

09

## **Интерферометрия фазовых объектов, объединяющая процедуры измерения и контроля**

© А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно,  
Беларусь  
E-mail: amlialikov@grsu.by

*Поступило в Редакцию 27 февраля 2013 г.*

Впервые показана возможность объединения процедур измерения и контроля при интерференционных исследованиях фазовых объектов. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена для определенного класса фазовых объектов возможность формирования в интерференционной картине нескольких независимых интерферограмм, соответствующих зонам измерения и зонам контроля параметра.

Создание новых и совершенствование известных оптических методик измерения и контроля качества оптических элементов, в первую очередь, направлено на повышение чувствительности и точности измерений их различных параметров, а также на повышение достоверности процедуры оптического контроля [1–3].

Если результатом измерения является числовое значение определенного параметра объекта, то процедура измерительного контроля предполагает только определение соответствия этого параметра норме [4,5]. Оптические приборы для производственного контроля качества оптики обычно проектируются с учетом особенностей исследуемого объекта, а также применяемой измерительной процедуры (измерение параметра либо контроль параметра). Такой подход в проектировании оптических приборов снижает информативность оптических методов исследования. Увеличение получаемой полезной информации при исследовании объектов оптическими методами может быть достигнуто объединением процедур измерения и контроля. Так как конструкция оптических приборов определяется, в первую очередь, физическим явлением, заложенным в принцип работы данного прибора, а во вторую —

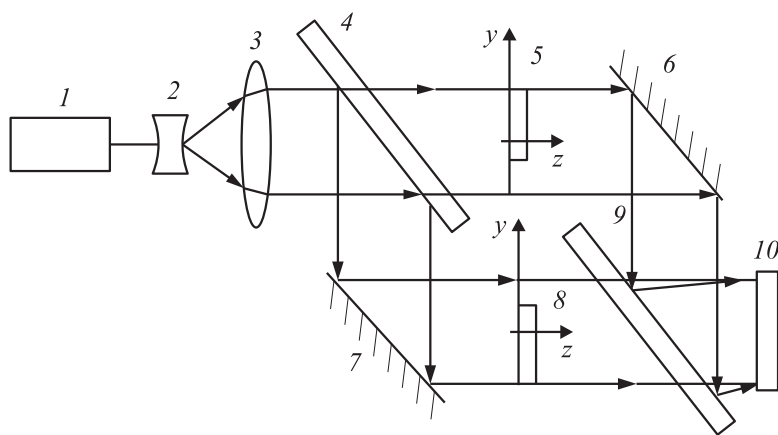
объектом исследования и конкретным его параметром [6], то процесс объединения нескольких измерительных процедур должен решаться индивидуально для конкретного прибора или класса приборов.

В работе теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность объединения процедур измерения и контроля при интерференционных исследованиях определенного класса фазовых объектов, для которых исследуемый параметр постоянен в плоскости, перпендикулярной направлению распространения зондирующей световой волны. Показано, что для таких объектов при их интерференционном исследовании возможно в интерференционной картине формирование нескольких независимых интерферограмм, соответствующих зонам измерения и зонам контроля параметра.

В оптическом производстве к такому классу объектов относятся оптические элементы, поверхности которых ограничены плоскостями, а также плоские дифракционные решетки с постоянным периодом. Для таких объектов обычно волновой фронт зондирующей плоской световой волны, взаимодействующей с объектом, изменяет наклон, но сама форма его остается без изменения.

Объединение измерительных процедур, например для призм и клиновидных пластин, иногда требуется при интерференционном измерении угла между плоскими поверхностями [7,8], ограничивающими данный элемент, и определении соответствия этого угла норме [9] или знака и величины отклонения от нормы.

На рис. 1 изображена оптическая схема, выполненная на основе интерферометра Маха–Цендера, для реализации одного из возможных вариантов объединения процедур измерения и контроля при интерференционных исследованиях, например, прозрачных клиновидных пластин. Коллимированный световой пучок, сформированный лазерным источником света 1 и телескопической системой 2 и 3, направляется в интерферометр Маха–Цендера, образованный полупрозрачными пластинами 4, 9 и зеркалами 6, 7. Перед началом исследований интерферометр настраивается таким образом, чтобы на выходе зеркала 9 интерферирующие световые пучки распространялись строго параллельно друг другу и в плоскости формирования интерференционной картины на фоторегистраторе 10 наблюдалась равномерная освещенность. Реализация такого условия соответствует получению полос равного наклона [10] или настройке интерференционной картины на полосу бесконечной ширины [11].



**Рис. 1.** Оптическая схема, выполненная на основе интерферометра Маха–Цендера, для реализации одного из возможных вариантов объединения процедур измерения и контроля.

В объектном канале интерферометра размещается исследуемая 5, а в опорном — эталонная 8 стеклянные клиновидные пластины таким образом, чтобы нормали к поверхностям пластин были ориентированы вдоль направления распространения световых пучков (ось  $z$ ). Ребра клиньев пластин ориентируются параллельно друг другу, например параллельно оси  $y$ . Клиновидные пластины в объектном и опорном каналах необходимо разместить относительно интерферирующих световых пучков таким образом, чтобы в плоскости фоторегистратора 10, где происходит формирование интерференционной картины, присутствовали зоны, свободные как от наложения контуров исследуемой и эталонной пластин, так и от их совмещения. Пример такого размещения клиновидных пластин приведен на рис. 1. Пластины 5 и 8 располагают по отношению к световым пучкам таким образом, чтобы оставались не полностью занятыми зоны пучков, соответствующие III и IV квадрантам плоской системы координат для объектного и I и II — для опорного пучков. На рис. 2 схематически приведена интерференционная картина, наблюдаемая в плоскости фоторегистратора 10 (рис. 1) для случая такого расположения исследуемой и эталонной пластин в интерферометре. Контур исследуемой клиновидной пластины ограничен зонами  $A$  и  $B$ ,

а эталонной —  $B$  и  $C$ . В этом случае фазы объектной  $\Phi_c(x, y)$  и опорной  $\Phi_m(x, y)$  волн можно представить как

$$\Phi_c(x, y) \sim \begin{cases} \varphi_c + \varepsilon_c, & \text{для зоны } A, \\ \varphi_c + \varepsilon_c, & \text{для зоны } B, \\ \varepsilon_c, & \text{для зоны } C, \end{cases} \quad (1)$$

$$\Phi_m(x, y) \sim \begin{cases} \varepsilon_m, & \text{для зоны } A, \\ \varphi_m + \varepsilon_m, & \text{для зоны } B, \\ \varphi_m + \varepsilon_m, & \text{для зоны } C, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_c$  и  $\varepsilon_m$  — функции, описывающие фазы объектной и опорной световых волн в плоскости  $xu$  на входе в исследуемую и эталонную клиновидные пластины,  $\varphi_c$  и  $\varphi_m$  — функции, описывающие изменения фаз световых волн при прохождении исследуемой и эталонной клиновидных пластин.

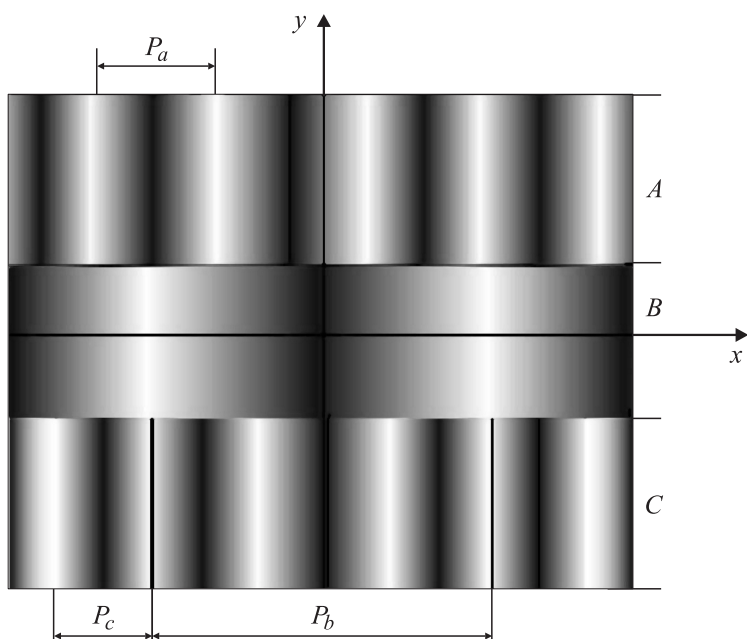
Распределение освещенности в интерференционной картине в плоскости фоторегистратора  $IO$  (рис. 1) определится выражением

$$I(x, y) \sim 1 + \cos[\Phi_c(x, y) - \Phi_m(x, y)], \quad (3)$$

При настройке пустого интерферометра на бесконечно широкую полосу и в случае формирования в объектном и опорном каналах идеальных плоских волновых фронтов, а также для малых углов клиновидности  $\gamma_c$  и  $\gamma_m$  исследуемой и эталонной пластин, при образовании интерференционной картины можно считать:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c - \varepsilon_m &= \frac{2\pi}{\lambda} K, \\ \varphi_c &= \frac{2\pi\gamma_c(n-1)x}{\lambda}, \\ \varphi_m &= \frac{2\pi\gamma_m(n-1)x}{\lambda}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $K$  — константа, определяющая разность хода между объектным и опорным пучками в плоскости интерференционной картины,  $n$  — показатель преломления материала клиновидных пластин,  $\lambda$  — длина волны

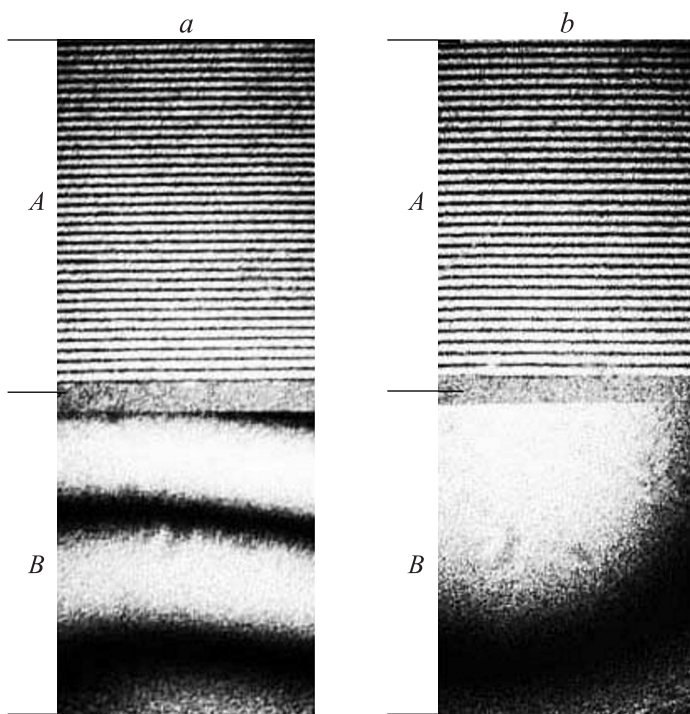


**Рис. 2.** Вид интерференционной картины, наблюдаемой в плоскости фоторегистратора 10 (рис. 1).

лазерного источника света (рис. 1). Согласно (1)–(4), распределение освещенности в интерференционной картине

$$I(x, y) \sim \begin{cases} 1 + \cos\left(\frac{2\pi\gamma_c(n-1)x}{\lambda} + \varphi_k\right), & \text{для зоны } A, \\ 1 + \cos\left(\frac{2\pi(\gamma_c - \gamma_m)(n-1)x}{\lambda} + \varphi_k\right), & \text{для зоны } B, \\ 1 + \cos\left(\frac{2\pi\gamma_m(n-1)x}{\lambda} + \varphi_k\right), & \text{для зоны } C, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\varphi_k = \frac{2\pi}{\lambda}K$  — постоянная фаза, не влияющая на процесс измерения или контроля. Измеряемые периоды  $P_a$ ,  $P_b$  и  $P_c$  интерференционных полос интерферограмм, расположенных в зонах  $A$ ,  $B$  и  $C$  (рис. 2), связаны с параметрами исследуемой и эталонной клиновидных пластин



**Рис. 3.** Интерференционная картина для случаев отклонения угла клина исследуемой пластины от угла клина эталонной:  $\gamma_c - \gamma_m \approx 50''$  (a) и  $\gamma_c - \gamma_m \leq 10''$  (b).

следующими уравнениями:

$$\gamma_c = \frac{\lambda}{(n-1)P_a}, \quad (6)$$

$$\gamma_c \gamma_m = \frac{\lambda}{(n-1)P_b}, \quad (7)$$

$$\gamma_m = \frac{\lambda}{(n-1)P_c}. \quad (8)$$

Как видно из выражений (5) и рис. 2, в интерференционной картине существуют зоны, в которых контуры исследуемой (зона А) и эталонной (зона С) пластин не накладываются друг на друга. В этих зонах образуются интерферограммы, по которым возможно определение угла клина исследуемой и соответственно эталонной клиновидных пластин, используя уравнения (6) и (8). В зоне В происходит наложение контуров исследуемой и эталонной пластин, и интерферограмма, образованная в этой зоне, служит, согласно (7), для определения разности углов клиновидности исследуемой пластины от эталонной, т.е. для процедуры контроля.

На рис. 3 приведены результаты исследований трех клиновидных пластин, одна из которых являлась эталонной. Угол клина эталонной пластины составлял  $9'00'' \pm 10''$ . Ребро клина пластин ориентировалось горизонтально. Исследуемые пластины устанавливались в объектный канал интерферометра и полностью перекрывали световой пучок, а эталонная пластина закрывала только половину пучка опорного канала. На рис. 3, а и б приведены интерференционные картины для двух разных исследуемых пластин, зафиксированные фоторегистратором. Зоны А интерферограмм используются для процедуры измерения угла клина, а В — отклонения угла, т.е. для контроля. Отклонение угла клина для пластин от угла эталонной пластины составили  $\gamma_c - \gamma_m \approx 50''$  (рис. 3, а) и  $\gamma_c - \gamma_m \leq 10''$  (рис. 3, б). Причем положительный знак отклонения для первой клиновидной пластины был определен по интерферограмме в зоне А (рис. 3, а).

## Список литературы

- [1] *Оптический производственный контроль* / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [2] *Optical Shop Testing* / 3-ed. Daniel Malacara. A John Wiley & Sons, Inc., 2007. 888 p.
- [3] *Goodwin E.P., Wyant J.C. Field Guide to Interferometric Optical Testing*. SPIE Press. 2006. 100 p.
- [4] *Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология*. М.: Логос, 2000. 407 с.
- [5] *Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы (аналоговые и цифровые)*. 5-у изд., пер. и доп. Киев: Вища школа, 1986. 504 с.
- [6] *Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов*. М.: Логос, 2004. 472 с.

- [7] Мошкин Б.Е., Майоров Б.С. // Оптич. журн. 2007. Т. 74. № 2. С. 24–27.
- [8] Chatterjee S., Kumar Y.P. // Opt. Comm. 2011. V. 284. N 1. P. 57–63.
- [9] Ляликов А.М. // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113. № 2. С. 229–233.
- [10] Нагибина И.М. Интерференция и дифракция света. Л.: Машиностроение, 1985. 333 с.
- [11] Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.