

## Повышение чувствительности измерений клиновидности подложек лазерной оптики малых линейных размеров

С. С. Ануфрик, А. И. Буть, А. М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь,  
e-mail: [amlialikov@grsu.by](mailto:amlialikov@grsu.by)

Работа посвящена разработке метода снижения погрешности измерений величины остаточной клиновидности лазерных оптических элементов малых линейных размеров за счет регулируемого повышения чувствительности измерений на стадии оптической обработки пары голограмм оптического элемента. Повышение чувствительности измерений достигается за счет формирования интерферограмм при интерференции комплексно-сопряженных волн, дифрагированных на голограммах с нелинейным коэффициентом пропускания.

**Ключевые слова:** измерение малой клиновидности; повышение чувствительности измерений; голографическая интерферометрия; оптическая обработка голограмм.

## Increasing the sensitivity of measuring the wedge shape of laser optics substrates of small linear dimensions

S. S. Anufrik, A. M. Lyalikov, A. I. But

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus, e-mail: [amlialikov@grsu.by](mailto:amlialikov@grsu.by)

The work is devoted to the development of a method for reducing the measurement error of the residual wedge shape of laser optical elements of small linear dimensions due to a controlled increase in measurement sensitivity at the stage of optical processing of a pair of holograms of the optical element. Increasing the sensitivity of measurements is achieved through the formation of interferograms during the interference of complexly conjugate waves diffracted on holograms with a nonlinear transmittance.

**Keywords:** measurement of small wedge shape; increasing measurement sensitivity; holographic interferometry; optical processing of holograms.

### Введение

Широко известные интерференционные способы измерения клиновидности прозрачных оптических элементов основаны на получении изображений оптического элемента в виде интерференционных полос в интерферометре Физо и его модификациях [1–4].

Для уменьшения погрешности измерений используют различного рода приемы, способствующие повышению чувствительности отображения информативного параметра в интерференционных картинах. К одному из таких приемов можно отнести разворот клина относительно ребра на угол  $180^\circ$  между последовательной регистрацией интерферограмм, который был реализован за счет получения пары интерференционных изображений [1, 5], а также был применен и в интерферометре реверсивного сдвига [3, 6].

Формирование пары интерференционных изображений клиновидного оптического элемента в голографической интерферометрии бокового или реверсивного сдвига позволяет уменьшить погрешность измерений за счет удвоения интерференционных полос на изображениях пластины [7, 8]. Однако вышерассмотренные способы повышения чувствительности измерения клиновидности оптического элемента реализуются в интерферометрических устройствах чувствительных к вибрациям отдельных элементов, входящих в устройство.

Данная работа посвящена разработке метода снижения погрешности измерений величины остаточной клиновидности лазерных оптических элементов малых линейных размеров за счет регулируемого повышения чувствительности измерений на стадии оптической обработки пары голограмм оптического элемента. Метод реализуется в два этапа. Первый этап предполагает запись пары голограмм оптического элемента в нелинейных условиях, обеспечивающих появление высших порядков дифракции при их восстановлении [9]. На втором этапе реализуется оптическая обработка такой пары голограмм.

## 1. Первый этап

Предположим, что плоская система координат совмещена с носителем записи голограммы таким образом, что интерференционные полосы голографической структуры перпендикулярны оси  $x$ . Для обеспечения наличия высших порядков дифракции при восстановлении таких голограмм, запись проводят в нелинейных условиях [10]. Если запись голограмм клиновидной пластины реализуется в двухлучевом интерферометре, коэффициент амплитудного пропускания первой нелинейной голограммы можно представить в виде ряда [11]

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

где  $\tau_n$  – коэффициенты,  $n = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\xi$  – несущая частота интерференционных полос голограммы,  $\varepsilon(x, y)$  – искажения фазы, вызванные аберрациями оптической системы записи,  $\varphi(x, y)$  – изменения фазы, вызванные клиновидной пластиной. Предположим, что при записи голограммы ребро клина пластины было параллельно оси  $x$ . Для такого случая изменения фазы  $\varphi(x, y)$  согласно [8] можно представить как

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

где  $\gamma$  – угол клина,  $n_\omega$  – показатель преломления пластины,  $\lambda$  – длина волны источника света. Из выражения (2) видно, что фаза световой волны  $\varphi(x, y)$  меняется линейно в направлении оси  $y$ , при этом смещение пластины в направлении  $x$  влияния на фазовые искажения при записи голограммы не окажет, так как  $\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} = 0$ .

Перед записью второй объектной голограммы оптический элемент с клиновидной пластиной разворачивают относительно нормали к пластине на  $180^\circ$ . После такой процедуры записывается вторая объектная голограмма при соблюдении

нелинейных условий ее регистрации. Коэффициент амплитудного пропускания второй объектной голограммы будет иметь вид

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

## 2. Второй этап.

Полученная таким образом пара объектных голограмм клиновидной пластины используется для получения интерференционной картины клиновидной пластины. Возможны несколько вариантов восстановления интерференционных картин при использовании пары объектных голограмм [10, 11]. Для формирования интерференционной картины объектные голограммы вида (1) и (3) совмещаются либо в контакт, либо устанавливаются в оптически сопряженных плоскостях. Последний вариант более предпочтителен, так как позволяет повышать чувствительность измерений, за счет использования световых волн, дифрагированных на нелинейных объектных голограммах в высших порядках.

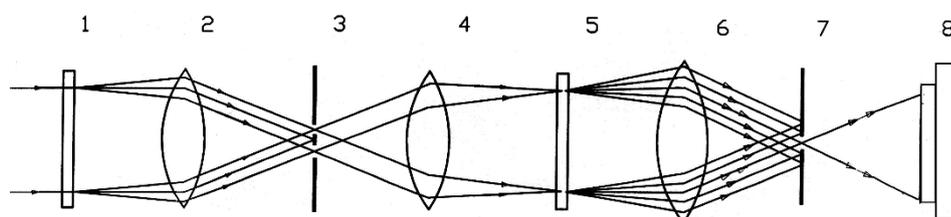


Рис. 1. Оптическая схема устройства оптической обработки пары голограмм одним пучком света  
1, 5 – голограммы; 2, 4, и 6 – объективы; 3, 7 – непрозрачный экран с отверстиями;  
8 – цифровая камера

На рис. 1 представлена оптическая схема такого устройства оптической обработки пары голограмм одним пучком света [10, 11]. Для восстановления интерференционных картин с повышением чувствительности измерений угла клина записанные в нелинейных условиях объектные голограммы нелинейного вида (1) и (3) устанавливаются в плоскостях 1 и 5, оптически сопряженных объективами 2 и 4. При освещении первой объектной голограммы 1 по нормали коллимированным пучком света дифрагированные волны в  $\pm n$ -е порядки вида:

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

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

где  $a_m$  – действительная амплитуда световой волны. Данная пара световых волн фокусируются объективом 2 на экран 3, отделяются от других световых пучков двумя отверстиями. Выделенные световые пучки вида (4) и (5) коллимируются объективом 4 (рис. 1) и освещают вторую объектную голограмму 5 вида (3). Воспользовавшись ранее полученными результатами [11] можно показать, что в направлении нормали ко второй объектной голограмме будет распространяться

пара световых волн, дифрагированных в  $\pm n$ -е порядки. Комплексные амплитуды данных световых волн имеют вид:

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

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

Пара световых волн вида (6) и (7) фокусируются объективом 6 и отделяются от других волн отверстием во втором непрозрачном экране 7. В плоскости регистрации цифровой камеры 8, оптически сопряженной с голограммами 1 и 5, образуется безаберрационная интерференционная картина исследуемого оптического элемента, содержащая информацию о величине остаточной клиновидности

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

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

### 3. Результаты эксперимента.

Для экспериментальной проверки разработанного метода использовался тестовый оптический элемент в виде стеклянной пластины с малым остаточным углом клина. Линейные размеры тестовой пластины  $7 \times 8$  мм. На рис. 2, *а* представлена интерференционная картина в полосах бесконечной ширины тестовой стеклянной пластины, полученная в интерферометре Маха-Цендера с опорной волной.

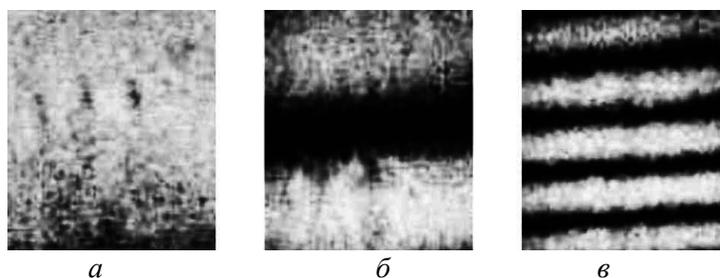


Рис.2. Интерференционные картины тестового оптического элемента, содержащего стеклянную пластину с малым остаточным углом клина, полученные без повышения (*а*) и с повышением чувствительности в 4 (*б*) и 12 (*в*) раз

Из интерферограммы рис. 2, *а* видно, что количество интерференционных полос из-за низкой чувствительности способа, недостаточно для количественной оценки величины угла клина. На рис. 2, *б* и *в* представлены интерференционные картины изображений тестового оптического элемента, восстановленные при оптической обработке пары нелинейных объектных голограмм, одна из которых была записана после разворота тестового оптического элемента относительно нормали на угол  $180^\circ$ . Интерференционные картины получены в устройстве оптической обработки голограмм (рис. 1) и зафиксированы цифровой камерой 8. При восстановлении первой (рис. 2, *б*) интерференционной картины использовались  $\pm 1$ -е, а второй (рис. 2, *в*) –  $\pm 3$ -е порядки дифракции света на нелинейных голограммах. Использование высших порядков дифракции позволило дополнительно повысить

чувствительность отображения фазы  $\varphi(x, y)$ , вызванной прохождением зондирующей волны оптический элемент с углом клина  $\gamma$ , соответственно в 4 и 12 раз по сравнению с традиционным интерферометрическим методом. Подтверждением повышения чувствительности отображения фазы  $\varphi(x, y)$  в интерферограммах рис. 2, б и рис. 2, в является увеличение количества интерференционных полос по сравнению с интерферограммой, приведенной на рис. 2, а, соответственно в 4 и 12 раз. Увеличения количества полос в интерференционных картинах обеспечивает уменьшению относительной погрешности  $\left(\frac{\delta\gamma}{\gamma}\right)$  измерений угла клина.

### Заключение

Максимальная чувствительность измерений при формировании интерферограмм по данной методике определяется максимальными порядками дифракции света на нелинейных голограммах. Следует отметить, что относительная погрешность интерференционных измерений при определении угла клина уменьшается с ростом чувствительности способа измерений, но при увеличении чувствительности измерений, за счет высших порядков дифракции всегда происходит ухудшение качества интерференционных полос. Данное ухудшение связано с ростом шумов, характерных для голограмм нелинейного вида.

### Библиографические ссылки

1. Оптический производственный контроль / Д. Малакара [и др.]; под ред. Д. Малакары. М. : Машиностроение, 1985.
2. *Chatterjee S.* Simple technique for measurement of residual wedge angle of high optical quality transparent parallel plate // *Opt. Eng.* 2003. Vol. 42, № 11. P. 3235–3238.
3. Direct measurement on transparent plates by using Fizeau interferometry / D. Bhattacharyya [et al.] // *Opt. and Laser Technology.* 2002. Vol. 34, № 1. P. 93–96.
4. *Chatterjee S.* External measurement of dihedral right angles with cyclic optical configuration / S. Chatterjee, Y. P. Kumar // *Appl. Opt.* 2009. Vol. 48, № 8. P. 1598–1605.
5. *Мошкин Б. Е.* Интерферометрический метод измерения клиновидности / Б. Е. Мошкин, Б. С. Майоров // *Оптический журнал.* 2007. Т. 74, № 2. С. 24–27.
6. *Chatterjee S. Kumar P. Y.* Measurement of residual wedge angle with a reversal shear interferometer // *Optics and Laser Technology.* 2007. Vol. 39, № 3. P. 662–668.
7. *Ляликов А. М.* Уменьшение погрешности измерений клиновидности пластин в сдвиговой интерферометрии // *Письма в Журнал технической физики.* 2010. Т. 36, № 20. С. 87–94.
8. *Буть А. И., Ляликов А. М.* Повышение точности интерферометрического измерения клиновидности пластин // *Оптика и спектроскопия.* 2010. Т. 109, № 4. С. 696–701.
9. *Островский Ю. И.* Голографическая интерферометрия / Ю. И. Островский, М. М. Бутусов, Г. В. Островская. М. : Наука, 1977.
10. Голографическая интерферометрия фазовых объектов / А. К. Бекетова [и др.]; под ред. Г. И. Мишина. Л. : Наука, 1979.
11. *Ляликов А. М.* Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов: монография. Гродно : ГрГУ, 2010. 215 с.