

07

## Уменьшение погрешности измерений клиновидности пластин в сдвиговой интерферометрии

© А.М. Ляликов

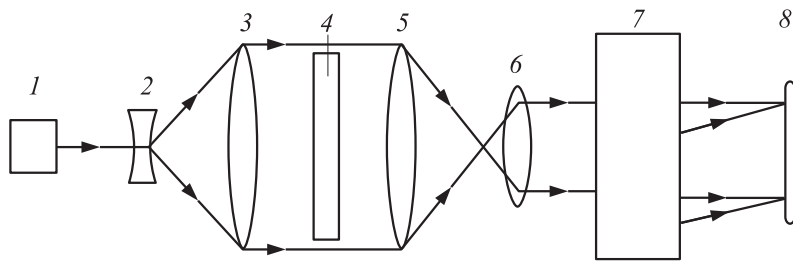
Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
Гродно, Беларусь  
E-mail: amlialikov@grsu.by

Поступило в Редакцию 26 апреля 2010 г.

Предложена и теоретически обоснована методика измерений клиновидности прозрачных пластин, основанная на последовательной обработке пары интерференционных изображений пластины с удвоенным количеством интерференционных полос, позволяющая уменьшить в 2 раза погрешность измерений по сравнению с традиционными интерферометрическими методами.

Для определения малых углов клиньев наибольшее практическое распространение получил интерференционный способ измерения с использованием интерферометра Физо [1]. До настоящего времени этот высокоточный интерферометрический способ неоднократно усовершенствовался [2,3]. Модификация всех интерферометрических методов измерения малых углов клиновидности пластин основана на упрощении оптических схем реализации, а также на повышении точности измерений [2–5]. Последняя тенденция в развитии измерительных методов связана с возрастающими требованиями к качеству изготовления оптических элементов, используемых в современных оптико-электронных системах и лазерной технике [6,7].

Достижение высокой точности интерферометрических способов измерений может быть обеспечено двумя независимыми друг от друга путями: за счет повышения чувствительности отображения разности фаз, а также за счет применения цифровой обработки интерферограмм. При этом следует отметить, что для обеспечения минимальной погрешности интерферометрических измерений необходимо в формируемой интерференционной картине достичь максимальной чувствительности отображения измеряемого параметра.

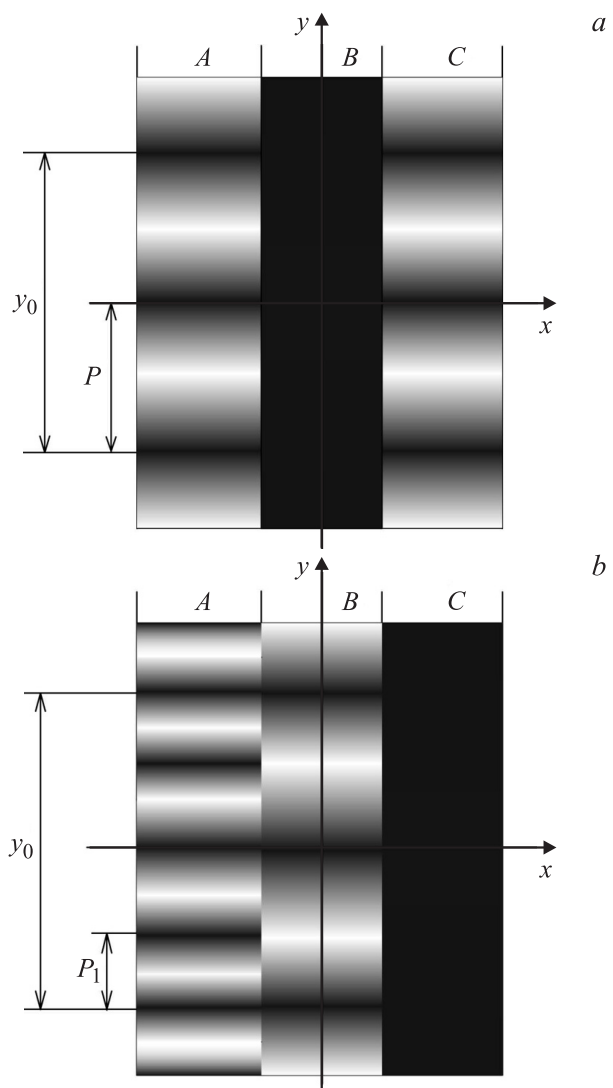


**Рис. 1.** Оптическая схема устройства для реализации методики: 1 — гелий-неоновый лазер; 2, 3 и 5, 6 — телескопические системы; 4 — клиновидная пластина; 7 — интерферометр; 8 — плоскость наблюдения интерференционной картины.

В данной работе показана возможность снижения погрешности измерений клиновидности прозрачных пластин в сдвиговой интерферометрии за счет последовательной обработки пары интерференционных изображений исследуемой пластины. Обязательным условием реализации данного метода является то, что пара интерференционных изображений клиновидной пластины должна быть сформирована таким образом, чтобы приращение функций, описывающих интерференционные полосы, в направлении, перпендикулярном изображению ребра клина, имело противоположные знаки. Такие условия реализуются в интерферометрии бокового и реверсивного сдвига [8,9].

На рис. 1 приведена оптическая схема устройства для реализации предложенной методики. Лазером 1, посредством первой телескопической системы 2, 3, формируется коллимированный пучок света, который после прохождения клиновидной пластины 4 второй системой 5, 6 освещает интерферометр 7. Интерференционная картина образуется в плоскости 8. В качестве интерферометра 7 могут использоваться интерферометры бокового или реверсивного сдвига [1,8,9].

Если клиновидная пластина имеет вид прямоугольника с ориентацией ребра клина параллельно оси  $x$ , то схематическое изображение интерференционной картины (левое и правое интерференционные изображения пластины в виде прямоугольников  $A$  и  $C$  разделены невозмущенной зоной в виде прямоугольника  $B$ ) будет иметь вид, приведенный на рис. 2, *a*. Настройка интерференционной картины, в



**Рис. 2.** Вид интерференционной картины, наблюдаемой в сдвиговом интерферометре в случае получения бесконечно широкой „темной“ полосы в областях:  $B$ , невозмущенной объектом ( $a$ ),  $C$  правого изображения объекта ( $b$ ) и  $A$  левого изображения объекта ( $c$ ).

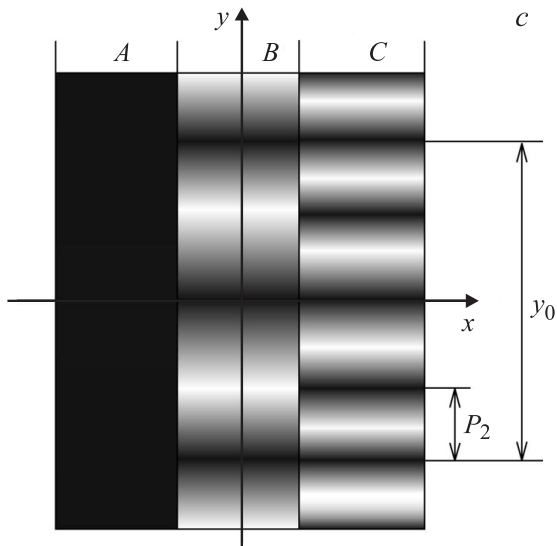


Рис. 2 (продолжение).

частном случае — бесконечно широкая „темная“ полоса, определяется равномерной освещенностью в области прямоугольника  $B$ . Изображения клиновидных пластин будут промодулированы полосами конечной ширины, ориентированными параллельно ребру клина. Распределение освещенности в такой интерференционной картине определится:

$$I(x, y) = \begin{cases} c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(-\frac{2\pi y}{P}\right) & \text{для области прямоугольника } A, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 & \text{для области прямоугольника } B, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(\frac{2\pi y}{P}\right) & \text{для области прямоугольника } C, \end{cases} \quad (1)$$

где  $c_1, c_2$  — действительные амплитуды интерферирующих волн,  $P = \lambda/\alpha$  — период интерференционных полос в изображениях клиновидной пластины (для случая малых углов клина),  $\lambda$  — длина волны источника света,  $\alpha \approx \gamma(n-1)$  — угол отклонения светового пучка клином,  $\gamma$  — угол клина,  $n$  — показатель преломления материала

пластины. Интерференционная картина вида (1) по поведению полос в областях зон  $A$  и  $C$  (рис. 2,  $a$ ) идентична картине, полученной в двухлучевом однопроходном интерферометре.

Угол клина при обработке интерференционной картины вида (1) определяется по формуле

$$\gamma = \frac{\lambda}{P(n-1)}. \quad (2)$$

Так как основную погрешность в результате измерения клиновидности пластины вносит измерение периода полос  $P$ , то для уменьшения этой погрешности определяют суммарную ширину нескольких полос [10]. В этом случае период полос определится как  $P = y_0/N$ . После дифференцирования последнего выражения и формулы (2) определим относительную погрешность измерения угла клина, возникающую вследствие погрешности определения середины интерференционной полосы  $dP$ :

$$\frac{d\gamma}{\gamma} = \frac{1}{N} \frac{dP}{P}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что относительная погрешность измерения угла клина  $d\gamma/\gamma$ , в первую очередь, определяется количеством интерференционных полос  $N$ , зависящим от чувствительности способа отображения интерференционной картины, а во вторую — точностью считывания центра полосы, характеризуемой величиной  $dP/P$ .

Для уменьшения погрешности измерений будем использовать поочередную настройку полос в областях  $A$  и  $C$  (рис. 2,  $a$ ), ограниченных контурами изображений исследуемой клиновидной пластины, до получения бесконечно широкой полосы. Для поочередного получения бесконечно широкой полосы в областях  $C$  (рис. 2,  $b$ ) и  $A$  (рис. 2,  $c$ ) можно изменять направление распространения одной световой волны, участвующей в образовании интерференционной картины (1). Для двухлучевых зеркальных интерферометров изменение угла между интерферирующими пучками регулируется наклоном зеркал [11].

Предположим, что направление волнового вектора одной из световых волн поочередно изменяется на малую величину  $\pm\beta$  к оси  $y$ . В этом случае распределение освещенностей  $I_1$  и  $I_2$  в таких интерференцион-

ных картинах определяется:

$$I_{1,2}(x, y) = \begin{cases} c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(-\frac{2\pi y}{P} \pm \frac{2\pi\beta y}{\lambda}\right) & \text{для области прямоугольника } A, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(\pm \frac{2\pi\beta y}{\lambda}\right) & \text{для области прямоугольника } B, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(\frac{2\pi y}{P} \pm \frac{2\pi\beta y}{\lambda}\right) & \text{для области прямоугольника } C, \end{cases} \quad (4)$$

где индексы „1“ и „2“ относятся к описанию освещенностей  $I_1$  и  $I_2$  соответственно.

Если  $\beta = \alpha$  и отрицательно, то выражение (4) сводится к виду

$$I_1(x, y) = \begin{cases} c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(-\frac{4\pi y}{P}\right) & \text{для области прямоугольника } A, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(-\frac{2\pi\beta y}{\lambda}\right) & \text{для области прямоугольника } B, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 & \text{для области прямоугольника } C. \end{cases} \quad (5)$$

Если  $\beta = \alpha$  и положительно, то

$$I_2(x, y) = \begin{cases} c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 & \text{для области прямоугольника } A, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(\frac{2\pi\beta y}{\lambda}\right) & \text{для области прямоугольника } B, \\ c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2 \cos\left(\frac{4\pi y}{P}\right) & \text{для области прямоугольника } C. \end{cases} \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) описывают интерференционные картины (рис. 2, *b* и *c*) соответственно. Сравнивая выражения (1) и (5), (6), видно, что в последних случаях (5), (6) период полос в интерференционных изображениях уменьшается в 2 раза по сравнению с (1) за счет удвоения количества интерференционных полос на интерференционных изображениях в областях *A* (рис. 2, *b*) и *C* (рис. 2, *c*).

В связи с тем что алгоритм измерения предполагает поочередную настройку полос в областях, ограниченных контурами изображений

исследуемой клиновидной пластины, до получения бесконечно широкой полосы и измерение периодов полос, то, очевидно, их на интерференционных изображениях в областях  $A$  (рис. 2,  $b$ ) и  $C$  (рис. 2,  $c$ ) следует обозначать соответственно  $P_1$  и  $P_2$ . Различия в значениях периодов  $P_1$  и  $P_2$  могут быть связаны с погрешностями измерений. Так как принципиального значения не имеет величина освещенности в полосе бесконечной ширины (освещенность может варьироваться от максимальной, равной  $c_1^2 + c_2^2 + 2c_1c_2$ , до минимальной, равной фоновому шуму), то контроль получения бесконечно широкой полосы в областях  $C$  (рис. 2,  $b$ ) и  $A$  (рис. 2,  $c$ ) может быть реализован по достижении максимальной („светлая“ полоса) или минимальной („темная“ полоса) освещенности. Данную процедуру контроля можно реализовать с использованием фотоприемников, расположенных в соответствующих областях  $C$  (рис. 2,  $b$ ) и  $A$  (рис. 2,  $c$ ).

Угол клина при поочередном определении периодов полос  $P_1$  и  $P_2$  в областях  $A$  (рис. 2,  $b$ ) и  $C$  (рис. 2,  $c$ ) определяется по формуле

$$\gamma = \frac{2\lambda}{(P_1 + P_2)(n - 1)}. \quad (7)$$

Относительная погрешность измерений угла клина при этом в отличие от традиционного интерферометрического способа в связи с удвоением количества интерференционных полос, согласно выражению (3), уменьшается вдвое.

Таким образом, предложенная методика измерения клиновидности прозрачных пластин за счет последовательной обработки пары интерферограмм с удвоенным количеством интерференционных полос позволяет уменьшить в 2 раза погрешность измерений по сравнению с традиционными интерферометрическими методами. Следует отметить, что данная методика уменьшения погрешности измерений клиновидности пластин может быть использована также в интерферометрах бокового сдвига с двойным прохождением светового пучка через клиновидную пластину.

## Список литературы

- [1] *Оптический производственный контроль* / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [2] *Bhattacharyya D., Ray A., Dutta B.K., Ghosh P.N.* // Opt. and Laser Technology. 2002. V. 34. N 1. P. 93–96.

- [3] *Chatterjee S.* // Opt. Eng. 2003. V. 42. N 11. P. 3235–3238.
- [4] *Мошкин Б.Е., Майоров Б.С.* // Оптич. журн. 2007. Т. 74. № 2. С. 24–27.
- [5] *Chatterjee S., Kumar Y.P.* // Opt. and Laser Technology. 2007. V. 39. N 3. P. 662–668.
- [6] *Сеник Б.Н., Бельский А.Б., Потелов В.В.* // Оптич. журн. 2009. Т. 76. № 9. С. 5–13.
- [7] *Дарзнев С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В.* и др. // Тр. Института физики им. А.М. Прохорова. 2006. Т. 62. С. 14–37.
- [8] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2005. Т. 99. № 1. С. 151–155.
- [9] *Ляликов А.М.* // Квант. электроника. 2005. Т. 35. № 2. С. 191–194.
- [10] *Оптические измерения* / Под ред. Д.Т. Пуряева. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
- [11] *Нагибина И.М.* Интерференция и дифракция света. Л.: Машиностроение, 1985. 332 с.