

07

Достижение высокой чувствительности измерений при формировании голографических интерферограмм клиновидных пластин

© А.И. Буть, А.М. Ляликов

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

Поступило в Редакцию 6 апреля 2011 г.

Показана возможность повышения чувствительности измерений угла клина прозрачных пластин при формировании голографическим способом интерференционных картин. Повышение чувствительности достигается за счет увеличения числа интерференционных полос в формируемых интерферограммах при оптической обработке пары голограмм клиновидной пластины. Приведены экспериментальные результаты апробации методики.

Интерференционные методы измерения малой клиновидности прозрачных пластин основаны на получении изображений пластины в виде интерференционных полос в интерферометре Физо и его модификациях [1–4]. Уменьшение погрешности измерений угла клина достигается повышением чувствительности отображения информативного параметра в интерференционных картинах. Под чувствительностью измерений [5,6] применительно к определению угла клина следует понимать параметр, пропорциональный отношению количества полос в сформированной интерферограмме клиновидной пластины на единице ее длины к величине угла клина. Для двухлучевой интерферометрии с опорной волной обычно этот параметр нормируется и приравнивается единице [5].

Повышение чувствительности измерений может быть обеспечено разворотом клина относительно ребра на 180° между последовательной регистрацией интерферограмм. Данный прием был реализован за счет получения пары интерференционных изображений [1,7] или за счет об-

разования интерференционной картины в интерферометре реверсивного сдвига [3,8].

Формирование пары интерференционных изображений клиновидной пластины в голографической интерферометрии бокового или реверсивного сдвига позволяет уменьшить погрешность измерений за счет удвоения количества интерференционных полос на изображениях пластины [9,10]. Для снижения погрешности измерений угла клина необходимо использовать специальные приемы, обеспечивающие снижение чувствительности интерферометра к внешним вибрациям [11] и исключающие систематическую составляющую погрешности, связанную с аберрациями оптической части устройства [10]. Создание новых и совершенствование известных методик измерения клиновидности пластин обосновано возрастающими требованиями к метрологическим характеристикам угловых мер, качеству плоскопараллельных и клиновидных пластин, используемых в современных интерферометрах, лазерной и другой оптоэлектронной технике.

В данной работе показано, что запись пары голограмм клиновидной пластины, на одну из которых зарегистрирована клиновидная пластина, развернутая относительно нормали на угол 180° , позволяет за счет последующей оптической обработки такой пары голограмм повысить чувствительность измерений более чем на порядок по сравнению с двухлучевой интерферометрией с опорной волной, при этом исключить систематическую составляющую погрешностей за счет полной компенсации аберраций. В отличие от известного способа [9] удвоения измерений достигается за счет формирования интерферограмм при интерференции комплексно-сопряженных волн, дифрагированных на голограммах клиновидной пластины.

Для реализации методики повышения чувствительности измерений угла клина прозрачной пластины используется любой голографический интерферометр, предназначенный для записи голограмм или интерферограмм с несущей частотой полос более 10 mm^{-1} [12].

Для упрощения описания методики предположим, что плоская система координат xu совмещена с носителем записи голограммы таким образом, что интерференционные полосы голографической структуры параллельны оси u . Для обеспечения повышения чувствительности измерений угла клина запись голограмм клиновидной пластины проводят в нелинейных условиях, обеспечивающих в дальнейшем восстановление волн в высших порядках дифракции [12,13]. В этом случае после

записи первой голограммы клиновидной пластины коэффициент ее амплитудного пропускания можно представить в виде ряда [13]

$$\tau_1(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau_n \exp i [2\pi n \xi x + n\varepsilon(x, y) + n\varphi(x, y)], \quad (1)$$

где τ_n — коэффициенты, $n = 0, 1, 2, \dots$, ξ — несущая частота интерференционных полос голограммы, $\varepsilon(x, y)$ — искажения фазы, вызванные aberrациями оптической системы записи, $\varphi(x, y)$ — измерения фазы, вызванные клиновидной пластиной. Предположим, что при записи голограммы ребро клина пластины было перпендикулярно оси y . В этом случае изменения фазы $\varphi(x, y)$, согласно [10], можно представить как

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi C \gamma (n_\omega - 1) y}{\lambda}, \quad (2)$$

где C — число проходов световой волны через клиновидную пластину, γ — угол клина, n_ω — показатель преломления пластины, λ — длина волны источника света. Из выражения (2) видно, что фаза световой волны $\varphi(x, y)$ меняется линейно в направлении оси y .

После разворота клиновидной пластины относительно нормали к пластине на 180° записывается вторая голограмма. Коэффициент ее амплитудного пропускания будет иметь вид

$$\tau_2(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau_n \exp i [2\pi n \xi x + n\varepsilon(x, y) - n\varphi(x, y)]. \quad (3)$$

Изменение знака перед изменениями фазы $\varphi(x, y)$ связано с разворотом клина.

Полученная таким образом пара голограмм клиновидной пластины может быть использована для получения интерференционных картин клиновидной пластины с повышением чувствительности измерения угла клина.

На рис. 1 представлена оптическая схема устройства оптической обработки пары голограмм одним пучком света, позволяющая использовать как когерентное, так и некогерентное излучение [11,14]. Для восстановления интерференционных картин с повышением чувствительности измерений угла клина записанные в нелинейных условиях голограммы вида (1) и (3) устанавливаются в плоскостях I и 5 , оптически

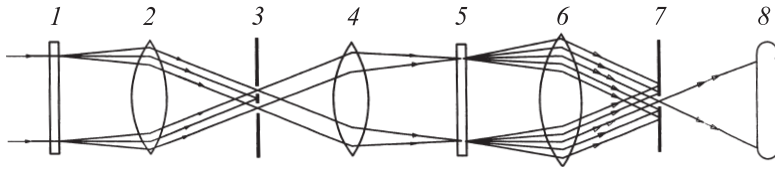


Рис. 1. Оптическая схема устройства оптической обработки пары голограмм одним пучком света: 1, 5 — голограммы; 2, 4 и 6 — объективы; 3, 7 — диафрагмы; 8 — плоскость наблюдения интерференционной картины.

сопряженных объективами 2 и 4. При освещении первой голограммы 1 по нормали коллимированным пучком света дифрагированные волны в $\pm n$ -е порядки вида:

$$A_n(x, y) = a_m \exp i [2\pi n \xi x + n\varepsilon(x, y) + n\varphi(x, y)], \quad (4)$$

$$A_n^*(x, y) = a_m \exp i [-2\pi n \xi x - n\varepsilon(x, y) - n\varphi(x, y)], \quad (5)$$

фокусируются объективом 2 на диафрагму 3, отделяются от других световых пучков двумя отверстиями, коллимируются объективом 4 и освещают вторую голограмму 5 вида (3). Можно показать [11,14], что в направлении нормали ко второй голограмме будет распространяться пара световых волн, дифрагированных в $\pm n$ -е порядки, с комплексными амплитудами:

$$B_n(x, y) = b_n \exp i [2n\varphi(x, y)], \quad (6)$$

$$B_n^*(x, y) = b_n \exp i [-2n\varphi(x, y)]. \quad (7)$$

Данные световые волны фокусируются объективом 6 и отделяются от других отверстий в диафрагме 7. В этом случае в плоскости 8, оптически сопряженной с голограммами 1 и 5, образуется безаберрационная интерференционная картина клиновидной пластины вида

$$I_n(x, y) = 2b_n^2 + 2b_n^2 \cos 4n\varphi(x, y). \quad (8)$$

Данная интерференционная картина с повышением чувствительности в $4n$ раз отображает изменение фазы $\varphi(x, y)$ в виде интерференционных полос, параллельных оси x (ребру клина).

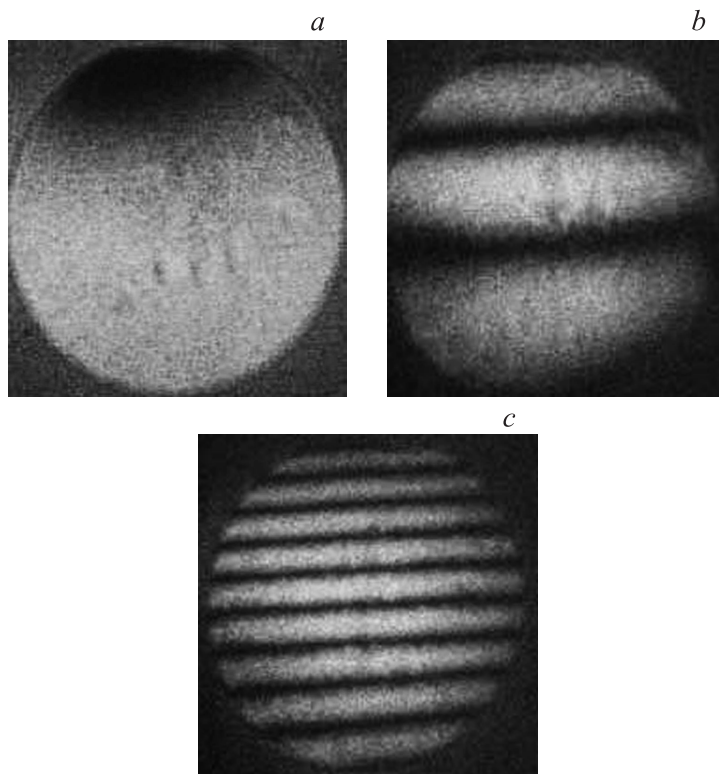


Рис. 2. Интерференционные картины тестовой стеклянной пластины с малым остаточным углом клина, полученные без повышения (*a*) и с повышением чувствительности в 4 (*b*) и 12 (*c*) раз.

На рис. 2, *a* представлена интерференционная картина тестовой стеклянной пластины с малым остаточным углом клина, полученная в интерферометре Маха–Цендера с опорной волной. Записывалась голограмма по методу двух экспозиций [11,13]: без клиновидной пластины и при размещении пластины в плече интерферометра. Несущая частота полос $\xi = 10 \text{ mm}^{-1}$. Ребро клина пластины было ориентировано горизонтально. Из интерферограммы видно, что количество интерференционных полос из-за низкой чувствительности способа недостаточно

для количественной оценки величины угла клина. Даже использование известной методики [9] удвоения чувствительности измерений не позволяло сформировать интерференционное изображение клиновидной пластины с количеством полос, достаточным для определения величины их периода.

При реализации предложенной методики повышения чувствительности измерений клиновидная пластина устанавливалась в специальный держатель, позволяющий осуществлять разворот пластины вокруг нормали к ее поверхности. На рис. 2, *b* и *c* представлены интерференционные картины изображений клиновидной пластины, полученные при оптической обработке пары голограмм пластины, одна из которых была записана после разворота клиновидной пластины относительно нормали на угол 180° , в устройстве оптической обработки голограмм (рис. 1). При получении первой (рис. 2, *b*) интерференционной картины использовались ± 1 -е, а второй (рис. 2, *c*) — ± 3 -и порядки дифракции света на голограммах, что позволило повысить чувствительность отображения фазы $\varphi(x, y)$, связанной с углом клина γ уравнением (2), соответственно в 4 и 12 раз по сравнению с традиционным интерферометрическим методом формирования интерференционных изображений клиновидных пластин. Подтверждением повышения чувствительности отображения фазы $\varphi(x, y)$ в интерферограммах рис. 2, *b* и *c* является увеличение количества интерференционных полос по сравнению с интерферограммой, приведенной на рис. 2, *a*, соответственно в 4 и 12 раз. Относительная погрешность $\delta\gamma/\gamma$ измерения угла клина для случая определения периода полос на изображении клина визуальным способом на основе формул, приведенных авторами ранее [10], по интерферограмме (рис. 2, *a*) превышает 25%, а по интерферограмме этой же пластины, полученной по методике удвоения числа полос [9], — превышает 10%. Предложенная методика повышения чувствительности измерений позволяет сформировать интерферограмму, для которой относительная погрешность $\delta\gamma/\gamma$ измерения угла клина менее 2%. Максимальная чувствительность измерений при формировании интерферограмм по данной методике определяется максимальными порядками дифракции света на голограммах, используемыми для формирования интерференционной картины, при которых еще возможно получение интерференционной картины удовлетворительного качества.

Для извлечения информации о величине угла клина может быть использован широкий спектр алгоритмов цифровой обработки одномерных интерферограмм.

Список литературы

- [1] *Оптический производственный контроль* / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [2] *Bhattacharya 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] *Chatterjee S., Kumar Y.P.* // Appl. Opt. 2009. V. 48. N 8. P. 1598–1605.
- [5] *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 400 с.
- [6] *Зейликович И.С., Ляликов А.М.* // УФН. 1991. Т. 161. № 1. С. 143–164.
- [7] *Мошкин Б.Е., Майоров Б.С.* // Оптич. журн. 2007. Т. 74. № 2. С. 24–27.
- [8] *Chatterjee S., Kumar Y.P.* // Opt. and Laser Technology. 2007. V. 39. N 3. P. 662–668.
- [9] *Ляликов А.М.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 20. С. 87–94.
- [10] *Буть А.И., Ляликов А.М.* // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109. № 4. С. 696–701.
- [11] *Chatterjee S., Kumar Y.P.* // Opt. Comm. 2011. V. 284. N 1. P. 57–63.
- [12] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.* и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [13] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [14] *Ляликов А.М.* Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов. Гродно: ГрГУ, 2010. 215 с.