

# Повышение чувствительности голографической интерферометрии реверсивного сдвига за счет разворота исследуемого объекта

И.А.Лявшук, А.М.Ляликов

*Показано, что использование разворота исследуемого объекта в голографической интерферометрии реверсивного сдвига для объектов с линейными размерами, не превышающими половины диаметра зондирующего светового пучка, позволяет удвоить чувствительность интерферограмм, отображающих изменения волнового фронта исследуемым объектом. Приведены интерференционные картины стеклянной тестовой пластины с удвоенной чувствительностью отображения неоднородностей, полученные с помощью предложенного способа.*

**Ключевые слова:** фазовый объект, голограмма, реверсивный сдвиг, интерференционная картина, повышение чувствительности измерений.

## 1. Введение

Интерферометрия сдвига отличается от двухлучевой интерферометрии с референтной эталонной волной тем, что в первом случае в образовании интерферограммы участвуют две волны, прошедшие через исследуемый объект [1, 2]. Методы сдвиговой интерферометрии просты в отношении оптических схем реализации, а сами сдвиговые интерферометры имеют более высокую виброустойчивость по сравнению с двухлучевыми интерферометрами. Разнообразные методы сдвиговой интерферометрии нашли широкое применение в различных областях науки и техники [3–9].

Кроме наиболее распространенной интерферометрии бокового сдвига, в ряде случаев нашла практическое применение интерферометрия вращательного и реверсивного сдвигов [3, 10]. Использование принципов голографии при получении интерферограмм с различными типами сдвигов позволило компенсировать аберрации оптической системы при исследованиях в реальном масштабе времени [11, 12]. Реверсивный сдвиг может быть реализован как в продольном, так и в радиальном направлении [13–15]. В голографической интерферометрии радиального сдвига было предложено использовать для этих целей зонную пластинку Габора [16, 17].

Важной особенностью интерферометрии сдвига является зависимость поведения полос в интерференционных картинах как от типа сдвига интерферирующих волновых фронтов, так и от его величины. Если исследуемый фазовый объект занимает только часть рабочего поля, то для сдвиговой интерферометрии возможны случаи образования интерференционных картин, по виду подобных интерферограммам, полученным в двухлучевых интерферометрах с референтной эталонной волной [18]. Этот

частный случай интерферометрии сдвига заслуживает особого внимания, поскольку одновременно объединяет в себе все достоинства двух методов и исключает сложность расшифровки интерференционных картин, свойственную интерферометрии сдвига. В вышеотмеченном частном случае интерферометрии сдвига поведение интерференционных полос непосредственно отображает изменения фазы волны исследуемым объектом. В работах [19, 20] для повышения чувствительности отображения этих изменений было предложено использовать двойной боковой сдвиг волновых фронтов [19] либо сочетать боковые сдвиги волновых фронтов и интерферограмм при их оптической обработке [20]. Однако, как показано в работе [21], интерферометрия реверсивного или вращательного сдвига при повороте одного из пучков на  $180^\circ$  имеет в случае компенсации аберраций ряд преимуществ по сравнению с интерферометрией бокового сдвига. В предложенном способе интерферометрии реверсивного сдвига [21] одновременно наблюдалась пара безаберрационных интерферограмм исследуемого объекта с поведением полос, идентичным их поведению в двухлучевой интерферометрии с референтной эталонной волной. Расшифровка такой пары интерферограмм и усреднение результата способствует, в отличие от случая одной интерференционной картины, получаемой в классической схеме двухлучевого интерферометра с референтной эталонной волной, снижению погрешности измерений.

В настоящей работе показано, что использование разворота исследуемого объекта в голографической интерферометрии реверсивного сдвига [21] позволяет удвоить чувствительность данного метода. По сравнению с двухлучевой интерферометрией с референтной эталонной волной это приводит не только к снижению погрешности измерений при расшифровке пары таких интерферограмм, но и к двукратному снижению порога измеряемых оптических неоднородностей.

## 2. Оптическая схема реализации метода

На рис. 1 приведена оптическая схема реализации способа повышения чувствительности измерений гологра-

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

Поступила в редакцию 11 января 2007 г., после доработки – 6 июля 2007 г.

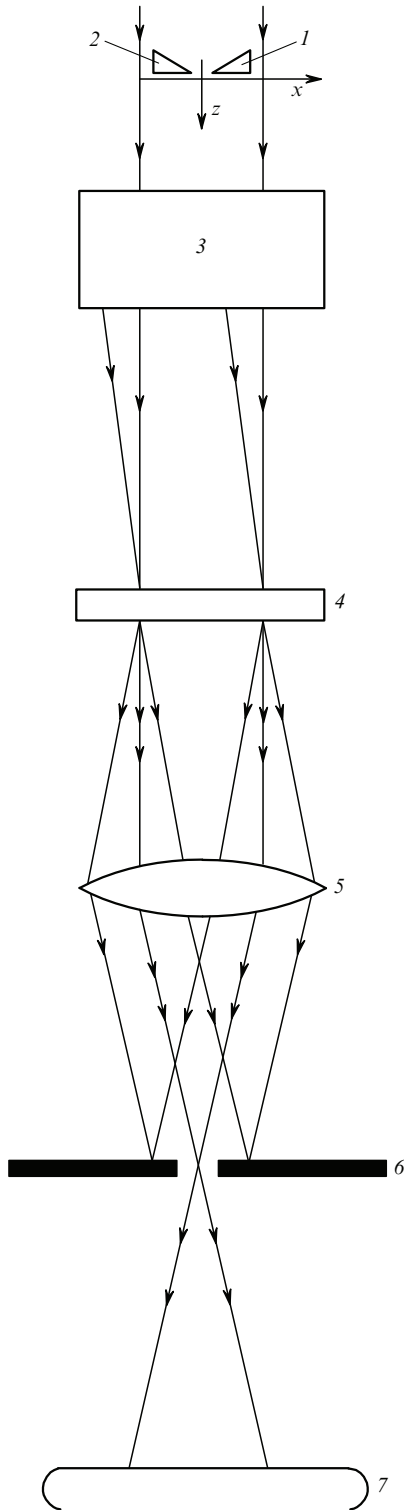


Рис.1. Оптическая схема реализации способа повышения чувствительности голографической интерферометрии реверсивного сдвига: 1, 2 – положения исследуемого фазового объекта; 3 – интерферометр реверсивного сдвига; 4 – опорная голографическая интерферограмма; 5 – объектив; 6 – диафрагма; 7 – плоскость получения интерференционных картин.

фической интерферометрии реверсивного сдвига. Следует отметить, что при реализации данного способа максимальные линейные размеры исследуемого фазового объекта в направлении, перпендикулярном оси реверсивного сдвига, не должны превышать половины диаметра зондирующего объектного пучка.

Систему координат (рис.1) выберем такой, чтобы световой пучок, проходящий через исследуемый объект, распространялся вдоль оси  $z$ , совпадающей с главной оптической осью системы формирования зондирующего пучка, а реверсивный сдвиг осуществлялся в интерферометре реверсивного сдвига 3 с изменением направления только оси  $x$  одного из световых пучков на противоположное, т.е. разворотом волнового фронта на  $180^\circ$  относительно оси  $y$ . Систему координат  $xu$  расположим в плоскости объекта, как это показано на рис.1 и 2.

При записи опорной голографической интерферограммы исследуемый фазовый объект размещается в одной из половин зондирующего светового пучка, например в положении 1 (рис.1), причем так, что он занимает менее половины поля светового пучка. На рис.2 схематически изображены контуры световых пучков, исследуемого объекта и его изображения в различных плоскостях оптической схемы (рис.1).

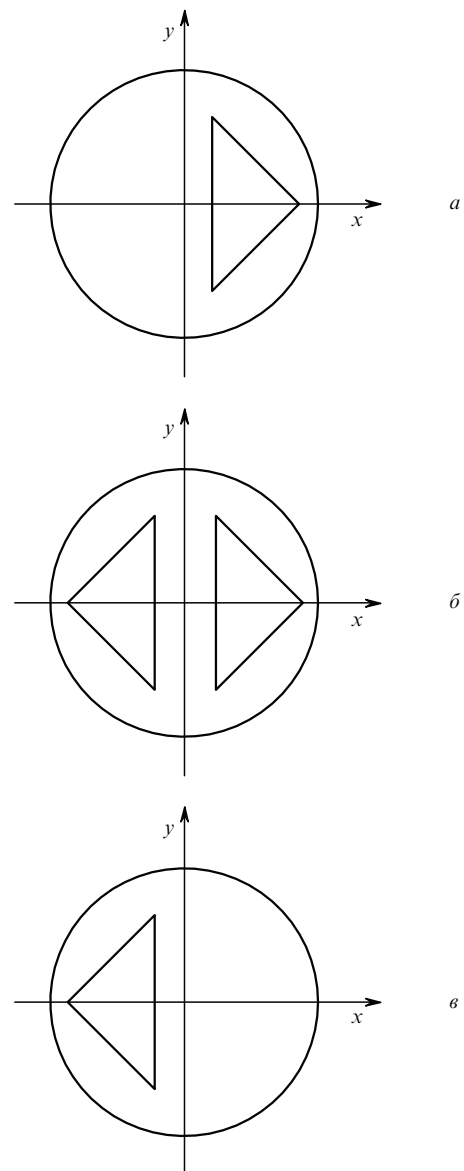


Рис.2. Схематическое изображение контуров световых пучков (круг), исследуемого объекта и его изображения (треугольники) в различных плоскостях оптической схемы (рис.1): в плоскости объекта до его разворота (а), в плоскости образования опорной голографической интерферограммы (б) и в плоскости объекта после его разворота (в).

После прохождения фазового объекта (рис.2,*а*) объектный световой пучок направляется в интерферометр реверсивного сдвига 3. В качестве интерферометра реверсивного сдвига можно использовать двухлучевой интерферометр Маха – Цендера с дополнительным зеркалом, реализующим разворот на  $180^\circ$  волнового фронта одного из интерферирующих пучков. Схема и принцип работы такого интерферометра подробно описаны в работе [21]. Особенность данного интерферометра такова, что волновой фронт одного из интерферирующих световых пучков разворачивается вокруг оси  $y$  на  $180^\circ$ . На рис.2,*б* изображены контуры интерферирующих совмещенных световых пучков и изображений исследуемого объекта в плоскости образования опорной голографической интерферограммы реверсивного сдвига 4. Оптическая система фильтрации пространственных частот образована диафрагмой 6, установленной в задней фокальной плоскости объектива 5, и предназначена для выделения соответствующих порядков дифракции света на опорной голографической интерферограмме 4. Для получения интерференционных картин повышенной чувствительности в плоскости 7 исследуемый объект разворачивается относительно оси  $y$  на  $180^\circ$ . При таком развороте объект перемещается во вторую половину объектного зондирующего пучка в положение 2 (рис.1 и рис.2,*в*). Плоскость наблюдения интерференционной картины 7, отображающей с двукратно увеличенной чувствительностью изменения волнового фронта исследуемым объектом, оптически сопряжена с опорной голограммой 4 и исследуемым объектом  $I$ .

### 3. Запись опорной голографической интерферограммы

На первом этапе реализации предложенного способа повышения чувствительности голографической интерферометрии реверсивного сдвига исследуемый объект устанавливается в положение 1 и в плоскости 4 записывается опорная голографическая интерферограмма.

Предположим, что оптическая схема интерферометра реверсивного сдвига 3 настроена так, что первый световой пучок наклонен в плоскости  $xz$  к оси  $x$  на некоторый угол  $\alpha_0$ , а второй пучок, испытывающий реверсивный сдвиг, распространяется вдоль оси  $z$ . В этом случае комплексные амплитуды  $A_1$  и  $A_2$  световых волн на выходе интерферометра в плоскости записи опорной голографической интерферограммы 4 можно представить в следующем виде:

$$A_1(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\xi x + \varphi(x, y) + \varepsilon_0(x, y) + \varepsilon_1(x, y)]\}, \quad (1)$$

$$A_2(x, y) = a_2 \exp\{i[\varphi(-x, y) + \varepsilon_0(-x, y) + \varepsilon_2(x, y)]\}, \quad (2)$$

где  $a_1, a_2$  – действительные амплитуды;  $\xi = \lambda^{-1} \cos \alpha_0$  – пространственная частота световой волны;  $\lambda$  – длина волны;  $\varphi(x, y)$  и  $\varepsilon_0(x, y)$  – искажения фазы исследуемым фазовым объектом и абберациями объектной ветви оптической системы формирования зондирующего светового пучка;  $\varepsilon_1(x, y)$  и  $\varepsilon_2(x, y)$  – искажения фаз абберациями первой и второй ветвей интерферометра реверсивного сдвига 3. Если выполнены линейные условия регистрации [22], а также  $a_1 = a_2$ , то амплитудное пропускание опорной голографической интерферограммы записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \tau(x, y) = & 1 + \cos[2\pi\xi x + \varphi(x, y) - \varphi(-x, y) \\ & + \varepsilon_0(x, y) - \varepsilon_0(-x, y) + \varepsilon_1(x, y) - \varepsilon_2(x, y)]. \end{aligned} \quad (3)$$

После химической обработки опорной голографической интерферограммы (3) ее устанавливают в прежнее положение 4 (рис.1). Точность установки можно проконтролировать визуально по совмещению контура исследуемого объекта  $I$  с контурами его изображений, зафиксированными на опорной голографической интерферограмме 4. Более точная установка опорной голографической бесконечно широкой муаровой полосы на опорной голографической интерферограмме 4. При достижении по всему визуализируемому полю равномерной освещенности в муаровой картине, что соответствует бесконечно широкой полосе, можно утверждать, что искривление полос, связанное с неточной установкой объекта, визуально не будет обнаружено. Обычно в этом случае величина искривления полос в интерференционной картине не превышает 0.1 ширины полосы [22, 23].

### 4. Получение интерференционных картин повышенной чувствительности

На втором этапе реализации способа повышения чувствительности голографической интерферометрии реверсивного сдвига исследуемый фазовый объект  $I$  разворачивается относительно оси  $y$  на  $180^\circ$  и принимает положение 2, симметричное (относительно оси  $y$ ) его первоначальному положению. На рис.2,*в* схематически изображены контуры зондирующего светового пучка и фазового объекта в новом после разворота положении. Точность такого разворота исследуемого фазового объекта может быть проконтролирована по совмещению контура изображения объекта с контурами изображений, зафиксированными на опорной голографической интерферограмме (рис.2,*б*). Эти контуры должны точно совпадать. В этом случае комплексные амплитуды световых волн на выходе интерферометра в плоскости опорной голографической интерферограммы 4 с учетом разворота фазового объекта преобразуются из (1) и (2) к следующему виду:

$$\begin{aligned} A'_1(x, y) = & a_1 \exp\{i[2\pi\xi x + \varphi(-x, y) \\ & + \varepsilon_0(x, y) + \varepsilon_1(x, y)]\}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$A'_2(x, y) = a_2 \exp\{i[\varphi(x, y) + \varepsilon_0(-x, y) + \varepsilon_2(x, y)]\}. \quad (5)$$

Распределение  $B(x, y)$  комплексных амплитуд световых волн на выходе опорной голографической интерферограммы 4 определится следующим образом:

$$B(x, y) = [A'_1(x, y) + A'_2(x, y)]\tau(x, y). \quad (6)$$

Для получения интерференционных картин повышенной чувствительности в задней фокальной плоскости объектива 5 отверстием в диафрагме 6 отделяются волны, распространяющиеся вдоль главной оптической оси объектива 5, с комплексными амплитудами

$$B_1(x, y) = b_1 \exp\{i[2\varphi(-x, y) - \varphi(x, y) +$$

$$+ \varepsilon_0(-x, y) + \varepsilon_2(x, y)\}, \quad (7)$$

$$B_2(x, y) = b_2 \exp\{i[\varphi(x, y) + \varepsilon_0(-x, y) + \varepsilon_2(x, y)]\}, \quad (8)$$

где  $b_1, b_2$  – действительные амплитуды. Волны вида (7), (8) отделяются отверстием от других волн и в плоскости 7 образуют интерференционную картину в полосах бесконечной ширины:

$$I(x, y) = b_1^2 + b_2^2 + 2b_1b_2 \cos[2\varphi(-x, y) + 2\varphi(x, y)]. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), aberrации системы формирования зондирующего пучка и интерферометра реверсивного сдвига компенсированы полностью. Такая интерференционная картина, как и в случае метода безабберационной голографической интерферометрии реверсивного сдвига [21], представляет собой две интерферограммы, расположенные симметрично относительно оси  $y$  (рис.2,б), но отображающие изменения фазы исследуемым объектом с двукратно повышенной чувствительностью по сравнению с двухлучевой интерферометрией с референтной эталонной волной.

Получение интерференционных картин в полосах конечной ширины, как и для случая [21], обеспечивается малым по сравнению с  $\pi/2 - \alpha_0$  изменением направления распространения одного из освещающих опорную голографическую интерферограмму световых пучков. Если  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  – углы, определяющие изменение направления распределения светового пучка (4) или (5) соответственно в плоскостях  $xz$  и  $yz$ , то распределение освещенности (9) можно представить так:

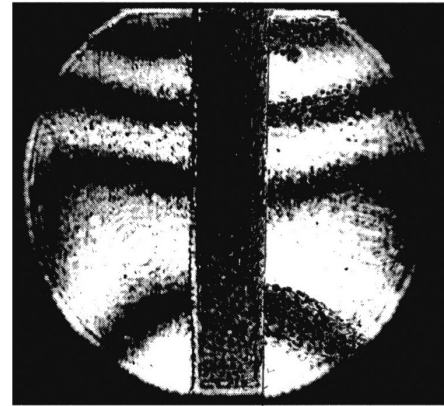
$$I(x, y) = b_1^2 + b_2^2 + 2b_1b_2 \cos[2\pi\xi_0x + 2\pi\eta_0y + 2\varphi(-x, y) + 2\varphi(x, y)], \quad (9a)$$

где  $\xi_0 \approx \lambda^{-1} \Delta\alpha \sin \alpha$ ,  $\eta_0 \approx \lambda^{-1} \Delta\beta$  – параметры, определяющие ширину и ориентацию интерференционных полос в невозмущенной исследуемым объектом зоне интерференционной картины.

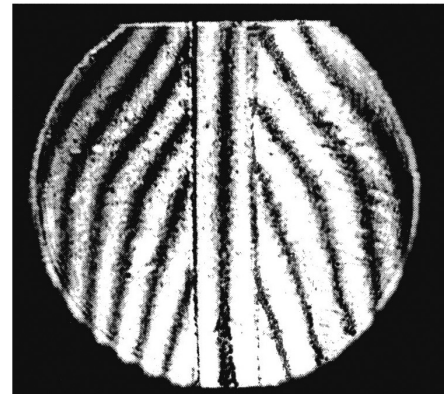
Очевидно, что симметричность относительно оси  $y$  интерференционных полос правой и левой интерферограмм имеет место при выполнении в (9a) условий  $\xi_0 = \eta_0 = 0$ , что соответствует бесконечно широкой полосе, и  $\eta_0 = 0$ , что соответствует вертикальным полосам конечной ширины. Только в двух этих случаях интерференционные полосы симметричны относительно оси  $y$ .

На рис.3 представлена серия интерферограмм тестовой стеклянной пластины, полученных вышеописанным способом повышения чувствительности голографической интерферометрии реверсивного сдвига. Вертикальное ребро пластины расположено параллельно оси  $y$ . При этом пластина занимает меньше половины зоны объектного пучка, что обеспечивает создание вблизи оси  $y$  невозмущенной объектом зоны в виде вертикальной полоски, разделяющей интерференционную картину на правую и левую интерферограммы. Эта вертикальная полоска также визуализирует настройку интерференционных полос.

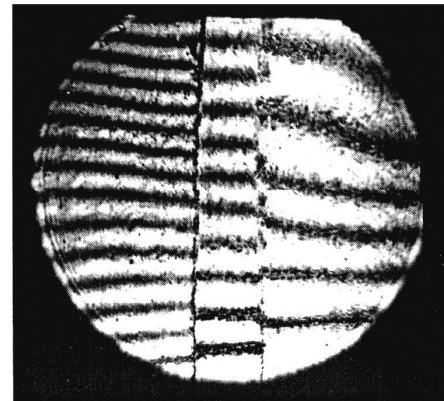
Из рис.3 видно, что симметрия интерференционных полос правой и левой интерферограмм относительно оси  $y$  наблюдается при получении интерференционной картины в полосах бесконечной ширины (рис.3,а) и в полосах конечной ширины, ориентированных в невозмущенной



а



б



в

Рис.3. Интерференционные картины тестовой стеклянной пластины, полученные по предложенному способу в полосах бесконечной (а) и конечной (б, в) ширины.

объектом зоне (центральная вертикальная полоска) перпендикулярно оси  $x$ . При произвольной настройке интерференционных полос (рис.3,б) симметрия полос правой и левой интерферограмм нарушается.

Удвоение чувствительности отображения фазы исследуемым объектом (рис.3,а) подтверждается интерференционной картиной в полосах бесконечной ширины (рис.4) той же тестовой пластины, полученной в двухлучевом интерферометре с референтной эталонной волной. При получении интерференционной картины в двухлучевом интерферометре Маха–Цендера (рис.4) тестовая стеклянная пластина устанавливалась в правую половину объектного светового пучка. Из сравнения интерференционных картин видно, что в первом случае (рис.3,а) количество интерференционных полос в области исследуемого объекта в два раза больше, чем во втором (рис.4).

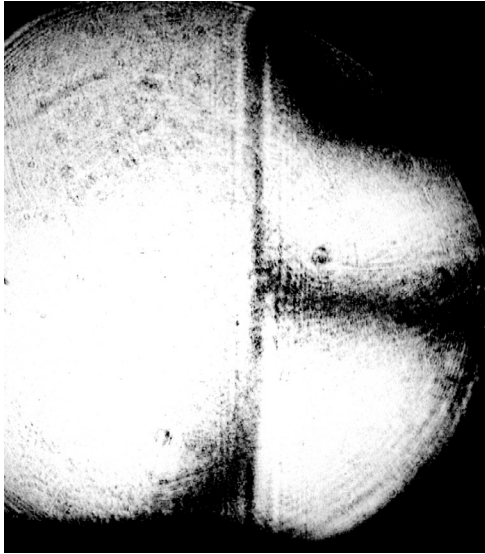


Рис.4. Интерференционная картина тестовой пластины в полосах бесконечной ширины, полученная в двухлучевом интерферометре с референтной эталонной волной.

## 5. Заключение

Таким образом, использование разворота исследуемого объекта в голографической интерферометрии реверсивного сдвига для объектов с линейными размерами, не превышающими половины диаметра зондирующего светового пучка, позволяет удвоить чувствительность интерферограмм, отображающих изменения волнового фронта исследуемым объектом, по сравнению как с двухлучевой интерферометрией с референтной эталонной волной, так и с ранее разработанным методом безабберационной голографической интерферометрии реверсивного сдвига [21]. Несмотря на усложнение процесса измерений, удвоение чувствительности отображения фа-

зы исследуемым объектом в разработанном способе интерферометрии реверсивного сдвига позволит исследовать фазовые объекты, оптические неоднородности которых в два раза меньше исследуемых методом двухлучевой интерферометрии с референтной эталонной волной. В данном случае удвоение чувствительности измерений эквивалентно соответствующему уменьшению длины волны источника когерентного света.

1. Waetzmann E. *Annalen der Physik*, **39**, 1042 (1912).
2. Вест Ч. *Голографическая интерферометрия* (М.: Мир, 1982).
3. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д.Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
4. Башкин А.С., Коротков П.И., Максимов Ю.П. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 786 (1997).
5. Schwider J. *Optik*, **108**, 181 (1998).
6. Santhanakrishnan T., Palanisamy P.K., Sirohi R.S. *Appl. Opt.*, **37**, 3447 (1998).
7. Иванов П.В., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. *Квантовая электроника*, **27**, 78 (1999).
8. Нугуманов А.М., Смирнов Р.В., Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **30**, 435 (2000).
9. Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 891 (2001).
10. Saunders J.B. *J. Res. National Bur. Staud. B.*, **66**, 29 (1962).
11. Bryngdahl O. *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 865 (1968).
12. Kulkarni V.G. *Opt. Laser Technol.*, **11**, 269 (1979).
13. Bryngdahl O. *J. Opt. Soc. Am.*, **59**, 142 (1969).
14. Bryngdahl O. *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 915 (1970).
15. Ren D., Serabyn E. *Appl. Opt.*, **44**, 7070 (2005).
16. Fouere J.C., Malacara D. *Appl. Opt.*, **13**, 2035 (1974).
17. Fouere J.C. *Opt. Laser Technol.*, **6**, 181 (1974).
18. Комиссарук В.А. В сб. *Исследования пространственных газодинамических течений на основе оптических методов* (М.: изд-е ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1971, с. 121).
19. Ляликов А.М. *Квантовая электроника*, **35**, 290 (2005).
20. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **99**, 151 (2005).
21. Ляликов А.М. *Квантовая электроника*, **35**, 191 (2005).
22. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).
23. Бекетова А.К., Мустафина Л.Т., Смоляк А.Я. *Оптика и спектроскопия*, **39**, 336 (1975).