

07;12

## Повышение чувствительности измерений при формировании голографических интерферограмм клиновидных пластин

© А.И. Буть, А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 3 мая 2011 г.)

Рассмотрены методы повышения чувствительности измерений при формировании безабберационных интерференционных изображений клиновидных пластин, не требующие априорного знания о положении ребра клина пластин. Показано, что для интерферометрии реального масштаба времени при использовании записи на опорную голограмму клиновидной пластины и последующего ее восстановления объектной световой волной, прошедшей клиновидную пластину, развернутую относительно нормали на угол  $180^\circ$ , наблюдается удвоение чувствительности измерений угла клина. Показано, что запись пары голограмм клиновидной пластины, на одну из которых зарегистрирована клиновидная пластина, развернутая относительно нормали к пластине на угол  $180^\circ$ , позволяет за счет последующей оптической обработки такой пары голограмм повысить чувствительность измерений более чем на порядок, при этом исключить систематическую составляющую погрешностей за счет полной компенсации аберраций. Представлены результаты экспериментальной апробации методов.

### Введение

К одной из актуальных задач оптических измерений относится выявление и измерение остаточной клиновидности плоскопараллельных пластин. Такого рода задачи встречаются при изготовлении высококачественной оптики для современных интерферометров и лазерной техники, а также в метрологии при аттестации угловых мер и концевых мер. Создание новых и совершенствование известных методик измерения клиновидности пластин, в первую очередь, направлено на повышение чувствительности и, как следствие, точности измерений, что обосновано возрастающими требованиями к метрологическим характеристикам угловых мер, качеству плоскопараллельных и клиновидных пластин, используемых в современных интерферометрах, лазерной и другой оптоэлектронной технике.

Интерференционные методы измерения малой клиновидности прозрачных пластин признаны наиболее точными [1]. Эти методы оптических измерений основаны на получении изображений пластины, промодулированных интерференционными полосами в интерферометре Физо и его модификациях [1–4]. Уменьшение погрешности измерений угла клина пластин, в первую очередь, достигается повышением чувствительности отображения информативного параметра в интерференционных картинах. Для косвенных интерферометрических измерений, где для определения угла клина измеряется период интерференционных полос, это достигается увеличением количества интерференционных полос на изображении клиновидной пластины. Для этих целей может быть использован разворот клина относительно ребра на  $180^\circ$  между последовательной регистрацией интерферограмм. Данный прием может быть реализован

за счет получения пары интерференционных изображений [1,5] или образования интерференционной картины в интерферометре реверсивного сдвига [3,6].

Формирование пары интерференционных изображений клиновидной пластины в голографической интерферометрии бокового или реверсивного сдвига позволяет уменьшить погрешность измерений за счет удвоения интерференционных полос на изображениях пластины [7,8]. Для снижения погрешности измерений угла клина необходимо использовать специальные приемы, обеспечивающие снижение чувствительности интерферометра к внешним вибрациям [9] и исключающие систематическую составляющую погрешности, связанную с аберрациями оптической части устройства [8].

В вышерассмотренных методах измерения клиновидности прозрачных пластин посредством интерферометра реверсивного сдвига для удвоения чувствительности измерений необходима обязательная строгая ориентация ребра клина пластины параллельно оси реверсивного разворота интерферирующих пучков. Однако при малой клиновидности исследуемых пластин определение ребра клина пластины до применения приемов повышения чувствительности в некоторых случаях затруднено.

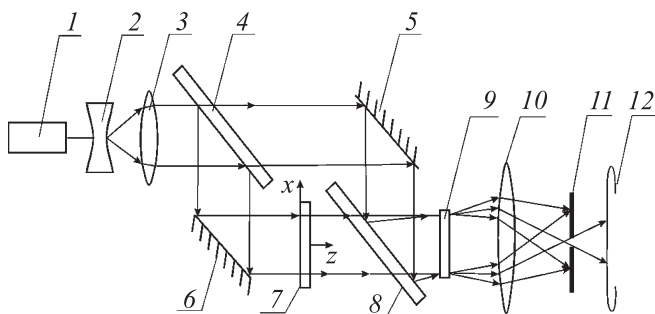
В данной работе рассмотрены методы повышения чувствительности измерений при формировании безабберационных интерференционных изображений клиновидных пластин, не требующие априорного знания о положении ребра клина пластин. Показано, что для интерферометрии реального масштаба времени при использовании записи на опорную голограмму клиновидной пластины и последующего ее восстановления объектной световой волной, прошедшей клиновидную пластину, развернутую относительно нормали на угол  $180^\circ$ , наблюдается удвоение чувствительности измерений угла

клина. Также показано, что запись пары голограмм клиновидной пластины, на одну из которых зарегистрирована клиновидная пластина, развернутая относительно нормали к пластине на угол  $180^\circ$ , позволяет за счет последующей оптической обработки такой пары голограмм повысить чувствительность измерений более чем на порядок, при этом исключить систематическую составляющую погрешностей за счет полной компенсации aberrаций.

Для реализации методики удвоения чувствительности измерений угла клина прозрачной пластины используется любой голографический интерферометр [10,11], предназначенный для интерферометрии прозрачных объектов, либо классический двухлучевой интерферометр, позволяющий записывать интерферограммы с несущей частотой интерференционных полос более  $10 \text{ mm}^{-1}$  [12,13].

### Формирование безабберационных интерференционных изображений клиновидных пластин в голографической интерферометрии реального масштаба времени

На рис. 1 представлена оптическая схема экспериментальной установки на основе интерферометра типа Маха–Цендера, позволяющая формировать безабберационные изображения 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, 8 и зеркалами 5, 6. В одном плече интерферометра размещается стеклянная клиновидная пластина 7 таким образом, чтобы нормаль к поверхности пластины была ориентирована вдоль направления зондирующего пучка



**Рис. 1.** Оптическая схема экспериментальной установки на основе интерферометра типа Маха–Цендера: 1 — лазерный источник света; 2, 3 — телескопическая система; 4, 8 — полупрозрачные пластины; 5, 6 — зеркала интерферометра Маха–Цендера; 7 — исследуемая клиновидная пластина; 9 — голограмма; 10 — объектив; 11 — диафрагма; 12 — плоскость наблюдения интерференционной картины.

(ось  $z$ ). В отличие от известных способов формирования интерференционных изображений клиновидной пластины с удвоением чувствительности измерений в интерферометрах реверсивного сдвига [6,9] для предлагаемой методики ориентация ребра клина пластины может быть произвольной в плоскости  $xy$ . Однако для упрощения описания методики предположим, что плоскость системы координат  $xy$  параллельна клиновидной пластине и носителю записи голограммы 9. Причем оси ориентированы так, что опорная и объектная волны распространяются в плоскости  $xy$ , а ребро клина ориентировано параллельно оси  $y$ . В этом случае комплексные амплитуды световых волн, записывающих голограмму 9 клиновидной пластины 7, будут иметь вид:

$$A_1(x, y) = a_1 \exp i[2\pi\xi x + \varepsilon_1(x, y)], \quad (1)$$

$$A_2(x, y) = a_2 \exp i[\varepsilon_2(x, y) + \varphi(x, y)], \quad (2)$$

где  $a_1, a_2$  — действительные амплитуды опорной и объектной волн,  $\xi = \cos \alpha / \lambda$  — пространственная частота опорной волны,  $\alpha$  — угол между направлением распространения волны и осью  $x$ ,  $\lambda$  — длина волны источника света,  $\varepsilon_1(x, y)$  и  $\varepsilon_2(x, y)$  — искажения фаз световых волн из-за aberrаций оптической схемы,  $\varphi(x, y)$  — изменение фазы объектной волны вследствие прохождения ею клиновидной пластины 7. Изменения фазы  $\varphi(x, y)$  можно представить по аналогии с работой [8]:

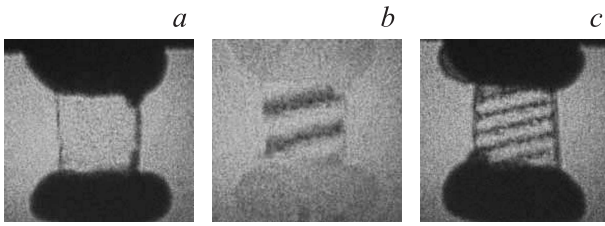
$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi\gamma(n_w - 1)y}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  — угол клина,  $n_w$  — показатель преломления материала пластины. Из выражения (3) видно, что фаза световой волны  $\varphi(x, y)$  меняется линейно в направлении оси  $y$ .

Предположим, что действительные амплитуды опорной и объектной волн  $a_1 = a_2$ . В этом случае коэффициент амплитудного пропускания голограммы клиновидной пластины при соблюдении линейных условий записи можно представить как

$$\tau(x, y) \sim 1 + \cos[2\pi\xi x + \varepsilon_1(x, y) - \varepsilon_2(x, y) - \varphi(x, y)]. \quad (4)$$

Голограмма клиновидной пластины обрабатывается на месте либо после обработки устанавливается в первоначальное положение 9 (рис. 1). Точность положения установки голограммы можно проконтролировать по достижению в плоскости наблюдения интерференционной картины 12 бесконечно широкой полосы (равномерной по всему полю освещенности), образующейся при освещении голограммы 9 волнами вида (1), (2) и выделении отверстием в диафрагме 11 пары световых волн, сфокусированных объективом 10, распространяющихся строго вдоль оси  $z$ . На фотографии рис. 2, а представлена такая интерференционная картина, наблюдаемая в плоскости 12 (рис. 1), при правильной установке голограммы 9 по отношению к первоначальному положению.



**Рис. 2.** Интерференционные картины, наблюдаемые в плоскости  $I_2$  (рис. 1):  $a$  — при правильной установке голограммы в первоначальное положение;  $b$  — при исключении из схемы клиновидной пластины;  $c$  — после разворота клиновидной пластины.

Если после правильной установки голограммы 9 убрать из интерферометра клиновидную пластину 7, то комплексная амплитуда объектной волны (2) изменится и примет вид

$$A_{21}(x, y) = a_2 \exp i [\varepsilon_2(x, y)]. \quad (5)$$

В этом случае при освещении голограммы 9 вида (4) световыми волнами (1) и (5) распределение комплексных амплитуд  $B(x, y)$  световых волн на выходе голограммы 9 можно представить в виде

$$B(x, y) = [A_1(x, y) + A_{21}(x, y)] \tau(x, y). \quad (6)$$

С учетом (1), (4) и (5) можно показать, что по нормали к голограмме 9 будут распространяться две световые волны с комплексными амплитудами

$$B_1(x, y) = b_1 \exp i [\varepsilon_2(x, y) + \varphi(x, y)], \quad (7)$$

$$B_{21}(x, y) = b_2 \exp i [\varepsilon_2(x, y)], \quad (8)$$

где  $b_1, b_2$  — действительные амплитуды волн. Волны вида (7), (8) фокусируются объективом 10 (рис. 1) и отделяются отверстием в диафрагме 11 от других волн, дифрагированных на голограмме 9. В этом случае распределение освещенности в плоскости формирования интерференционной картины клиновидной пластины при наложении световых волн вида (7) и (8) определится, как

$$I_1(x, y) = b_1^2 + b_2^2 + 2b_1b_2 \cos \varphi(x, y). \quad (9)$$

Изображение клиновидной пластины промодулировано интерференционными полосами, параллельными ребру клина, период которых, согласно выражению (3), определится как

$$P = \frac{\lambda}{\gamma(n_w - 1)}. \quad (10)$$

Из выражения (9) видно, что aberrации оптической системы экспериментальной установки компенсированы полностью, но чувствительность измерений не повышена по сравнению с традиционными методами интерферометрии. На рис. 2,  $b$  представлена интерференционная

картина, наблюдаемая в плоскости  $I_2$  (рис. 1), при исключении из схемы клиновидной пластины 7. Следует отметить, что при экспериментальной апробации методики ребро клина пластины было наклонено к горизонтальной оси под небольшим углом, что подтверждается ориентацией интерференционных полос.

### Удвоение чувствительности при формировании безабберационных интерференционных изображений клиновидных пластин

Предположим, что вместо операции исключения из схемы клиновидной пластины 7 (рис. 1) произошел ее разворот относительно нормали (ось  $z$ ) на угол  $180^\circ$ . В этом случае в выражении для комплексной амплитуды объектной световой волны (2) изменения фазы, вызванные действием клиновидной пластины, меняют знак на противоположный

$$A_{22}(x, y) = a_2 \exp i [\varepsilon_2(x, y) - \varphi(x, y)]. \quad (11)$$

При освещении голограммы 9 (рис. 1) вида (4) световыми волнами (1) и (11) по нормали к голограмме будут распространяться волны вида (7) и

$$B_{22}(x, y) = b_2 \exp i [\varepsilon_2(x, y) - \varphi(x, y)]. \quad (12)$$

Волны вида (7), (12) фокусируются объективом 10 (рис. 1) и отделяются отверстием в диафрагме 11 от других волн, дифрагированных на голограмме 9. В этом случае распределение освещенности в плоскости формирования интерференционной картины клиновидной пластины при наложении световых волн вида (7) и (12) определится, как

$$I_2(x, y) = b_1^2 + b_2^2 + 2b_1b_2 \cos 2\varphi(x, y), \quad (13)$$

Из выражения (13) видно, что за счет разворота клиновидной пластины происходит удвоение чувствительности при формировании в реальном масштабе времени безабберационного интерференционного изображения клиновидной пластины, которое проявляется в удвоении числа полос на изображении клина и, как следствие, к уменьшению периода интерференционных полос по сравнению с вышерассмотренным (см. выражение (10)) случаем:

$$P = \frac{\lambda}{2\gamma(n_w - 1)}. \quad (14)$$

При реализации предложенной методики повышения чувствительности измерений при формировании в реальном масштабе времени безабберационного интерференционного изображения клиновидной пластины за счет разворота пластины на угол  $180^\circ$  клиновидная пластина устанавливалась в специальный держатель, позволяющий осуществлять контролируемый разворот пластины вокруг нормали к ее поверхности. На рис. 2,  $c$

представлена интерференционная картина, наблюдаемая в плоскости 12 (рис. 1) после разворота клиновидной пластины 7 на угол 180°. Сравнивая интерференционные картины рис. 2, с и рис. 2, b видно, что чувствительность измерений при обработке интерферограммы увеличена в два раза.

Кроме формирования в реальном масштабе времени интерференционной картины по вышерассмотренной методике возможно наблюдение интерференционных картин с удвоенной чувствительностью по методу двух экспозиций.

### Запись пары объектных голограмм клиновидной пластины

Другим вариантом наблюдения удвоения чувствительности при формировании безабберационных интерференционных изображений клиновидных пластин может быть запись на один или два отдельных носителя объектных голограмм клиновидной пластины, причем перед записью второй голограммы клиновидная пластина должна быть развернута относительно нормали к пластине на угол 180°. По виду интерференционные картины, полученные по методу двух экспозиций на один общий носитель или восстановленные при совмещении двух объектных голограмм, записанных на разных носителях, не будут отличаться от интерференционной картины, сформированной в реальном масштабе времени, описываемой выражением (14).

Рассмотрим возможность значительного повышения чувствительности при использовании пары голограмм клиновидной пластины, на одну из которых зарегистрирована клиновидная пластина, развернутая относительно нормали к пластине на угол 180°, и последующей оптической обработки такой пары голограмм.

Для достижения значительного повышения чувствительности измерений угла клина запись голограмм клиновидной пластины проводят в нелинейных условиях, обеспечивающих в дальнейшем восстановление волн в высших порядках дифракции [10,11]. В этом случае коэффициенты амплитудных пропусканий первой голограммы клиновидной пластины и второй голограммы, но записанной после разворота пластины на угол 180° относительно оси z (рис. 1), можно представить в виде рядов [11]

$$\tau_1(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau_n \exp i [2\pi n \xi x + n \varepsilon(x, y) - n \varphi(x, y)], \quad (15)$$

$$\tau_2(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau_n \exp i [2\pi n \xi x + n \varepsilon(x, y) - n \varphi(x, y)], \quad (16)$$

где  $\tau_n$  — коэффициенты,  $n = 0, 1, 2, \dots$

Полученная таким образом пара голограмм клиновидной пластины может быть использована для получения

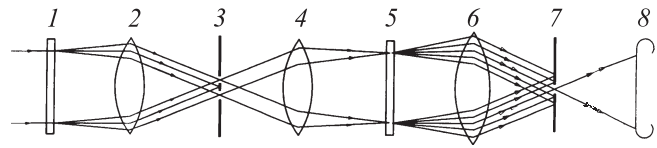


Рис. 3. Оптическая схема устройства оптической обработки пары голограмм одним пучком света: 1, 5 — голограммы; 2, 4, 6 — объективы; 3, 7 — диафрагмы; 8 — плоскость наблюдения интерференционной картины.

интерференционных картин клиновидной пластины с повышением чувствительности измерения угла клина по методике обработки голограмм в оптически сопряженных плоскостях [10,11].

На рис. 3 представлена оптическая схема устройства оптической обработки пары голограмм одним пучком света, позволяющая использовать как когерентное, так и некогерентное излучение [10].

Для восстановления интерференционных картин с повышением чувствительности измерений угла клина записанные в нелинейных условиях голограммы вида (15) и (16) устанавливаются в плоскостях 1 и 5, оптически сопряженных объективами 2 и 4. При освещении первой голограммы 1 по нормали коллимированным пучком света дифрагированные волны в  $\pm n$ -е порядки вида:

$$A_n(x, y) = a_n \exp i [2\pi n \xi x + n \varepsilon(x, y) - n \varphi(x, y)], \quad (17)$$

$$A_n^*(x, y) = a_n \exp i [-2\pi n \xi x + n \varepsilon(x, y) + n \varphi(x, y)], \quad (18)$$

где  $a_n$  — действительная амплитуда, фокусируются объективом 2 на диафрагму 3, отделяются от других световых пучков двумя отверстиями, коллимируются объективом 4 и освещают вторую голограмму 5 вида (15). Можно показать [10,13], что в направлении нормали ко второй голограмме будет распространяться пара световых волн, дифрагированных в  $\pm n$ -е порядки, с комплексными амплитудами:

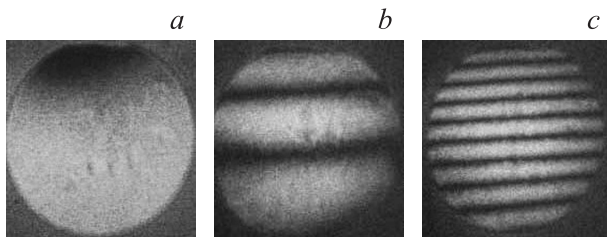
$$B_n(x, y) = b_n \exp i [-2n \varphi(x, y)], \quad (19)$$

$$B_n^*(x, y) = b_n \exp i [2n \varphi(x, y)], \quad (20)$$

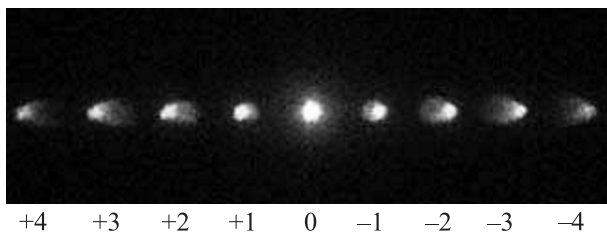
где  $b_n$  — действительная амплитуда. Данные световые волны фокусируются объективом 6 и отделяются от других отверстий в диафрагме 7. В этом случае в плоскости 8, оптически сопряженной с голограммами 1 и 5, образуется безабберационная интерференционная картина клиновидной пластины вида

$$I_n(x, y) = 2b_n^2 + 2b_n^2 \cos 4n \varphi(x, y). \quad (21)$$

Данная интерференционная картина отображает изменение фазы  $\varphi(x, y)$  в виде интерференционных полос параллельных ребру клина, но уже с повышением чувствительности в  $4n$  раз. Для данной интерференционной картины (21) период полос в области изображения



**Рис. 4.** 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.



**Рис. 5.** Дифракционный спектр нелинейной голограммы.

клина будет определяться порядками дифракции света  $n$ , выделяемыми в схеме оптической обработки голограмм и определится выражением:

$$P_n = \frac{\lambda}{4n\gamma(n_w - 1)}. \quad (22)$$

При экспериментальной апробации данной методики повышения чувствительности измерений была использована тестовая стеклянная пластина с малым остаточным углом клина. На рис. 4, *a* представлена интерференционная картина исследуемой тестовой стеклянной пластины, полученная в экспериментальной установке (рис. 1). Записывалась голограмма по методу двух экспозиций [10,11]: 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. При реализации предложенной методики повышения чувствительности измерений клиновидная пластина устанавливалась в специальный держатель, позволяющий осуществлять разворот пластины вокруг нормали к ее поверхности.

На рис. 5 приведен дифракционный спектр с нумерацией порядков дифракции, наблюдаемый на диафрагме 3 (рис. 3) при освещении голограммы 1 коллимированным пучком света, подтверждающий наличие высших порядков дифракции света за счет нелинейной записи голограммы.

На рис. 4, *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  $180^\circ$ , в устройстве оптической обработки голограмм (рис. 3). При получении первой (рис. 4, *b*) интерференционной картины использовались  $\pm 1$ -е, а второй (рис. 4, *c*) —  $\pm 3$ -е порядки дифракции света на голограммах, что позволило повысить чувствительность отображения фазы  $\varphi(x, y)$ , связанной с углом клина  $\gamma$  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. 4, *b* и *c* является увеличение количества интерференционных полос по сравнению с интерферограммой, приведенной на рис. 4, *a*, соответственно в 4 и 12 раз. Максимальная чувствительность отображения фазы  $\varphi(x, y)$  в данной методике определяется максимальными порядками дифракции света на голограммах, при которых еще возможно получение интерференционной картины удовлетворительного качества. В конкретном случае — это  $\pm 3$ -е порядки дифракции. Для полученных голограмм при использовании  $\pm 4$ -х порядков дифракции качество восстановленных интерференционных картин в устройстве оптической обработки голограмм (рис. 3) было уже низкого качества из-за слабой дифракционной эффективности и наличия шумов.

Для извлечения информации о величине угла клина может быть использован достаточно широкий спектр известных алгоритмов цифровой обработки интерферограмм [14].

## Список литературы

- [1] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Макары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [2] *Bhattacharyya D., Ray A., Dutta B.K., Ghosh P.N.* // Opt. Laser Technol. 2002. Vol. 34. N 1. P. 93–96.
- [3] *Chatterjee S.* // Opt. Eng. 2003. Vol. 42. N 11. P. 3235–3238.
- [4] *Chatterjee S., Kumar Y.P.* // Appl. Opt. 2009. Vol. 48. N 8. P. 1598–1605.
- [5] *Мошкин Б.Е., Майоров Б.С.* // Оптика. журн. 2007. Т. 74. № 2. С. 24–27.
- [6] *Chatterjee S., Kumar Y.P.* // Opt. Laser Technology. 2007. Vol. 39. N 3. P. 662–668.
- [7] *Ляликов А.М.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 20. С. 87–94.
- [8] *Буть А.И., Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2010. Т. 109. № 4. С. 696–701.
- [9] *Chatterjee S., Kumar Y.P.* // Opt. Commun. 2011. Vol. 284. N 1. P. 57–63.
- [10] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.* и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.

- [11] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [12] *Коломийцев Ю.В.* Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
- [13] *Ляликов А.М.* Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов. Гродно.: ГрГУ, 2010. 215 с.
- [14] *Malacara D, Servin M., Malacara Z.* Interferogram Analysis For Optical Testing. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2005. 568 p.