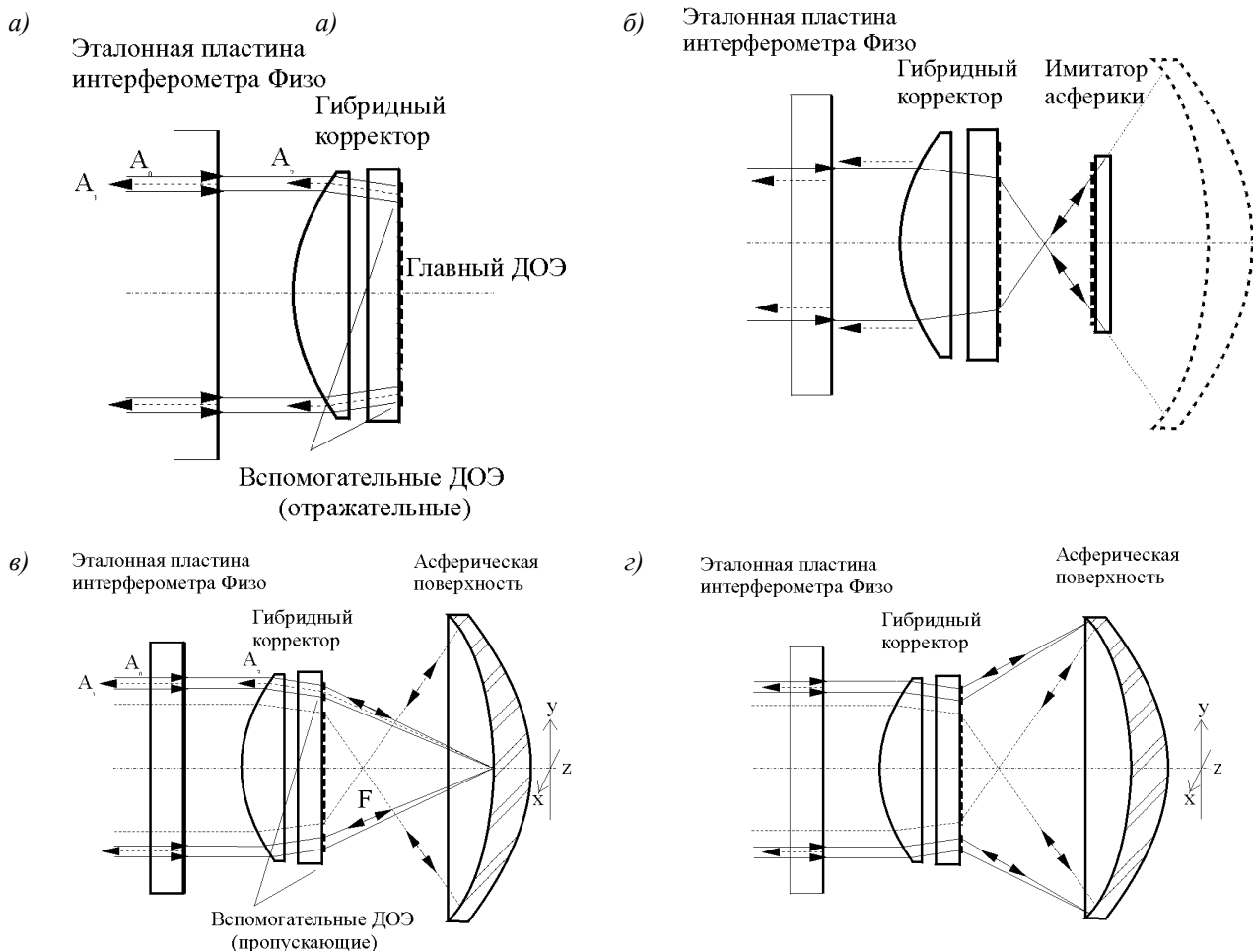


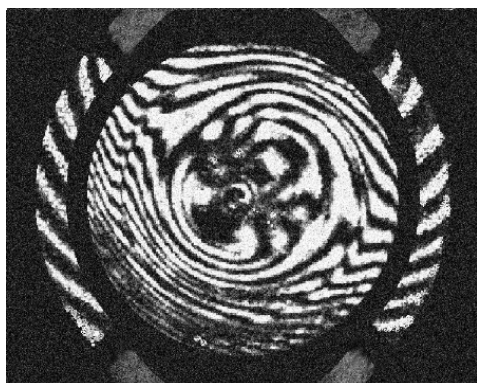
Рис.2. Основные этапы юстировки оптической измерительной системы для контроля асферической поверхности: настройка гибридной нулевой системы (а), сертификация нулевой системы (б), юстировка асферической поверхности и нулевой системы (в,г).

3. Метод юстировки

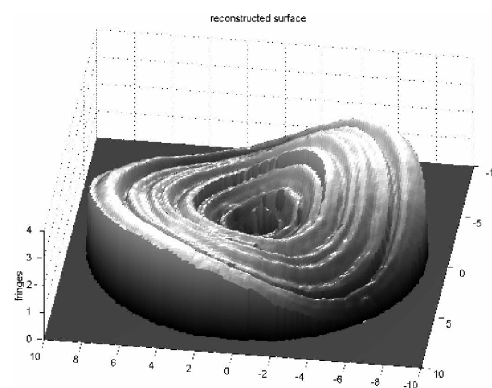
Метод основывается на концепции, согласно которой, несколько дифракционных компонентов (см. Рис.1б) могут быть изготовлены на одной и той же оптической пластине в течении одного технологического цикла. Следовательно, их относительное положение выдерживается с высокой точностью (типичное значение 0.1 мкм). Поэтому, если один из дифракционных компонентов будет отъюстирован, остальные компоненты будут отъюстированы тоже. Для аксиально-симметричных оптических систем, главный дифракционный компонент располагается в центре. Вспомогательные ДОО располагаются вне его апертуры и имеют форму тонких колец или секторов [5].

Основные этапы юстировки оптической измерительной системы для контроля светосильной асферической поверхности показаны на рис. 2.

Этап 1. Юстировка дифракционного и рефракционного компонентов гибридной нулевой системы



а)



б)

Рис.3. Интерферограмма (а) и фазовая карта (б) исследуемой асферической поверхности полученные с помощью гибридной нулевой системы и интерферометра Физо (Zygo).

На интерферограмме (а) хорошо видны два боковых сектора используемые для взаимной юстировки компонентов нулевой системы

Этап 3. Взаимная юстировка исследуемой асферической поверхности и нулевой системы. На рис. 2 в, г приведены два варианта этой процедуры. Второй вспомогательный ДОО, изготовленный во втором и четвертом секторах, фокусирует световой поток на поверхность асферики. В первом варианте, вспомогательный ДОО рассчитывается таким образом, что фокусировка осуществляется в центр кривизны асферики (рис.2в). В другом варианте (рис.2.г) свет фокусируется не в пятно, а в кольцо, которое располагается на периферии асферики. Отраженный от исследуемого зеркала свет поступает обратно через гибридную систему к интерферометру, где форма и число полос в соответствующих секторах показывают точность юстировки. Первая версия (рис.2в) позволяет достаточно точно установить расстояние "нулевая система - асферическая поверхность", в то время как вторая (рис.2.г), позво-

ляет правильно установить асферическую поверхность в пространстве.

4. Экспериментальные результаты

Для экспериментальной апробации предложенных методов юстировки, были изготовлены гибридная нулевая система и дифракционный имитатор для проверки $f/1.5$ асферического зеркала с параксиальным радиусом кривизны около 95 мм. Все оптические поверхности нулевой системы были изготовлены с точностью $\lambda/20$ (P-V). Гибридная система состояла из плоско - выпуклой линзы с диаметром $d=36$ мм и пяти ДОО, расположенных на пластине из плавленого кварца. Дифракционный имитатор асферики имел диаметр 10мм и был рассчитан для работы в 3-м порядке дифракции. Минимальная ширина кольцевых зон составляла 0.6 мкм.

Процесс изготовления основного ДОЭ состоял из прямой лазерной записи на фоторезисте [7], проявления фоторезиста и реактивного ионного травления подложки из плавленного кварца. Вспомогательные ДОЭ и ДОЭ - имитатор были изготовлены по лазерной термохимической технологии на 100нм пленке хрома, нанесенной на ту же подложку. Центральный ДОЭ имел дифракционную эффективность около 38%, вспомогательные ДОЭ – около 10%, ДОЭ – имитатор – около 2.5%. Точность (rms) выполнения всех структур на пластине была не хуже 0.1 мкм. Процесс записи подобных структур детально изложен в ряде работ [7,8].

После изготовления гибридная система была установлена в измерительное плечо интерферометра Физо ("ZYGO"). На рис.3а показана типичная интерферограмма полученная в процессе настройки и юстировки оптической системы. Интерферограммы в двух боковых секторах имеют хороший контраст и показывают небольшую взаимную разюстировку плоско-выпуклой линзы и ДОЭ. Контраст интерферограмм в двух других секторах оказался очень маленьким из-за низкой дифракционной эффективности амплитудных ДОЭ.

Интерференционные картины асферического зеркала были записаны для двух ортогональных положений нулевой системы относительно зеркала. Проверка зеркала при его различных положениях (вращение) относительно нулевой системы позволяет устранить систематические ошибки (они не превышали $\lambda/10$) и реконструировать более реалистичскую карту ошибок асферической поверхности [2]. На рис. 3б приведен пример карты ошибок волнового фронта $f/1.5$ асферического зеркала, полученной с помощью изготовленной гибридной нулевой системы.

5. Выводы

Разработана и исследована гибридная нулевая система для интерферометрической проверки асферических поверхностей. Разработанная методика

юстировки позволяет наглядно и быстро настраивать высокоточные гибридные системы. Экспериментальные результаты продемонстрировали справедливость предложенной концепции.

Авторы выражают благодарность В.П. Коронкевичу за полезное обсуждение и А.И. Малышеву за фотолитографию и ионное травление. Авторы также благодарят Хартмута Шафера за помощь в проведении интерферометрических измерений.

Литература

1. Д. Малакара. Оптический производственный контроль. Москва, машиностроение, 1985.
2. H.M. Martin, R.G. Allen, J. R. Angel, J.H. Burge etc. Fabrication and measured quality of the MMT primary mirror//Proc. SPIE , P.193-203.
3. А.В. Лукин, К.С. Мустафин. Голографические методы проверки асферических поверхностей// Опико-механическая промышленность. 1979, **46**, №46 С.237-244.
4. S. M. Arnold, R. Kestner. "Verification and certification of CGH aspheric nulls" in Optical Manufacturing and Testing, ed. By Victor J. Doherty; H. Philip Stahl// Proc. SPIE, 1995, **2536**, P. 117-126.
5. A.G. Poleshchuk. Alignment of diffraction and refraction components in optical systems// Avtometria (Optoelectronics, Instrumentations and Data Processing), 1985, N6, P. 27-31.
6. J.H. Burge. "Certification of null correctors for primary mirrors," in Advanced Optical Manufacturing and Testing IV, Ed. by Victor J. Doherty// Proc. SPIE, 1993, **1994**, P. 248-259.
7. A.G. Poleshchuk, E.G. Churin, V.P. Koronkevich, V.P. Korolkov, etc. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure// Appl. Opt., 1999, **38**, P.1295-1301.
8. В.П. Коронкевич, В.П. Корольков, А.Г. Полещук. Лазерные технологии в дифракционной оптике // Автometрия, 1998, N 6, с.5-26.