

07; 12

Интерферометрический контроль пропускающих и отражательных оптических элементов

© А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,
230023 Гродно, Белоруссия
e-mail: amlialikov@grsu.by

(Поступило в Редакцию 27 августа 2008 г.)

Рассмотрен простой в реализации метод интерферометрического контроля, позволяющий в производственных условиях контролировать качество оптических элементов как пропускающего, так и отражательного типа. Предложено универсальное устройство для контроля. Приведены результаты экспериментальной проверки метода интерферометрического контроля, подтверждающие перспективность применения его в производственных условиях.

PACS: 42.40.Kw.

Введение

Интерференционные методы относятся к числу наиболее чувствительных оптических способов измерения и контроля различных параметров фазовых объектов. К ним относятся пропускающие и отражательные объекты, изменяющие только фазу световой волны. Наиболее перспективно применение интерферометрии при контроле качества различных оптических элементов в производственных условиях [1–5]. В первую очередь это касается высокоточного контроля оптических эталонных мер и оптических элементов для изготовления интерферометров, предназначенных для высокоточных измерений.

Намеченная тенденция к повышению качества такого рода оптических элементов одновременно требует усовершенствования и методов их контроля. Для производственных условий требуются методы контроля оптических элементов как пропускающего, так и отражательного типа. Однако в производственных условиях на оптические интерференционные устройства реализации контроля накладываются особые требования, которые отличаются от требований к контролю в лабораторных условиях [2]. Основное требование к оптическим интерференционным устройствам реализации контроля в производственных условиях — простота в обращении и пониженная чувствительность к вибрациям.

При контроле оптических элементов как пропускающего, так и отражательного типа с отличным от плоского профилем поверхности требуется наличие вспомогательной оптической системы, рассчитанной таким образом, чтобы совместно с контролируемым оптическим элементом формировалось стигматическое изображение точечного источника, или — наличие эталонного объекта [2,6]. Во втором случае устройства интерферометрического контроля наиболее просты в реализации.

В настоящей работе рассмотрен метод интерферометрического контроля оптических элементов, позволяющий в производственных условиях осуществлять

контроль качества оптических элементов как пропускающего, так и отражательного типа. За основу контроля выбран интерферометрический способ сравнительного анализа волновых фронтов, сформированных эталонным и контролируемым оптическими элементами в процессе освещения их световым пучком [7].

Устройство интерферометрического контроля

Для обеспечения возможности интерферометрического сравнения волновых фронтов, сформированных эталонным и контролируемым оптическими элементами, в качестве интерферометра выбран сдвиговой интерферометр, позволяющий осуществить большой боковой сдвиг, превышающий половину диаметра светового пучка. Такого рода интерферометры большого бокового сдвига в сочетании с голографической регистрацией уже нашли перспективное применение для высокоточного контроля качества лазерных кристаллов [8,9]. Эти варианты интерферометрического контроля качества оптических элементов сложны вследствие их двухэтапной реализации. Несмотря на высокую чувствительность их нельзя широко рекомендовать для промышленного контроля.

При создании интерферометрического устройства контроля для снижения его чувствительности к вибрациям оптическая схема строилась на интерферометре бокового сдвига. Целесообразность использования интерферометра большого бокового сдвига выбрана по нескольким причинам. В первую очередь — это особенности малой чувствительности интерферометра бокового сдвига к вибрациям элементов оптики [2] и возможность размещения объектов вне интерферометра. Во вторую очередь — возможность размещения эталонного и контролируемого элементов на минимальном расстоянии в объектной ветви общего светового пучка, что дополнительно способствовало уменьшению чув-

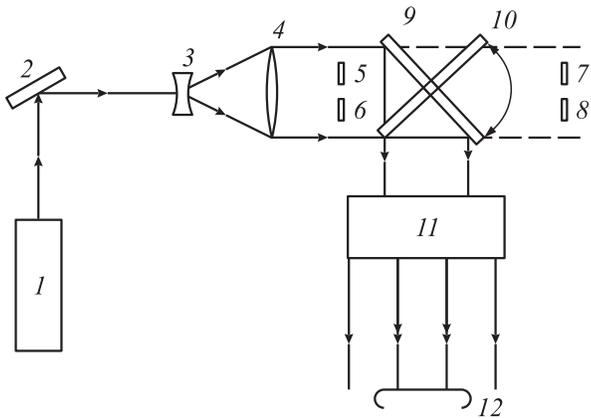


Рис. 1. Оптическая схема универсального устройства интерферометрического контроля: 1 — лазерный источник света; 2 — зеркало; 3, 4 — телескопическая система; 5, 6 — положения эталонного и контролируемого элементов пропускающего типа; 7, 8 — положения эталонного и контролируемого элементов отражательного типа; 9, 10 — положение полупрозрачного зеркала в режимах контроля оптических элементов пропускающего и отражательного типов соответственно; 11 — интерферометр бокового сдвига; 12 — плоскость интерференционной картины.

ствительности интерферометрического устройства контроля к вибрациям и позволяло использовать его в производственных условиях.

Оптическая схема предложенного устройства интерферометрического контроля (рис. 1) включает три основных элемента: осветительную систему формирования коллимированного зондирующего светового пучка, ветвь зондирующего светового пучка с эталонным и контролируемым оптическими элементами, содержащую дополнительно полупрозрачное зеркало, и интерферометр большого бокового сдвига. Применение интерферометра бокового сдвига, а также развязка его и ветви зондирующего светового пучка обеспечивает низкую чувствительность устройства к вибрациям, что очень важно при контроле оптических элементов в производственных условиях.

Коллимированный зондирующий световой пучок формируется посредством лазерного источника света 1, зеркала 2 и телескопической системы 3, 4. Вследствие того что эталонный и контролируемый оптические элементы как пропускающего, так и отражательного типа 5, 6 или 7, 8 соответственно, размещены в различных частях волнового фронта зондирующего пучка, то для получения высококачественных интерференционных картин излучение источника света 1 должно иметь высокую степень пространственной когерентности. Наиболее перспективными источниками света в этом случае служат газовые лазеры, например гелий-неоновые. При экспериментальном опробовании предложенного устройства интерферометрического контроля был использован гелий-неоновый лазер ЛГН-212, излучающий на длине волны 633 nm.

Ветвь зондирующего светового пучка посредством разворота полупрозрачного зеркала перестраивается как для контроля оптических элементов пропускающего (положение 9) типа, так и отражательного (положение 10). В первом случае зондирующий световой пучок после прохождения эталонного и контролируемого элементов 5, 6 полупрозрачным зеркалом 9 направляется в интерферометр 11, в котором реализуется большой боковой сдвиг, превышающий линейные размеры оптических элементов.

При экспериментальной апробации в качестве интерферометра большого бокового сдвига был использован малогабаритный четырехзеркальный интерферометр [8,9]. При контроле оптических элементов отражательного типа зондирующий световой пучок проходит полупрозрачное зеркало, отражается от эталонного и контролируемого элементов 7, 8, далее полупрозрачным зеркалом 10 направляется в интерферометр 11.

В интерферометре бокового сдвига зондирующий световой пучок разделяется по амплитуде на два одинаковых пучка, которые смещаются друг относительно друга в пространстве на величину бокового сдвига s , обеспечивающего в плоскости наблюдения интерференционной картины 12 совмещения изображений эталонного и контролируемого оптических элементов.

Описание методики контроля

При реализации метода контроля эталонный M и контролируемый C оптические элементы 5, 6 или 7, 8 (рис. 1) соответственно пропускающего или отражательного типа размещаются в разных половинах зондирующего светового пучка, как это показано на рис. 2, а. Выберем систему координат xuz таким образом, что плоскость xu совпадает с эталонным M и контролируемым C оптическими элементами, а ось z — с направлением распространения зондирующего светового пучка, как это изображено на рис. 2. Также предположим, что оптической системой формируется объектная волна с плоским волновым фронтом. В этом случае aberrациями оптической системы контроля можно пренебречь. Если данное условие невыполнимо, то систематическую составляющую погрешности, возникающую из-за aberrаций волнового фронта, для обеспечения достоверности контроля необходимо учитывать.

Если эталонный M и контролируемый C оптические элементы размещены в разных половинах зондирующего светового пучка, обозначенных зонами „1“ для левой половины и „2“ — для правой, как это изображено на рис. 2, то наиболее удобным является представление фазы $\varepsilon(x, y)$ деформированной плоской световой волны, прошедшей для случая пропускающих оптических элементов или отраженной — для отражательных элементов, в виде

$$\varepsilon(x, y) = \begin{cases} \varepsilon_m(x, y) & \text{для зоны 1,} \\ \varepsilon_c(x, y) & \text{для зоны 2,} \end{cases} \quad (1)$$

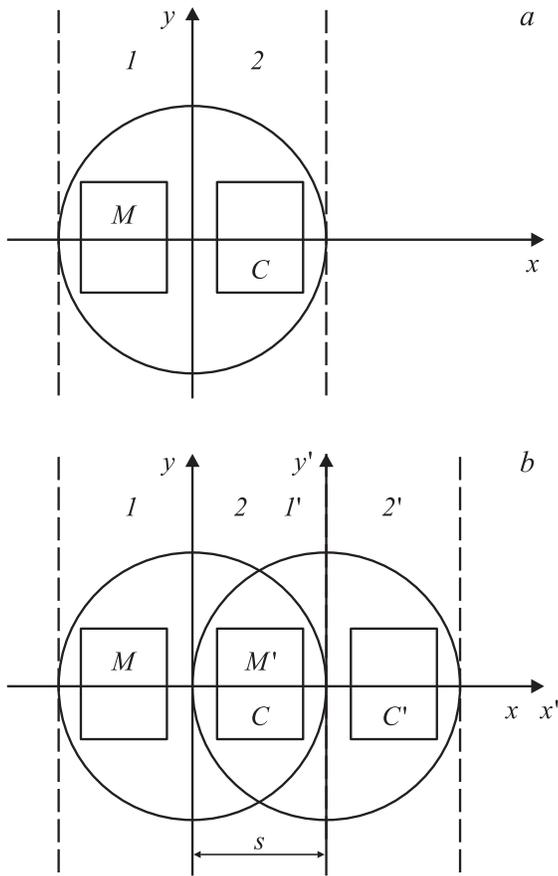


Рис. 2. Схематическое изображение светового пучка (круг), а также контуров контролируемого C и эталонного M оптических элементов (прямоугольники) после их прохождения световым пучком (а) и в плоскости образования интерференционной картины (б) при наложении первого и второго световых пучков, сдвинутых в пространстве.

где $\varepsilon_m(x, y)$ и $\varepsilon_c(x, y)$ — изменения фазы объектной волны вследствие взаимодействия с эталонным и контролируемым оптическими элементами.

Очевидно, что критерием оценки отклонения контролируемого C оптического элемента от эталонного M может быть модуль величины $|\varepsilon_m(x, y) - \varepsilon_c(x, y)|$. В процессе контроля эта величина сравнивается с допуском и определяет соответствие контролируемых оптических элементов норме [2].

Для отображения разности $|\varepsilon_m(x, y) - \varepsilon_c(x, y)|$ в виде интерференционной картины объектная волна посредством полупрозрачного зеркала (рис. 1) направляется в интерферометр бокового сдвига. В зависимости от типа контролируемого оптического элемента устройство интерферометрического контроля перенастраивается. Положение полупрозрачного зеркала 9 соответствует контролю прозрачных элементов, а положение 10 — отражательных элементов. Перенастройка устройства сводится к развороту зеркала из положения 9 в положение 10 или наоборот.

В интерферометре 11 объектная волна разделяется по амплитуде на две взаимно когерентные волны, одна, например вторая, сдвигается в пространстве относительно первой вдоль оси x на величину s (рис. 2, б). Для простоты описания методики предположим, что первый световой пучок распространяется без изменения направления. В этом случае для первого светового пучка систему координат xu и обозначение контуров оптических элементов оставим прежними, как и на рис. 2, а. Для второго пучка введем систему координат $x'y'$ и обозначим контуры эталонного и контролируемого оптических элементов соответственно M' и C' .

Комплексные амплитуды световых волн, сформированных в интерферометре, можно представить в системах координат xu и $x'y'$ как

$$A(x, y) \sim \begin{cases} 1 + \exp \{i[\varepsilon_m(x, y)]\} & \text{для зоны } I, \\ 1 + \exp \{i[\varepsilon_c(x, y)]\} & \text{для зоны } 2, \end{cases} \quad (2)$$

$$A'(x', y') \sim \begin{cases} 1 + \exp \left\{ i \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x' \cos \alpha + y' \cos \beta) + \varepsilon_m(x', y') \right] \right\} & \text{для зоны } I', \\ 1 + \exp \left\{ i \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x' \cos \alpha + y' \cos \beta) + \varepsilon_c(x', y') \right] \right\} & \text{для зоны } 2', \end{cases} \quad (3)$$

где λ — длина волны источника света I (рис. 1), α и β — углы между направлением распространения второго светового пучка и осями x' и y' соответственно.

Амплитудное пропускание второй световой волны в системе координат xu можно преобразовать к виду

$$A'(x, y) \sim \begin{cases} 1 + \exp \left\{ i \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x \cos \alpha + y \cos \beta) + \varepsilon_m(x - s, y) \right] \right\} & \text{для зоны } I', \\ 1 + \exp \left\{ i \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x \cos \alpha + y \cos \beta) + \varepsilon_c(x - s, y) \right] \right\} & \text{для зоны } 2'. \end{cases} \quad (4)$$

При реализации контроля величина бокового сдвига s выбирается равной расстоянию между центрами эталонного M и контролируемого C оптических элементов (рис. 2, а). Другими словами, сдвиг s должен быть таким, чтобы в плоскости наблюдения 12 интерференционной картины происходило точное совмещение изображений контролируемого C элемента, сформированного первым пучком света, и эталонного M' элемента, сформированного вторым пучком (рис. 2, б). Таким образом, в плоскости 12 (рис. 1) происходит наложение двух световых

пучков (2) и (4) с образованием интерференционной картины в совмещенных зонах 2 для первого и I' для второго световых пучков (рис. 2, *b*).

Для повышения качества интерференционной картины желательно использовать оптическую систему сопряжения (на рис. 1 данная система не показана) плоскости интерференционной картины $I2$ (рис. 1) с плоскостями расположения эталонного M и контролируемого C оптических элементов. Распределение интенсивности света $I(x, y)$ в интерференционной картине в плоскости $I2$ (рис. 1) определится как

$$I(x, y) = [A(x, y) + A'(x, y)] [A^*(x, y) + A'^*(x, y)]. \quad (5)$$

С учетом образования интерференционной картины только в совмещенных зонах 2 и I' , согласно (2), (4) и (5), получим выражение, описывающее распределение интенсивности в интерференционной картине

$$I(x, y) \sim 1 + \cos[2\pi(\xi x + \eta y) + \delta\varepsilon], \quad (6)$$

где $\xi = \cos \alpha / \lambda$ и $\eta = \cos \beta / \lambda$ — параметры, характеризующие ширину и ориентацию полос интерференционной картины, определяемые, согласно (4), направлением распространения второго светового пучка, $\delta\varepsilon = |\varepsilon_m(x, y) - \varepsilon_c(x, y)|$. Данная (6) интерференционная картина характеризует отличия контролируемого оптического элемента от эталонного, которые определяются распределением фазы $\delta\varepsilon$.

Для повышения достоверности контроля желательно получить несколько интерференционных картин с различной настройкой полос, определяемой параметрами ξ и η . Случай получения интерференционной картины в полосах бесконечной ширины соответствует значениям $\xi = 0$ и $\eta = 0$. Для получения настройки интерференционных полос строго горизонтально необходимо выполнить условие $\xi = 0$, а строго вертикально — $\eta = 0$. Ширина полос для двух последних частных случаев будет определяться соответственно параметрами η и ξ , т.е. будет равна $P_y = \lambda / \cos \beta$ и $P_x = \lambda / \cos \alpha$.

Выше было отмечено, что при получении интерференционной картины в плоскости $I2$ должно происходить точное совмещение изображений контролируемого C элемента, сформированного первым пучком света, и эталонного M' элемента, сформированного вторым пучком (рис. 2, *b*). Неточность совмещения Δr изображений элементов C и M' в плоскости xu может быть определена из условия, при котором данное смещение приводит к изгибу интерференционной полосы на величину не более 0.1 периода. При таком условии допускается предельная погрешность совмещения

$$\Delta r \leq \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (7)$$

где Δx и Δy — предельно допустимые смещения изображений элементов C и M' друг относительно друга,

определяемые вдоль осей x и y :

$$\Delta x \approx 0.14\pi \left[\frac{\partial \varepsilon_m(x, y)}{\partial x} \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$\Delta y \approx 0.14\pi \left[\frac{\partial \varepsilon_m(x, y)}{\partial y} \right]^{-1}. \quad (9)$$

Как видно из выражений (7)–(9), предельно допустимая величина Δr определяется кривизной поверхности пропускающих или отражательных элементов, причем с ростом кривизны предельно допустимое значение погрешности совмещения изображений элементов C и M' уменьшается.

Экспериментальная апробация

Методика интерферометрического контроля была опробована для оценки качества оптических элементов как пропускающего, так и отражательного типа. Оптическое сопряжение интерференционной картины $I2$ (рис. 1) с плоскостями расположения эталонного M и контролируемого C оптических элементов обеспечивалось двухлинзовой системой, входящей в состав интерферометра $I1$.

На рис. 3 представлены интерференционные картины в полосах бесконечной и конечной ширины, характеризующие отличия контролируемой длиннофокусной линзы от эталонной линзы, для случая соответствия норме контролируемого оптического элемента. Интерференционные картины в полосах бесконечной ширины (рис. 3, *a*) и с настройкой на горизонтальные полосы (рис. 3, *b*) взаимно дополняют друг друга и подтверждают высокое сходство формы поверхности контролируемой и эталонной линз. Диаметр линз — 24 мм, фокусное расстояние — 18 м. Критерием соответствия норме контролируемого оптического элемента было максимально допустимое искривление интерференционной полосы на величину 0.5 периода.

На рис. 4 представлены интерференционные картины в полосах бесконечной и конечной ширины, полученные

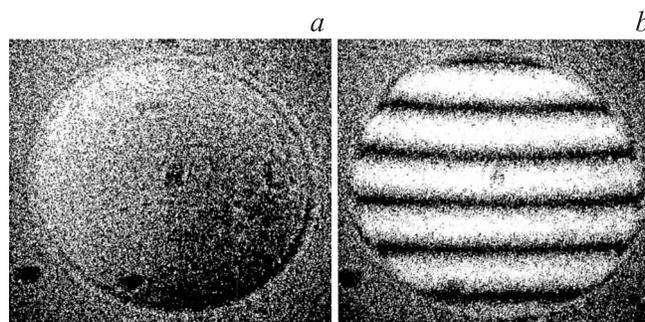


Рис. 3. Интерференционные картины в полосах бесконечной (*a*) и конечной (*b*) ширины, характеризующие отличия контролируемой длиннофокусной линзы, соответствующей норме, от эталонной.

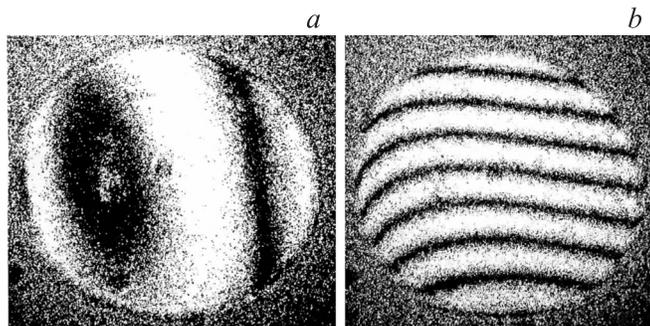


Рис. 4. Интерференционные картины в полосах бесконечной (а) и конечной (б) ширины, характеризующие отличия контролируемой длиннофокусной линзы, не соответствующей норме, от эталонной.

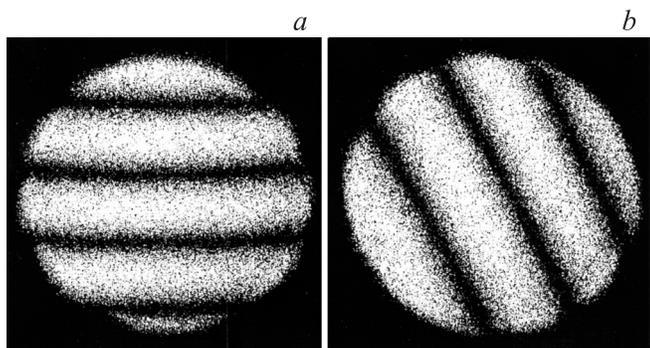


Рис. 5. Интерференционные картины с различной настройкой полос конечной ширины, характеризующие отличия контролируемого сферического зеркала, соответствующего норме, от эталонного.

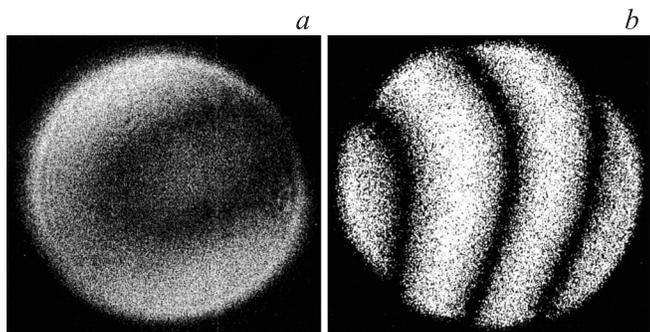


Рис. 6. Интерференционные картины в полосах бесконечной (а) и конечной (б) ширины, характеризующие отличия контролируемого сферического зеркала, не соответствующего норме, от эталонного.

при контроле длиннофокусной линзы, не соответствующей норме.

Для контроля отражательной оптики оптическая схема устройства перенастраивалась посредством разворота зеркала из положения 9 в 10 (рис. 1). Был проведен контроль длиннофокусных сферических зеркал. Диаметр зеркал — 16 мм, радиус кривизны поверхности — 9 м.

Были получены интерференционные картины с различной настройкой полос при контроле зеркала соответствующего (рис. 5) и не соответствующего (рис. 6) норме. Интерференционные картины (рис. 5) подтверждают высокое сходство формы зеркальной поверхности контролируемого и эталонного зеркал.

Заключение

Таким образом, разработанная методика и универсальное устройство интерферометрического контроля оптических элементов позволяют сравнительно просто контролировать качество оптических элементов как пропускающего, так и отражательного типа, и имеют перспективу использования в производственных условиях. Следует отметить, что данное устройство может быть дополнительно системой автоматической обработки интерференционных картин.

Список литературы

- [1] Афанасьев В.А. Оптические измерения. М.: Высш. шк., 1981. 229 с.
- [2] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [3] Кожеватов И.Е., Куликова Е.Х., Черагин Н.П. // Оптич. журн. 1997. Т. 64. № 9. С. 49–54.
- [4] Руденчик Е.А., Кожеватов И.Е., Черагин Н.П. и др. // Опт. и спектр. 2001. Т. 90. № 1. С. 127–135.
- [5] Долодугина В.С. // Оптич. журн. 2003. Т. 70. № 2. С. 64.
- [6] Мошкин Б.Е., Майоров Б.С. // Оптич. журн. 2007. Т. 74. № 2. С. 24.
- [7] Оптические измерения / Под ред. Д.Т. Пуряева. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
- [8] Ляликов А.М. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 3. С. 290–292.
- [9] Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 2007. Т. 102. № 5. С. 874–879.