

# Повышение чувствительности измерений при формировании сдвиговых интерферограмм прозрачных пластин малой остаточной клиновидности

А.И.Буть, А.М.Ляликов

*Предложена методика повышения чувствительности измерений углов клина прозрачных пластин, основанная на формировании их голографических сдвиговых интерферограмм при сочетании разворота пластины и поочередной настройки интерферограмм в ее изображениях на бесконечно широкую полосу. Повышение чувствительности измерений достигается за счет увеличения количества интерференционных полос в формируемых изображениях клиновидной пластины, что способствует уменьшению погрешности измерений при оптической обработке формируемых интерферограмм. Приведены экспериментальные результаты апробации предложенной методики.*

**Ключевые слова:** большой боковой сдвиг, разворот клиновидной пластины, интерференционная картина, повышение чувствительности.

## 1. Введение

Для определения малых углов клиновидных пластин наибольшее практическое распространение получил способ измерения угла клина с помощью интерферометра Физо [1, 2], признанный наиболее чувствительным и точным. Классическая схема интерферометра Физо, предназначенного для измерения углов клина прозрачных пластин, неоднократно совершенствовалась [3, 4]. При этом в развитии интерферометрических методов измерения малых углов следует выделить две основные тенденции, направленные как на упрощение оптических схем реализации процесса формирования интерференционных картин и процедуры измерения угла клина, так и на повышение точности измерений [3–6]. Создание новых и совершенствование известных методов измерения клиновидности пластин направлено, в первую очередь, 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, а также в лазерной и другой оптоэлектронной технике [7].

Согласно [8–10] повышение чувствительности интерференционного метода приводит к пропорциональному увеличению количества полос в формируемом интерференционном изображении.

Для увеличения количества полос в интерференционном изображении клиновидной пластины может быть использован разворот клина относительно ребра на  $180^\circ$  между последовательной регистрацией интерферограмм. Данный прием был реализован при получении пары интерференционных изображений [2, 5] или при образова-

нии интерференционной картины в интерферометре реверсивного сдвига [4, 6].

Наиболее перспективными в отношении повышения чувствительности измерений при формировании интерференционных изображений клиновидных пластин оказались методы сдвиговой интерферометрии. Формирование пары интерференционных изображений клиновидной пластины в голографической интерферометрии бокового или реверсивного сдвига позволяет уменьшить погрешность измерений за счет удвоения числа интерференционных полос на изображениях пластины [11, 12]. Для снижения погрешности измерений угла клина необходимо использовать специальные приемы, обеспечивающие снижение чувствительности интерферометра к внешним воздействиям [13] и исключающие систематическую составляющую погрешности, связанную с абберациями оптической части устройства [12].

Достижение высокой точности интерферометрических способов измерения обеспечивается возможностью сочетания высокой чувствительности интерферометрии при измерении разности фаз и цифровой обработке интерферограмм. Следует отметить, что минимальная погрешность измерений обеспечивается достижением в формируемой интерференционной картине максимальной чувствительности отображения измеряемого параметра.

В настоящей работе предложен метод повышения чувствительности измерений в голографической интерферометрии бокового сдвига при формировании интерферограмм клиновидных прозрачных пластин в виде пары интерференционных изображений пластины, основанный на сочетании разворота клиновидной пластины и поочередной настройки интерферограмм в изображениях пластины на бесконечно широкую полосу.

Отметим, что данный метод измерения клиновидности применим для пластин с линейным размером в направлении сдвига, не превышающим  $1/3$  диаметра зондирующего светового пучка. Уменьшение погрешности измерений обеспечивается повышением чувствительности метода за счет увеличения количества интерференционных полос на изображениях исследуемой пластины.

А.И.Буть, А.М.Ляликов. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Белоруссия, 230023 Гродно, ул. Ожешко 22; e-mail: amlialikov@grsu.by, lyalikov@inbox.ru

Интерферометрия большого бокового сдвига в случае линейных размеров исследуемого объекта, не превышающих  $1/3$  диаметра зондирующего светового пучка, позволяет формировать несколько интерференционных изображений исследуемого объекта, промодулированных интерференционными полосами, при этом описание интерференционных полос аналогично их описанию в двухлучевой интерферометрии с опорной волной [10, 14].

## 2. Оптическая схема реализации метода

На рис.1 изображена оптическая схема голографического интерферометра, предназначенного для реализации предложенного метода. Излучением гелий-неонового лазера 1, плоским зеркалом 2 и телескопической системой 3, 4 формируется коллимированный зондирующий световой пучок соответствующих размеров. Телескопическая система 6, 7 предназначена для уменьшения (при необходимости) диаметра зондирующего пучка и ввода его в интерферометр бокового сдвига 8, который должен обеспечивать, кроме относительного бокового сдвига между интерферирующими пучками, также регулировку ширины и ориентации полос в интерференционной картине. Оптимальным вариантом, удовлетворяющим этим условиям, является интерферометр на базе классического интерферометра Маха–Цендера [15]. Как было отмечено выше, линейные размеры исследуемой клиновидной пластины 5 в направлении бокового сдвига не должны превышать  $1/3$  диаметра зондирующего светового пучка.

Для исключения систематической погрешности измерений, вызванных aberrациями оптической системы, интерферометр снабжен опорной голограммой 9, которая записывается в плоскости, оптически сопряженной с зоной размещения исследуемого объекта 5. Система пространственной фильтрации образована объективом 10 и диафрагмой 11 с отверстием и предназначена для выделения интерферирующих волн, дифрагировавших на голограмме 9 в первый и нулевой порядки. Выделенные в процессе фильтрации волны образуют в плоскости 12, оптически сопряженной с голограммой 9 и пластиной 5, интерференционную картину. Компенсация aberrаций при ее образовании происходит таким же образом, как и в голографической интерферометрии в реальном масштабе времени [16]. При выполнении измерительных операций визуальным способом в плоскости 12 размещают матовый экран, а при цифровой обработке интерферограммы – матрицу ПЗС.

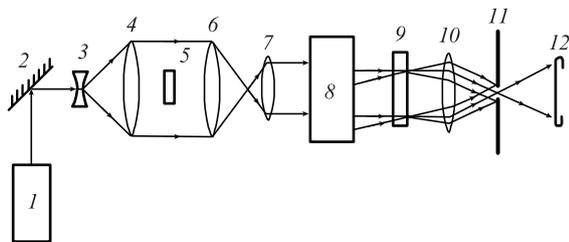


Рис.1. Оптическая схема голографического интерферометра бокового сдвига:

1 – гелий-неоновый лазер; 2 – зеркало; 3, 4 – телескопическая система; 5 – исследуемая клиновидная пластина; 6, 7 – телескопическая система; 8 – малогабаритный интерферометр бокового сдвига; 9 – опорная голограмма; 10 – объектив; 11 – диафрагма с отверстием; 12 – плоскость наблюдения интерференционной картины.

Метод повышения чувствительности измерений в голографической интерферометрии бокового сдвига реализуется в несколько этапов.

## 3. Запись опорной голограммы клиновидной пластины

На первом этапе в схему (рис.1) в центральную зону зондирующего светового пучка помещают клиновидную пластину 5. В интерферометре 8 задают боковой сдвиг  $s$  между интерферирующими пучками на выходе интерферометра, превышающий линейные размеры исследуемой пластины 5, и в плоскости 9 записывают опорную голограмму клиновидной пластины.

Клиновидную пластину 5 размещают таким образом, чтобы ось зондирующего пучка была перпендикулярна ее поверхности. Максимальный сдвиг  $s$  не должен превышать  $\frac{1}{3}D$ , где диаметр зондирующего светового пучка между объективами 4 и 6. В этом случае метод может применяться для измерения клиновидности пластин с линейными размерами вдоль направления сдвига до  $\frac{1}{3}D$  включительно.

Угол голографирования между интерферирующими пучками при записи голограммы 9 выбирают с учетом того, чтобы несущая частота  $\xi$  полос голограммы была не менее 10 лин/мм. Это условие является практической рекомендацией [16], обеспечивающей пространственное разделение нулевого и первого порядков дифракции и соответственно позволяющее выделить отверстием в диафрагме 11 необходимые дифрагировавшие пучки.

Выберем систему координат  $xuz$  следующим образом. Оси  $x$  и  $z$  расположим так, чтобы ось  $x$  совпала с направлением сдвига волновых фронтов в интерферометре 8, а  $z$  – с направлением распространения зондирующего светового пучка. На рис.2,а представлены контуры зондирующего светового пучка (круг) и исследуемой клиновидной пластины (многоугольник), а на рис.2,б – контуры интерферирующих световых пучков и изображения клиновидной пластины в плоскости записи опорной голограммы 9.

Для упрощения математических выкладок при описании метода предположим, что ребро клина пластины ориентировано параллельно оси  $x$ . В этом случае после прохождения зондирующей световой волной клиновидной пластины (рис.2,а) фазу световой волны  $\Phi_1(x, y)$  можно описать следующим образом:

$$\Phi_1(x, y) = \begin{cases} 2\pi y + \varepsilon(x, y) & \text{для зоны 2,} \\ \varepsilon(x, y) & \text{для зон 1 и 3,} \end{cases} \quad (1)$$

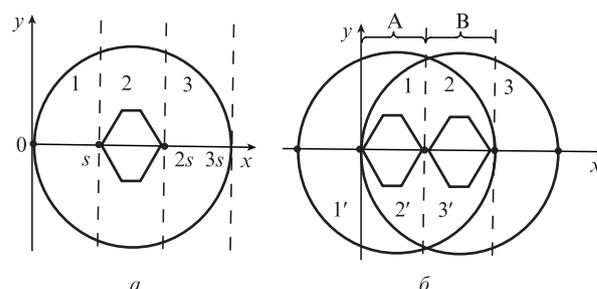


Рис.2. Изображение контуров зондирующего светового пучка (круг) и исследуемой клиновидной пластины (многоугольник) после прохождения клиновидной пластины (а) и в плоскостях опорной голограммы и наблюдения интерференционной картины (б).

где  $\varepsilon(x, y)$  – искажения фазы абберациями оптической системы формирования зондирующего светового пучка;  $2\pi\eta y$  – изменение фазы, вызванное клиновидной пластиной;  $\eta = \alpha/\lambda$ ;  $\alpha$  – угол отклонения светового пучка клиновидной пластиной (для случая малых углов клина);  $\lambda$  – длина волны источника света. Величина  $\alpha$  определяется углом клина  $\gamma$  и показателем преломления  $n$  материала пластины [17]:  $\alpha \approx \gamma(n - 1)$ .

В интерферометре 8 (рис.1) зондирующая световая волна разделяется по амплитуде на две. В плоскости записи опорной голограммы 9 при наложении двух волн образуется интерференционная структура в виде полос (рис.2,б), одна из которых смещена вдоль оси относительно другой на величину  $s$ . Фазы интерферирующих волн в плоскости голограммы 9 для случая ориентации интерференционных полос параллельно оси  $y$  можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{11}(x, y) = \begin{cases} 2\pi(\xi x + \eta y) + \varepsilon(x, y) + \varepsilon_1(x, y) & \text{для зоны 2,} \\ 2\pi\xi x + \varepsilon(x, y) + \varepsilon_1(x, y) & \text{для зон 1 и 3,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Phi_{12}(x, y) = \begin{cases} 2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_2(x, y) & \text{для зоны 2',} \\ \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_2(x, y) & \text{для зон 1' и 3',} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\xi$  – несущая частота полос голограммы;  $\varepsilon_1(x, y)$  и  $\varepsilon_2(x, y)$  – искажения фазы абберациями вследствие прохождения первого и второго световых пучков по разным путям в интерферометре. Волны с фазами вида (2) и (3) накладываются, и в областях А и В (рис.2,б) формируют опорную голограмму клиновидной пластины при наложении соответствующих зон первого и второго интерферирующих пучков с фазами (2) и (3). Период интерференционных полос голограммы равен  $1/\xi$ . Амплитудное пропускание опорной голограммы клиновидной пластины можно представить в следующем виде:

$$\tau(x, y) \sim \begin{cases} 1 + \cos[2\pi(\xi x + \eta y) + \varepsilon(x, y) - \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_1(x, y) - \varepsilon_2(x, y)] & \text{для области А,} \\ 1 + \cos[2\pi(\xi x - \eta y) + \varepsilon(x, y) - \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_1(x, y) - \varepsilon_2(x, y)] & \text{для области В.} \end{cases} \quad (4)$$

Величина  $[\varepsilon(x, y) - \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_1(x, y) - \varepsilon_2(x, y)]$  определяется абберациями оптической схемы, записанными на опорной голограмме.

После записи и обработки опорной голограммы она устанавливается на прежнее место. Точность установки определяется по совмещению пары изображений клиновидной пластины, сформированных объективами 6, 7, с изображениями пластины, зафиксированными на голограмме 9, а также по возникновению в плоскости наблюдения интерференционной картины 12 бесконечно широкой полосы (равномерной по всему полю освещенности), которая образуется при освещении опорной голограммы 9 волнами с фазами вида (2), (3) и при выделении отверстием в диафрагме 11 пары световых волн; последние сфокусированы объективом 10 и распространяются строго вдоль оси  $z$ . При правильной установке опорной голограммы в плоскости 12 наблюдается безабберационная интерференционная картина в виде равномерно освещенного поля. При незначительном изменении направления одного из освещающих опорную голограмму световых пучков в интерференционной картине будут возникать полосы конечной ширины [16].

#### 4. Повышение чувствительности измерений за счет разворота клиновидной пластины

После записи опорной голограммы и настройки интерферометра до получения интерференционной картины в полосах бесконечной ширины клиновидную пластину 5 разворачивают относительно нормали (ось  $z$ ) на угол  $180^\circ$ . В этом случае после прохождения зондирующей световой волной развернутой клиновидной пластины знак в выражении (1) перед изменением фазы  $2\pi\eta y$  изменится на противоположный и фазы волн, освещающих опорную голограмму 9, примут соответствующий вид:

$$\Phi_{21}(x, y) = \begin{cases} 2\pi(\xi x - \eta y) + \varepsilon(x, y) + \varepsilon_1(x, y) & \text{для зоны 2,} \\ 2\pi\xi x + \varepsilon(x, y) + \varepsilon_1(x, y) & \text{для зон 1 и 3,} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Phi_{22}(x, y) = \begin{cases} -2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_2(x, y) & \text{для зоны 2',} \\ \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_2(x, y) & \text{для зон 1' и 3'.} \end{cases} \quad (6)$$

При освещении голограммы 9 с пропусканием (4) световыми волнами с фазами (5) и (6) по нормали к голограмме будут распространяться две волны. Первая формируется при дифрагировании в первый порядок волны с фазой (5), и ее фаза

$$\Phi_{31}(x, y) = \begin{cases} 2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_2(x, y) & \text{для области А,} \\ -4\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) + \varepsilon_2(x, y) & \text{для области В.} \end{cases} \quad (7)$$

Вторая волна формируется при дифрагировании в нулевой порядок волны с фазой (6). Поскольку эта волна является «прямопрошедшей», ее фаза определяется выражением (6).

Данная пара волн фокусируется объективом 10, выделяется отверстием в диафрагме 11 и в плоскости 12 образует интерференционную картину в полосах бесконечной

ширины в виде пары изображений клиновидной пластины, промодулированных интерференционными полосами. Распределение освещенности в данной картине

$$I(x, y) \sim \begin{cases} 1 + \cos(4\pi\eta y) & \text{для области А,} \\ 1 + \cos(-4\pi\eta y) & \text{для области В.} \end{cases} \quad (8)$$

По поведению полос в областях зон А и В интерференционная картина вида (8) ничем не отличается от интерференционной картины, полученной в двухлучевом однопроходном интерферометре.

Из сравнения выражений (8) и (1) видно, что вследствие разворота клиновидной пластины происходит удвоение чувствительности измерений при формировании в реальном масштабе времени безабберационных интерференционных изображений клиновидной пластины. Данный эффект проявляется в удвоении числа полос на левом (область А) и правом (область В) изображениях клиновидной пластины и, как следствие, к уменьшению в два раза периода интерференционных полос по сравнению с их периодом в случае использования метода двухлучевой или сдвиговой интерферометрии. Период интерференцион-

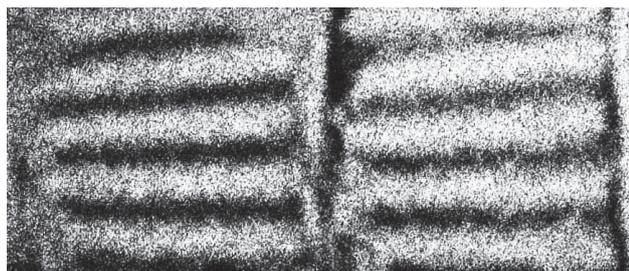


Рис.3. Интерференционное изображение клиновидной пластины при настройке интерферометра на полосы бесконечной ширины, полученное после разворота клиновидной пластины на 180°.

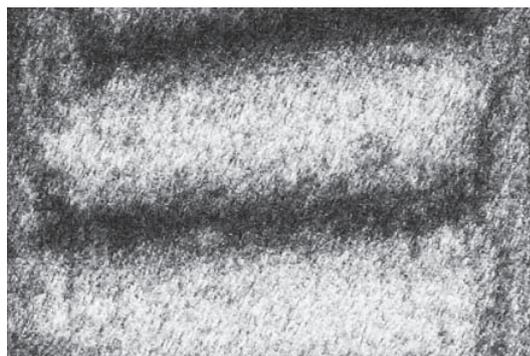


Рис.4. Интерференционное изображение клиновидной пластины при настройке интерферометра на полосы бесконечной ширины, полученное в двухлучевом интерферометре Маха–Цендера с опорной волной.

ных полос, модулирующих изображения клиновидной пластины, из (8) определится как

$$P = \frac{\lambda}{2\gamma(n-1)}. \tag{9}$$

При экспериментальной реализации предложенного метода повышения чувствительности измерений при формировании интерференционных изображений клиновидной пластины путем разворота пластины на угол 180° клиновидная пластина 5 устанавливалась в специальный держатель, позволяющий осуществлять контролируемый разворот пластины вокруг нормали к ее поверхности. Ребро клина пластины ориентировалось горизонтально. На рис.3 представлена интерференционная картина в виде пары изображений пластины, промодулированных горизонтальными полосами, наблюдаемая в плоскости I2 после разворота клиновидной пластины 5 на угол 180°. На рис.4 представлена интерференционное изображение той же пластины, полученное в двухлучевом интерферометре Маха–Цендера с опорной волной.

### 5. Повышение чувствительности путем изменения настройки полос

Поскольку изменения фаз в выражении (8) имеют противоположные знаки, для дальнейшего повышения чувствительности измерений при формировании пары интерференционных изображений клиновидной пластины можно использовать подход, предложенный в работах [10, 11]. Сущность его заключается в поочередной настройке полос в областях А и В, ограниченных контурами изображений исследуемой клиновидной пластины, до получения бесконечно широкой полосы. Таким образом, для

оптической обработки поочередно формируются две интерферограммы в виде парных изображений клиновидной пластины.

Для получения бесконечно широкой полосы в области А при формировании первой интерферограммы и в области В – второй (см. рис.2,б), можно изменить направление распространения только освещающей голограмму 9 первой волны, фаза которой описывается выражением (5), оставив направление распространения второй волны с фазой, описываемой выражением (6), без изменения. Можно показать [11], что в этом случае формируется первая интерферограмма с распределением освещенности

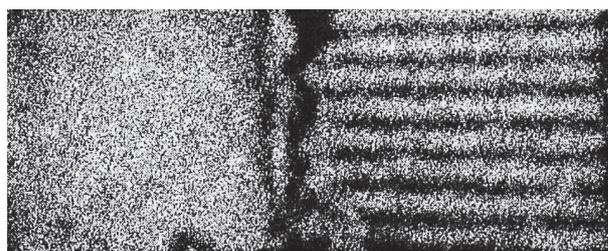
$$I_1(x,y) \sim \begin{cases} \text{const} & \text{для области А,} \\ 1 + \cos(-8\pi\eta y) & \text{для области В.} \end{cases} \tag{10}$$

Изменив соответствующим образом направление распространения освещающей голограмму 9 первой волны, фаза которой описывается выражением (5), и оставив направление распространения второй волны с фазой, описываемой выражением (6), без изменения, можно сформировать также вторую интерферограмму с настройкой в области В бесконечно широкой полосы:

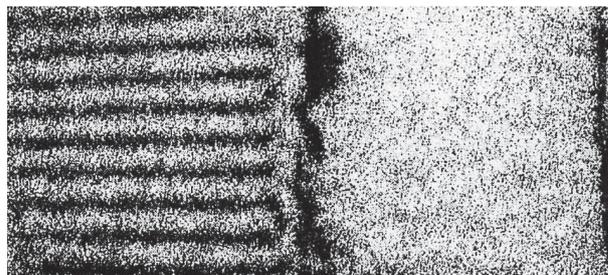
$$I_2(x,y) \sim \begin{cases} 1 + \cos(8\pi\eta y) & \text{для области А,} \\ \text{const} & \text{для области В.} \end{cases} \tag{11}$$

Из выражений (10) и (11) видно, что при поочередном достижении бесконечно широкой интерференционной полосы в области А изображения пластины для первой (10) и в области В – для второй (11) интерферограмм, в других областях интерферограммы формируются изображения пластины с удвоенным количеством полос по сравнению с интерферограммой (8). Период полос в этом случае определится как

$$P_{1,2} = \frac{\lambda}{4\gamma(n-1)}. \tag{12}$$



а



б

Рис.5. Интерференционные картины при настройках на бесконечно широкую полосу в областях левого (а) и правого (б) изображений клиновидной пластины.

Для измерения угла клина поочередно получают интерференционные картины (10) и (11) и определяют на них периоды полос  $P_1$  и  $P_2$ . Независимо от способа обработки (визуальная или цифровая) интерферограмм (10) и (11), увеличение количества интерференционных полос приводит, как показано в работе [11], к уменьшению относительной погрешности измерения угла клина.

На рис.5 представлены первая (рис.5,а) и вторая (рис.5,б) интерферограммы, полученные по рассмотренной методике, подтверждающие эффект повышения чувствительности измерений при формировании интерференционных картин за счет перенастройки полос в изображениях клиновидной пластины. Представленные интерферограммы получены в плоскости  $I_2$  (см. рис.1) после перенастройки интерференционной картины, приведенной на рис.3.

## 6. Заключение

Таким образом, предложенный метод повышения чувствительности измерений в голографической интерферометрии бокового сдвига при формировании интерферограмм клиновидных прозрачных пластин в виде пары интерференционных изображений пластины, основанный на сочетании разворота клиновидной пластины и поочередной настройки интерферограмм в изображениях пластины на бесконечно широкую полосу, позволяет независимо от способа обработки интерферограмм уменьшать погрешность измерений по сравнению с погрешно-

стями измерений традиционными интерферометрическими методами. Следует отметить, что данный метод может быть использован также в интерферометрах бокового сдвига с двукратным прохождением светового пучка через клиновидную пластину.

1. *Оптические измерения*. Под ред. Д.Т.Пуряева (М.: Машиностроение, 1987).
2. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д. Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
3. Bhattacharyya D., Ray A., Dutta V.K., Ghosh P.N. *Opt. Las. Technol.*, **34**, 93(2002).
4. Chatterjee S. *Opt. Eng.*, **42**, 3235 (2003).
5. Мошкин Б.Е., Майоров Б.С. *Оптич. журн.*, **74**, 24 (2007).
6. Chatterjee S., Kumar Y.P. *Opt. Las. Technol.*, **39**, 662 (2007).
7. Сеник Б.Н., Бельский А.Б., Потелов В.В. *Оптич. журн.*, **76** (5) (2009).
8. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. *Голографическая интерферометрия* (М.: Наука, 1977).
9. Зейликович И.С., Ляликов А.М. *УФН*, **161**, 143 (1991).
10. Ляликов А.М. *Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Гродно: Изд-е ГрГУ, 2010).
11. Ляликов А.М. *Письма в ЖТФ*, **36**, 87 (2010).
12. Буть А.И., Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **109**, 696 (2010).
13. Chatterjee S, Kumar Y.P. *Opt. Commun.*, **284**, 57 (2011).
14. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **99**, 151 (2005).
15. Коломийцев Ю.В. *Интерферометры. Основы инженерной теории. Применение* (Л.: Машиностроение, 1976).
16. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).
17. Бегунов Б.Н. *Геометрическая оптика* (М.: изд-во МГУ, 1966).