

# Высокочувствительный интерферометрический контроль качества дифракционных элементов

А.М.Ляликов

*Показана перспективность применения интерферометрии большого бокового сдвига для контроля качества дифракционных элементов. При этом используются два дифракционных элемента, один из которых является исследуемым, а другой – эталонным. Предложено универсальное устройство, позволяющее контролировать качество дифракционных элементов как пропускающего, так и отражательного типа. Приведены результаты экспериментальной реализации методики для контроля качества изготовления двумерных амплитудных масок и отражательных дифракционных решеток.*

**Ключевые слова:** интерферометр, дифракционный элемент, большой боковой сдвиг, интерференционная картина, повышение чувствительности.

## 1. Введение

Разнообразные дифракционные элементы, выполненные в виде пространственных периодических структур, в последнее время нашли широкое применение в измерительной технике в качестве оптических элементов [1]. Периодические структуры, сформированные на исследуемом объекте в виде измерительных решеток или используемые в различных оптических приборах [2, 3], должны отвечать определенным метрологическим требованиям [4]. Эти требования подразумевают необходимость соответствия качества штрихов такой структуры эталону.

Наиболее точными методами контроля качества периодических структур являются интерферометрический метод и его голографические варианты [5–8].

Интерферометрия большого бокового сдвига в случае превышения величины сдвига поперечных размеров исследуемого объекта нашла практическое применение при исследовании оптических неоднородностей фазовых объектов [9, 10]. В работах [11–14] рассмотрены различные подходы, способствующие повышению чувствительности отображения оптических неоднородностей фазовых объектов для голографического варианта интерферометрии большого бокового сдвига.

В настоящей работе показана перспективность применения интерферометрии большого бокового сдвига для контроля качества дифракционных элементов, в процессе которого происходит сравнительный анализ двух дифракционных элементов, один из которых является контролируемым, а другой – эталонным.

## 2. Устройство интерферометрического контроля

На рис.1 представлена оптическая схема устройства, позволяющая проводить интерферометрический контроль качества дифракционных элементов пропускающего и отражательного типа.

Коллимированный зондирующий световой пучок формируется лазерным источником света 1, зеркалом 2 и телескопической системой 3, 4. Необходимо отметить, что к качеству оптических элементов телескопической системы, предназначенной для формирования плоского волнового фронта, предъявляются высокие требования. Вследствие того что эталонный и контролируемый дифракционные элементы как пропускающего, так и отражательного типа (5, 6 и 7, 8 соответственно) размещены в

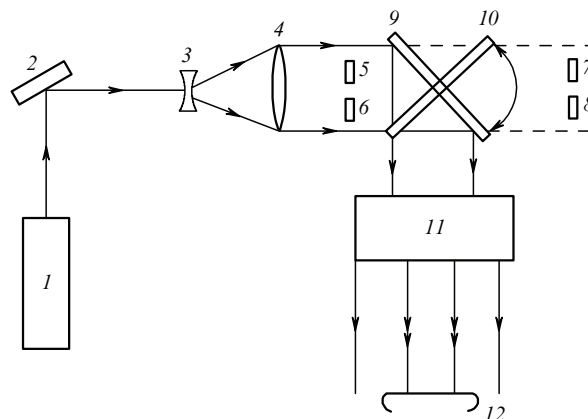


Рис.1. Оптическая схема устройства интерферометрического контроля качества дифракционных элементов:

1 – лазерный источник света; 2 – зеркало; 3, 4 – телескопическая система; 5, 6 и 7, 8 – эталонные и контролируемые дифракционные элементы пропускающего и отражательного типов соответственно; 9, 10 – положения полупрозрачного зеркала в режимах контроля качества элементов пропускающего и отражательного типов соответственно; 11 – интерферометр бокового сдвига; 12 – плоскость интерференционной картины.

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

Поступила в редакцию 21 октября 2008 г., после доработки – 12 октября 2010 г.

различных частях волнового фронта зондирующего пучка, для получения высококачественных интерференционных картин излучение источника света  $1$  должно иметь высокую степень пространственной когерентности. Для интерферометрического контроля был использован гелий-неоновый лазер ЛГН-212, излучающий на длине волны 633 нм.

Часть зондирующего светового пучка посредством разворота полупрозрачного зеркала перестраивается для контроля качества дифракционных элементов как пропускающего (положение  $9$ ), так и отражательного (положение  $10$ ) типа. В первом случае зондирующий световой пучок после прохождения через эталонный и контролируемый элементы  $5$  и  $6$  направляется полупрозрачным зеркалом  $9$  в интерферометр  $11$ , реализующий большой боковой сдвиг, превышающий линейные размеры оптических элементов.

При экспериментальной реализации в качестве интерферометра большого бокового сдвига использовался малогабаритный интерферометр [8,9] на основе четырех зеркал (рис.2). Интерферометр был дополнен оптической системой пространственной фильтрации, традици-

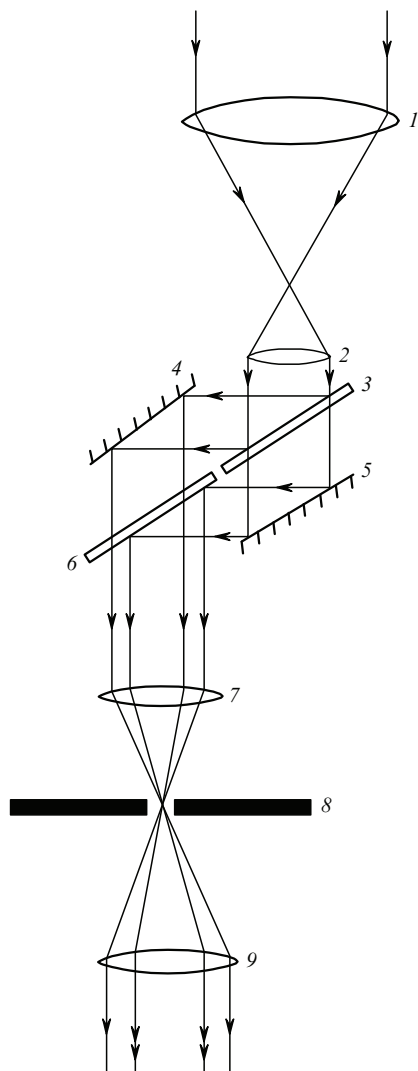


Рис.2. Схема интерферометра бокового сдвига:  $1, 2$  — объективы телескопической системы;  $3-6$  — зеркала интерферометра;  $7, 9$  — объективы оптической системы пространственной фильтрации;  $8$  — диафрагма с отверстием.

онно выполненной [15] в виде двух объективов  $7, 9$  и диафрагмы  $8$  с отверстием. Данная система предназначалась для выделения из всего набора пучков света, дифрагировавших на эталонном и контролируемом элементах в разные порядки дифракции, только двух пучков, дифрагировавших на этих элементах в один и тот же порядок. Телескопическая система  $1, 2$ , расположенная на входе в интерферометр, служила для уменьшения диаметра светового пучка.

При контроле качества дифракционных элементов отражательного типа зондирующий световой пучок проходит через полупрозрачное зеркало (рис.1) и дифрагирует на эталонном и контролируемом элементах  $7$  и  $8$ . Дифрагировавшие пучки полупрозрачным зеркалом  $10$  направляются в интерферометр  $11$ .

### 3. Описание методики интерферометрического контроля

При реализации методики эталонный (М) и контролируемый (С) дифракционные элементы  $5$  и  $6$  или  $7$  и  $8$  (рис.1) пропускающего или отражательного типа соответственно размещаются в разных половинах сечения (зоны 1 и 2) зондирующего светового пучка, как показано на рис.3,а. Совместим систему координат  $xy$  с плоскостями эталонного и контролируемого дифракционных элементов (рис.3,а). Предположим, что оптической системой формируется объектная волна с плоским волновым фронтом. В этом случае aberrациями оптической системы контроля можно пренебречь. Если данное условие не выполнимо, то систематическую составляющую погрешности, возникающую из-за aberrаций волнового фронта, для обеспечения достоверности контроля необходимо учитывать.

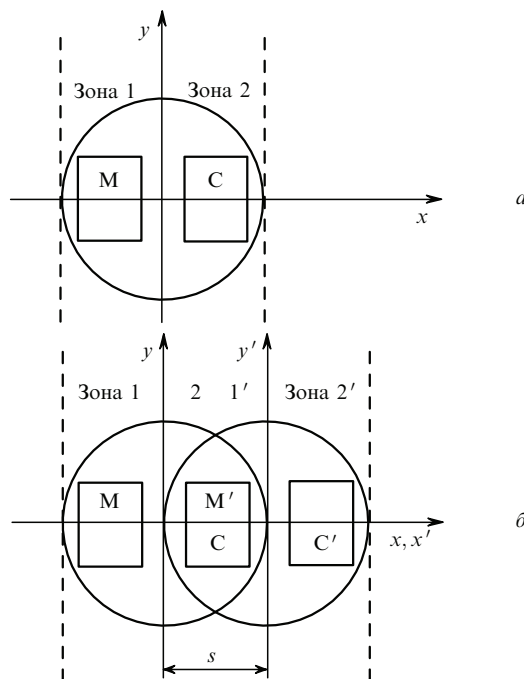


Рис.3. Схематические изображения сечения светового пучка (круг), а также контуров эталонного (М) и контролируемого (С) дифракционных элементов (прямоугольники) после прохождения через эти элементы светового пучка (а) и при наложении в плоскости образования интерференционной картины первого и второго интерферирующих световых пучков, сдвинутых в пространстве на величину  $s$  (б).

Для упрощения описания методики предположим, что проекции штрихов периодических структур дифракционных элементов на плоскость  $xu$  ориентированы параллельно оси  $x$ . Представим выражения для амплитудных коэффициентов пропускания (или отражения) контролируемого и эталонного дифракционных элементов в виде

$$\tau_{m,c}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp \left[ \frac{2\pi ny}{P} + n\varphi_{m,c}(x, y) \right], \quad (1)$$

где параметры с индексом «m» относятся к эталонному элементу, а с индексом «c» – к контролируемому;  $a_n$  – коэффициенты;  $n$  – порядок дифракции;  $P$  – средний период проекции структур на плоскость  $xu$ ;  $\varphi_{m,c}(x, y)$  – функции, определяющие отклонение периодов проекций структур контролируемого и эталонного элементов от среднего периода  $P$ . Очевидно, что разность функций  $\varphi_m(x, y) - \varphi_c(x, y)$  может быть использована для оценки отклонения параметров периодической структуры контролируемого элемента от параметров эталонного.

Зондирующий световой пучок после прохождения через дифракционные элементы или отражения от них представляет собой набор дифрагировавших пучков, которые распространяются под различными углами к оптической оси устройства, определяемыми пространственными частотами пучков  $\eta_n$ . Выражение для фазы  $\Phi_n(x, y)$  любой световой волны удобней всего представить в виде отдельных выражений для каждой из зон (номера зон указаны на рис.3,а):

$$\Phi_n(x, y) = \begin{cases} 2\pi\eta_n y + n\varphi_m(x, y) & \text{для зоны 1,} \\ 2\pi\eta_n y + n\varphi_c(x, y) & \text{для зоны 2,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\eta_n = \cos \alpha_n / \lambda$ ;  $\alpha_n$  – угол между направлением распространения пучка, дифрагировавшего в  $n$ -й порядок, и осью  $y$ ;  $\lambda$  – длина волны.

Рассмотрим особенности образования интерференционной картины. Для первого светового пучка, выделенного оптической системой пространственной фильтрации в интерферометре 11 (рис. 1), систему координат  $xu$  и обозначение контуров оптических элементов оставим прежними, как и на рис.3,а. Для второго пучка, выделенного оптической системой пространственной фильтрации, введем систему координат  $x'y'$  и обозначим контуры эталонного и контролируемого дифракционных элементов соответственно  $M'$  и  $C'$ . Предположим, что первый световой пучок распространяется строго вдоль оптической оси устройства, а второй – под некоторым небольшим углом  $\beta$  к оси первого пучка. Выражения для комплексных амплитуд световых волн, сформированных в интерферометре и выделенных оптической системой пространственной фильтрации, в этом случае можно представить в системах координат  $xu$  и  $x'y'$ :

$$A(x, y) \propto \begin{cases} 1 + \exp\{i[\varphi_m(x, y)]\} & \text{для зоны 1,} \\ 1 + \exp\{i[\varphi_c(x, y)]\} & \text{для зоны 2,} \end{cases} \quad (3)$$

$$A'(x', y') \propto \begin{cases} 1 + \exp\{i[(2\pi/\lambda)(x' \cos \alpha + y' \cos \beta) + \varphi_m(x', y')]\} & \text{для зоны 1',} \\ 1 + \exp\{i[(2\pi/\lambda)(x' \cos \alpha + y' \cos \beta) + \varphi_c(x', y')]\} & \text{для зоны 2',} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – углы между направлением распространения второго светового пучка и осями  $x'$  и  $y'$  соответственно. Выражения для комплексной амплитуды второй световой волны (4) в системе координат  $xu$  можно преобразовать к виду

$$A'(x, y) \propto \begin{cases} 1 + \exp\{i[(2\pi/\lambda)(x \cos \alpha + y \cos \beta) + \varphi_m(x - s, y)]\} & \text{для зоны 1',} \\ 1 + \exp\{i[(2\pi/\lambda)(x \cos \alpha + y \cos \beta) + \varphi_c(x - s, y)]\} & \text{для зоны 2'.} \end{cases} \quad (5)$$

При реализации контроля качества элементов величина бокового сдвига  $s$  выбирается равной расстоянию между центрами эталонного (М) и контролируемого (С) дифракционных элементов (рис.3,б). Другими словами, сдвиг  $s$  должен быть таким, чтобы в плоскости наблюдения 12 (рис.1) интерференционной картины происходило точное совмещение сформированного первым пучком света изображения контролируемого элемента С и сформированного вторым пучком изображения эталонного элемента  $M'$  (рис.3,б). Таким образом, в плоскости 12 происходит наложение двух световых волн, описываемых выражениями (3) и (5), с образованием интерференционной картины в совмещенных зонах 2 и 1' для первого и второго световых пучков соответственно. Распределение интенсивности света  $I(x, y)$  в интерференционной картине в плоскости 12 определяется выражением

$$I(x, y) = [A(x, y) + A'(x, y)][A^*(x, y) + A'^*(x, y)]. \quad (6)$$

С учетом образования интерференционной картины только в совмещенных зонах 2 и 1' согласно выражениям (3), (5) и (6) получим распределение интенсивности

$$I(x, y) \sim 1 + \cos[2\pi(\xi x + \eta y) + \delta\varphi], \quad (7)$$

где  $\xi = \cos \alpha$  и  $\eta = \cos \beta / \lambda$  – параметры, характеризующие ширину и ориентацию полос интерференционной картины, которые определяются согласно (5) направлением распространения второго светового пучка;  $\delta\varphi = |\varphi_m(x, y) - \varphi_c(x, y)|$ . Распределение (7) характеризует отличия контролируемого дифракционного элемента от эталонного, которые определяются распределением фазы  $\delta\varphi$ .

Для повышения достоверности контроля желательно получать несколько интерференционных картин с различной настройкой полос, определяемой параметрами  $\xi$  и  $\eta$ . Получение интерференционной картины в полосах бесконечной ширины соответствует  $\xi = 0$  и  $\eta = 0$ . Для настройки интерференционных полос строго горизонтально необходимо выполнить условие  $\xi = 0$ , а строго вертикально – условие  $\eta = 0$ . Ширины полос  $P_y$  и  $P_x$  для двух последних частных случаев будут определяться соответственно параметрами  $\eta$  и  $\xi$ , т. е.  $P_y = \lambda / \cos \beta$  и  $P_x = \lambda / \cos \alpha$ .

Выше было отмечено, что при получении интерференционной картины в плоскости 12 (рис.1) должно происходить точное совмещение сформированных первым и вторым пучками света соответственно изображений контролируемого элемента С и эталонного элемента  $M'$  (рис.3,б). Допустимая неточность совмещения изображений элементов С и  $M'$  в плоскости  $xu$  может быть определена из условия, при котором данное смещение приводит к изгибу интерференционной полосы на величину не более 0.1 периода.

#### 4. Экспериментальная реализация метода контроля

Рассмотренный метод интерферометрического контроля был опробован для дифракционных элементов как пропускающего, так и отражательного типа.

Был осуществлен контроль качества амплитудных масок, представляющих собой двумерную периодическую структуру в виде натянутых тонких нитей толщиной 40 мкм, расположенных крестообразно. Данные дифракционные элементы использовались в качестве измерительных решеток, предназначенных для исследования фазовых объектов методом расфокусированной решетки [16], а также для визуализации формы и поверхности методом проекции полос [17]. Изготовление дифракционных решеток из металла позволяло в дальнейшем применять в измерительных системах мощные источники излучения.

Средний период структур составлял 165 мкм. Для обеспечения высокого качества амплитудной маски требовался контроль соответствия периода структур периоду эталонной амплитудной маски. На рис.4 приведен дифракционный спектр такой крестообразной решетки, наблюдаемый в задней фокальной плоскости объектива при освещении решетки когерентным светом. Устройство интерферометрического контроля настраивалось для работы в режиме контроля качества пропускающих дифракционных элементов, т. е. полупрозрачное зеркало устанавливалось в положение 9 (рис.1). Размеры эталонной и контролируемых амплитудных масок составляли  $140 \times 110$  мм. На рис.5 представлены интерференционные картины в полосах конечной ширины, отображающие поведение разности функций  $\varphi_m(x, y) - \varphi_c(x, y)$  для дифракционной решетки, образованной вертикальными нитями.

Первая интерференционная картина (рис.5,а) получена по вышеописанной методике при выделении оптической системой пространственной фильтрации +1-х, а вторая (рис.5,б) – при выделении +3-х порядков дифракции, расположенных на горизонтальной прямой в спектре дифракционной решетки (рис.4). Чувствительность отображения разности  $\varphi_m(x, y) - \varphi_c(x, y)$  в последнем случае повышена в три раза, что подтверждается пропорционально большим изгибом интерференционных полос в центральной зоне изображения совмещенных масок. Вторая интерферограмма позволяет с большей точностью определить отличие в расположении нитей в исследуемой структуре от их расположения в эталонной структуре. Например, из интерференционных картин следует, что в некоторых областях центральной зоны исследуемой амплитудной маски это отличие составляет  $\sim 80$  мкм.

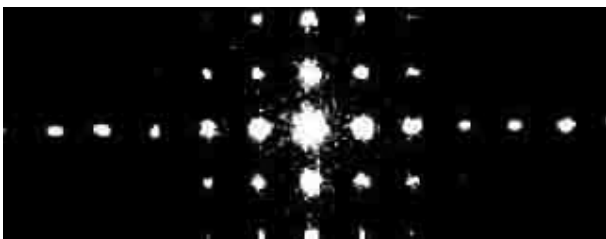


Рис.4. Дифракционный спектр контролируемой двумерной пропускающей дифракционной решетки.

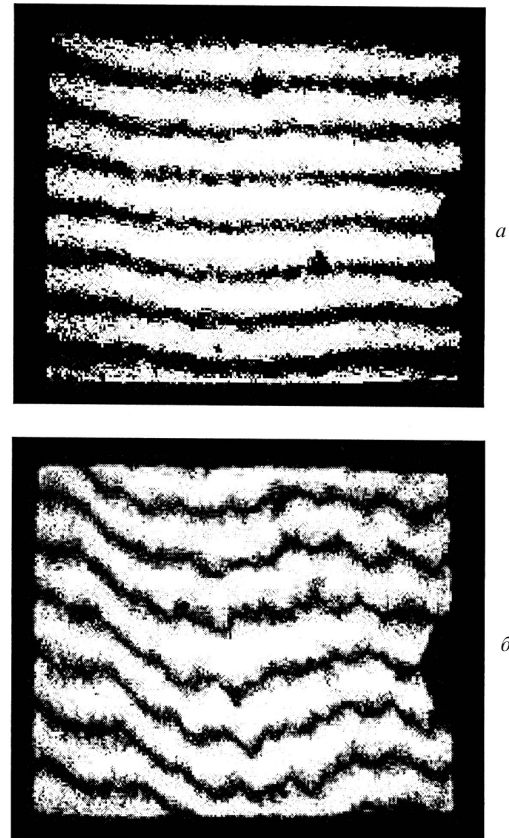


Рис.5. Интерференционные картины, отображающие с различной чувствительностью отличия контролируемой дифракционной решетки от эталонной. Картины получены при выделении оптической системой пространственной фильтрации +1-х (а) и +3-х (б) порядков дифракции.

Также был осуществлен контроль качества дифракционных решеток отражательного типа, предназначенных для формирования в осветительных устройствах системы пространственно расходящихся световых пучков. Кроме выравнивания дифракционной эффективности дифракционных порядков данный дифракционный элемент должен был обеспечивать формирование волнового фронта определенной формы. На рис.6 приведены результаты интерферометрического контроля качества дифракционной решетки отражательного типа по вышеописанной методике. При получении интерференционных картин использовались +4-е порядки дифракции. Были получены интерференционные картины с различной настройкой полос, подтверждающие необходимость повышения чувствительности в процессе контроля, особенно при визуализации малых отличий контролируемого элемента от эталонного. На интерференционной картине в полосах бесконечной ширины (рис.6,а) различие форм волновых фронтов, сформированных в +4-х порядках контролируемым и эталонным дифракционными элементами, визуально не обнаруживается. При удачном выборе настройки полос, в данном случае это полосы конечной ширины, расположенные горизонтально, в нижней части контролируемого дифракционного элемента виден незначительный дефект, проявляющийся как искривление интерференционной полосы (рис.6,б). Такое искривление соответствует отклонению волнового фронта пучка, дифрагировавшего в +4-й порядок, от эталонного волнового фронта пучка, дифрагировавшего в тот

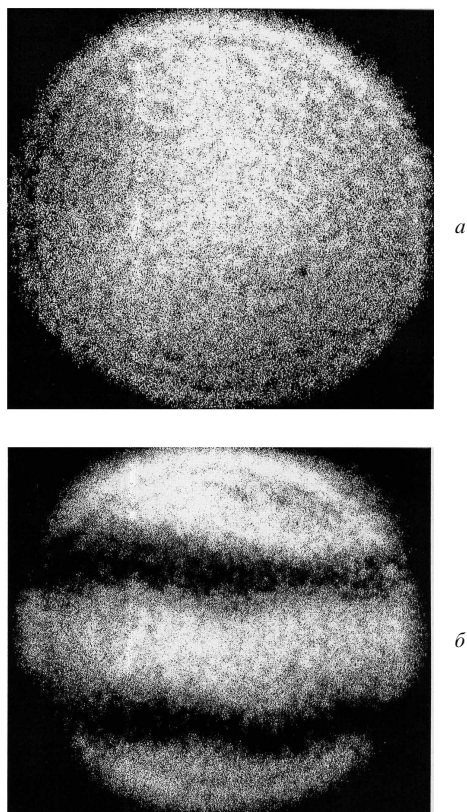


Рис.6. Интерференционные картины, отображающие отклонение волнового фронта, сформированного контролируемой дифракционной решеткой в +4-м порядке, от фронта, сформированного в том же порядке эталонной решеткой. Картины получены в полосах бесконечной (а) и конечной (б) ширины.

же порядок, на  $\sim 0.1\lambda$ . Следует отметить, что при интерферометрическом контроле качества данного дифракци-

онного элемента с использованием более низких порядков дифракции указанный дефект не обнаруживался.

## 5. Заключение

Таким образом, разработанная методика и универсальное устройство интерферометрического контроля качества дифракционных элементов позволяют сравнительно просто реализовать контроль качества элементов как пропускающего, так и отражательного типа и могут использоваться в производственных условиях. Эта методика может также с успехом применяться для аттестации дифракционных элементов.

1. Полещук А.Г., Коронкевич В.П., Корольков В.П., Седухин А.Г. *Компьютерная оптика*, **22**, 86 (2002).
2. Shi Ling, Grunder K.P., Klingelhoffner H. *Meas. Sci. Technol.*, **9**, 739 (1998).
3. Фаттахов Я.В., Галляутдинов М.Ф., Львова Т.Н. *Оптика и спектроскопия*, **89**, 150 (2000).
4. Дич З.Л. *Оптика и спектроскопия*, **83**, 509 (1997).
5. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д.Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
6. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **92**, 344 (2002).
7. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **93**, 875 (2002).
8. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **98**, 522 (2005).
9. Комиссарук В.А. В сб. *Исследование пространственных газодинамических течений на основе оптических методов*. Труды ВВИА им. Н.Е.Жуковского (М.: 1971, с. 121).
10. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).
11. Ляликов А.М. *Квантовая электроника*, **35**, 290 (2005).
12. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **99**, 151 (2005).
13. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **102**, 874 (2007).
14. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **105**, 136 (2008).
15. Гудмен Дж. *Введение в фурье-оптику* (М.: Мир, 1970).
16. Васильев Л.А. *Теневые методы* (М.: Наука, 1968).
17. Вест Ч. *Голографическая интерферометрия* (М.: Мир, 1982).