

# Оптическая обработка голографических интерферограмм бокового сдвига, записанных при смещении объекта

А.М.Ляликов

*Рассмотрен новый подход, используемый в голографической интерферометрии бокового сдвига, который позволяет сочетать смещение исследуемого фазового объекта при записи пары голографических интерферограмм и оптическую обработку как совмещенных, так и оптически сопряженных голографических интерферограмм. В зависимости от способа оптической обработки такой пары голографических интерферограмм одновременно наблюдаются несколько безабберационных интерференционных картин, отображающих с различной чувствительностью изменения фазы световой волны исследуемым фазовым объектом. При этом вследствие бокового сдвига, равного или превышающего линейные размеры объекта, интерференционные картины исследуемого объекта тождественны по виду интерференционным картинам, получаемым в двухлучевом интерферометре с референтной волной сравнения. Представлены результаты эксперимента по апробации возможности использования данного метода для контроля оптических неоднородностей кристалла активной среды твердотельного лазера.*

**Ключевые слова:** голографическая интерферометрия, фазовый объект, боковой сдвиг, компенсация aberrаций, повышение чувствительности измерений.

## 1. Введение

Интерферометры сдвига устойчивы к вибрациям, просты в юстировке оптической схемы и по чувствительности измерений не уступают двухлучевым интерферометрам с референтной волной сравнения. Из всего многообразия способов осуществления сдвига между одинаковыми волновыми фронтами наибольшее распространение получила интерферометрия бокового сдвига [1, 2], которая в настоящее время широко применяется в различных областях науки и техники [3–8].

Главной особенностью интерферометрии бокового сдвига является зависимость поведения полос в интерференционной картине как от соотношения между величиной сдвига и размерами исследуемого объекта, так и от самой величины сдвига. Если исследуемый объект занимает только часть рабочего поля и его размеры меньше величины сдвига, то полосы в интерферограммах получаются такими же, как и при двухлучевой интерферометрии с референтной волной сравнения [9]. Этот частный случай интерферометрии бокового сдвига заслуживает особого внимания, т.к. объединяет в себе достоинства данных двух методов. В первую очередь упрощается расшифровка интерференционной картины, сложная при интерферометрии сдвига. Для отмеченного выше частного случая поведение интерференционных полос непосредственно отображает изменения фазы зондирующей волны исследуемым объектом.

Повышение чувствительности измерений в интерферометрии бокового сдвига в случае, когда его линейные размеры больше размеров исследуемого объекта, может быть достигнуто за счет использования последовательного двойного бокового сдвига [10]. При этом наблюдается муаровая картина, отображающая с двукратным повышением чувствительности в реальном масштабе времени изменения исследуемым объектом фазы зондирующей световой волны. Голографический вариант интерферометрии последовательного двойного бокового сдвига, основанный на оптической обработке пары смещенных голографических интерферограмм бокового сдвига, позволяет повысить чувствительность измерений в два и даже четыре раза [11]. Однако при этих способах повышения чувствительности измерений остаются остаточные aberrации, связанные с боковым сдвигом зондирующего пучка [10] или голографических интерферограмм [11], что, естественно, повышает требования к качеству используемых оптических элементов интерферометра бокового сдвига.

В настоящей работе рассмотрен новый подход, используемый в голографической интерферометрии бокового сдвига, который основан на смещении исследуемого объекта при записи пары голографических интерферограмм бокового сдвига и их оптической обработке. Показано, что в зависимости от способа оптической обработки этих интерферограмм одновременно наблюдаются несколько безабберационных интерференционных картин, отображающих с различной чувствительностью изменения исследуемым объектом фазы световой волны. При этом вследствие бокового сдвига, равного или превышающего линейные размеры объекта, интерференционные картины исследуемого фазового объекта тождественны интерференционным картинам, получаемым в двухлучевом интерферометре с референтной волной сравнения.

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

Поступила в редакцию 13 декабря 2006 г., после доработки – 11 апреля 2007 г.

## 2. Запись голографических интерферограмм

Для полноты описания наблюдаемых интерференционных картин предположим, что при записи голографических интерферограмм размеры исследуемого объекта вдоль направления бокового сдвига не превышали  $1/4$  диаметра зондирующего светового пучка.

Выберем систему координат  $xuz$  следующим образом. Оси  $x$  и  $y$  расположим так, чтобы ось  $x$  совпала с направлением сдвига волновых фронтов в плоскости записи голографической интерферограммы, а ось  $z$  – с направлением распространения зондирующего светового пучка. Начало системы координат  $xu$  совместим с контуром (круг) зондирующего светового пучка так, как это показано на рис.1.а. Условно разобьем область зондирующего светового пучка и прилегающую к нему область на пять вертикальных зон с шириной  $s$ , которая равна величине бокового сдвига волновых фронтов, осуществляемого в интерферометре бокового сдвига. Прономеруем зоны цифрами 1, 2, 3, 4 и 5 (рис.1).

Предположим, что линейные размеры исследуемого фазового объекта (треугольник на рис.1) вдоль оси  $x$  равны ширине зоны  $s$  или меньше нее. Это ограничение не касается линейных размеров объекта вдоль оси  $y$ . Расположим исследуемый фазовый объект в зоне 4 так, как это показано на рис.1.а. В этом случае распределение фазы  $\Phi_1(x, y)$  зондирующего светового пучка с плоским волновым фронтом после прохождения исследуемого фазового объекта удобней всего записать в следующем виде:

$$\Phi_1(x, y) = \begin{cases} \varepsilon(x, y) & \text{для зон 2, 3, 5,} \\ \varphi(x, y) + \varepsilon(x, y) & \text{для зоны 4,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varepsilon(x, y)$  и  $\varphi(x, y)$  – искажения фазы, характеризующие деформацию плоского волнового фронта вследствие aberrаций и прохождения его через фазовый объект соответственно. Голографическая интерферограмма бокового сдвига записывается при наложении двух световых пучков, полученных при делении по амплитуде зондирующего пучка в интерферометре бокового сдвига (рис.1.б). Один из пучков распространяется вдоль оси  $z$ , и его фаза описывается выражением (1). Другой пучок сдвинут вдоль оси  $x$  на величину  $s$  (например, против направления оси  $x$ ) и наклонен к первому пучку под некоторым углом. Предположим, что второй световой пучок распространяется в плоскости  $yz$ . В этом случае распределение фазы  $\Phi_2(x, y)$  второго светового пучка можно представить в виде

$$\Phi_2(x, y) = \begin{cases} 2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) & \text{для зон 1, 2, 4,} \\ 2\pi\eta y + \varphi(x + s, y) + \varepsilon(x + s, y) & \text{для зоны 3,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\eta = \cos \beta / \lambda$ ;  $\beta$  – угол между направлением распространения пучка и осью  $y$ ;  $\lambda$  – длина волны.

Предположим, что действительные амплитуды интерферирующих световых пучков равны. В этом случае получим согласно выражениям (1), (2) амплитудное пропускание первой голографической интерферограммы бокового сдвига, записанной до смещения исследуемого фазового объекта:

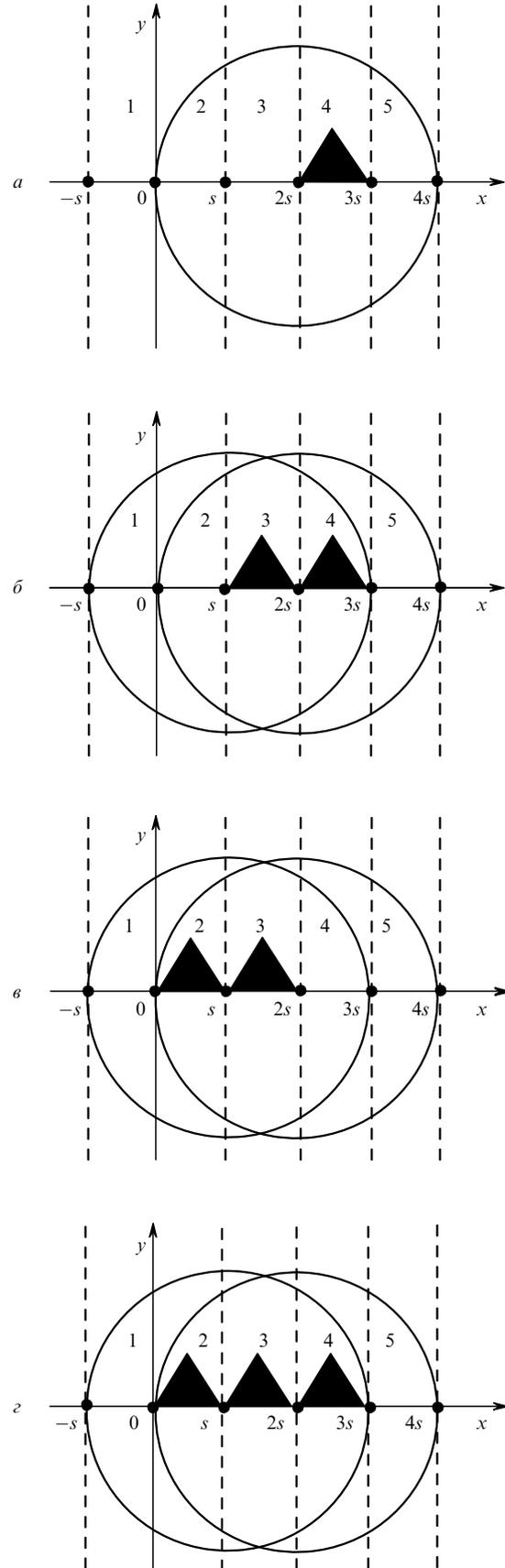


Рис.1. Геометрические изображения контуров световых пучков (круги) и объекта (треугольники) в различных плоскостях при записи и оптической обработке голографических интерферограмм бокового сдвига; 1–5 – зоны шириной  $s$ .

$$t_1(x, y) \sim \begin{cases} \{1 + \cos[2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}^{-\gamma/2} & \text{для зоны 2,} \\ \{1 + \cos[2\pi\eta y + \varphi(x + s, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}^{-\gamma/2} & \text{для зоны 3,} \\ \{1 + \cos[2\pi\eta y - \varphi(x, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}^{-\gamma/2} & \text{для зоны 4,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\gamma$  – коэффициент контрастности фотоэмульсии [12].

Информация об исследуемом фазовом объекте присутствует в зонах 3 и 4, причем искривления голографических полос исследуемым объектом, описываемые функциями  $\varphi(x, y)$  и  $\varphi(x + s, y)$ , имеют взаимно противоположные знаки. Кроме этого, согласно выражению (3), в голографической интерферограмме присутствуют и остаточные aberrации, определяемые разностью  $[\varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]$ .

Перед записью второй голографической интерферограммы исследуемый фазовый объект перемещается из зоны 4 (рис.1,а) в зону 3 на величину бокового сдвига. Достаточная точность такого перемещения может быть обеспечена следующим образом. Перед перемещением объекта, после проявления фотоэмульсии, первая голографическая интерферограмма устанавливается в положение ее записи, что визуально контролируется по совмещению объекта с его изображением. Более точное совмещение достигается при получении бесконечно широкой полосы в муаровой картине. После этого объект из зоны 4 (рис.1,а) перемещается в зону 3 до совмещения его контуров с левым изображением объекта, записанным на голографической интерферограмме (рис.1,б). Первая голографическая интерферограмма убирается из интерферометра и записывается новая при сложении волн с распределением фаз

$$\Phi_1'(x, y) = \begin{cases} \varepsilon(x, y) & \text{для зон 2, 4, 5,} \\ \varphi(x + s, y) + \varepsilon(x, y) & \text{для зоны 3,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Phi_2'(x, y) = \begin{cases} 2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) & \text{для зон 1, 3, 4,} \\ 2\pi\eta y + \varphi(x + 2s, y) + \varepsilon(x + s, y) & \text{для зоны 2.} \end{cases} \quad (5)$$

Амплитудное пропускание второй голографической интерферограммы, записанной после смещения фазового объекта,

$$t_2(x, y) \sim \begin{cases} \{1 + \cos[2\pi\eta y + \varphi(x + 2s, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}^{-\gamma/2} & \text{для зоны 2,} \\ \{1 + \cos[2\pi\eta y - \varphi(x + s, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}^{-\gamma/2} & \text{для зоны 3,} \\ \{1 + \cos[2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}^{-\gamma/2} & \text{для зоны 4.} \end{cases} \quad (6)$$

Голографическая интерферограмма бокового сдвига (рис.1,в), как и в предыдущем случае, записывается в зонах 2, 3 и 4, но информация об исследуемом фазовом объекте присутствует лишь в зонах 2 и 3.

Рассмотрим несколько способов оптической обработки пары голографических интерферограмм вида (3) и (6), различающихся сложностью реализации, а также чувствительностью отображения в получаемых интерференционных картинах изменений волнового фронта исследуемым фазовым объектом.

### 3. Совмещенные голографические интерферограммы

На рис.2 приведена известная схема устройства для оптической обработки пары совмещенных голографических

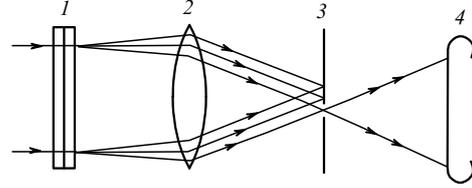


Рис.2. Схема устройства для оптической обработки пары совмещенных голографических интерферограмм:

1 – совмещенные интерферограммы; 2 – объектив; 3 – диафрагма; 4 – плоскость, оптически сопряженная с плоскостью совмещенных голографических интерферограмм I.

ских интерферограмм [12]. Голографические интерферограммы бокового сдвига, описываемые выражениями (3) и (6), совмещаются так, чтобы левое изображение зафиксированного фазового объекта на первой (рис.1,б) голографической интерферограмме совпало с правым изображением на второй (рис.1,в) интерферограмме. На рис.1,г приведено результирующее изображение исследуемого объекта на совмещенных голографических интерферограммах. Совмещенные голографические интерферограммы I (рис.2) освещаются коллимированным пучком света. В задней фокальной плоскости объектива 2 отверстием диафрагмы 3 выделяются волны, дифрагировавшие на первой и второй голографических интерферограммах в первый порядок дифракции одного знака. В этом случае в плоскости 4, оптически сопряженной с плоскостью совмещенных голографических интерферограмм I, будут наблюдаться три интерференционных изображения исследуемого объекта (рис.1,з).

Первое изображение исследуемого объекта образовано в зоне 2 (рис.1,з) при интерференции согласно выражениям (3) и (6) волн

$$A_{1,2}(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\},$$

$$A'_{1,2}(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varphi(x + 2s, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}, \quad (7)$$

где  $a_1$  – действительная амплитуда. Распределение интенсивности в интерференционной картине изображения исследуемого объекта, расположенного в зоне 2 (рис.1,з), таково:

$$I_2(x, y) \sim 1 + \cos[\varphi(x + 2s, y)]. \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что aberrации  $[\varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]$  в интерференционной картине исключены.

Второе изображение образовано в зоне 3 (рис.1,з) при интерференции волн

$$A_{1,3}(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varphi(x + s, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\},$$

$$A'_{1,3}(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y - \varphi(x + s, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\} \quad (9)$$

$$+ \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)\}.$$

Распределение интенсивности в интерференционной картине изображения исследуемого объекта, расположенного в зоне 3 (рис.1,з),

$$I_3(x, y) \sim 1 + \cos[-2\varphi(x + s, y)]. \quad (10)$$

Для этой интерференционной картины, как и для картины, наблюдаемой в зоне 2, искажения вследствие аберраций полностью исключены. Из выражения (10) следует, что в зоне 3 (рис.1,з) интерференционная картина отображает с двукратным увеличением чувствительности изменения фазы исследуемым объектом, смещенным в пространстве вдоль оси  $x$  на величину  $-s$  по отношению к первоначальному положению исследуемого объекта (рис.1,а), соответствующему записи первой голографической интерферограммы. Отметим, что знаки перед функциями, описывающими изменения фазы исследуемым объектом в зонах 2 и 3, противоположны, а значит, в случае получения интерференционных картин в полосах конечной ширины это приведет к взаимно противоположному искривлению полос в этих зонах. Двукратное повышение чувствительности измерений для интерференционной картины в зоне 3 связано с наложением смещенных изображений исследуемого объекта, восстановленных с первой и второй голографических интерферограмм.

Последнее изображение образовано в зоне 4 (рис.1,з) при интерференции волн

$$A_{1,4}(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y - \varphi(x, y) + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}, \quad (11)$$

$$A'_{1,4}(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varepsilon(x + s, y) - \varepsilon(x, y)]\}.$$

Распределение интенсивности в интерференционной картине изображения исследуемого объекта, расположенного в зоне 4 (рис.1,з), аналогично распределению в зоне 2:

$$I_4(x, y) \sim 1 + \cos[\varphi(x, y)]. \quad (12)$$

При точном совмещении голографических интерферограмм, описываемых выражениями (3) и (6), наблюдается интерференционная картина в полосах бесконечной ширины.

Выражения (8), (10) и (12) описывают интерференционные картины в полосах бесконечной ширины. Для получения картин в полосах конечной ширины можно использовать два подхода, подробно рассмотренных в [12]. Получить интерференционные картины в полосах конечной ширины при таком способе оптической обработки голографических интерферограмм можно, например, за счет небольшого разворота одной из интерферограмм.

На фотографиях рис.3 приведены интерференционные картины исследуемого объекта в полосах бесконечной и конечной ширины, полученные описанным выше способом оптической обработки пары совмещенных голографических интерферограмм. Данные интерференционные картины отображают изменения волнового фронта объектной волны, прошедшей через исследуемый объект – цилиндрический кристалл диаметром 3.5 мм и длиной 51 мм с отполированными плоскопараллельны-

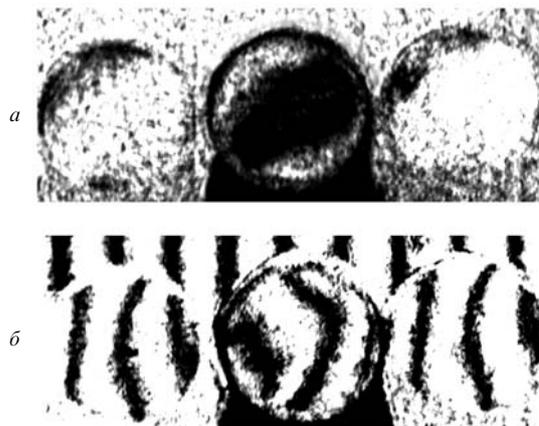


Рис.3. Интерференционные картины исследуемого объекта в полосах бесконечной (а) и конечной (б) ширины, полученные при оптической обработке пары совмещенных голографических интерферограмм.

ми торцами, являющийся активной средой твердотельного лазера. Величина бокового сдвига и соответственно перемещение кристалла составили 3.5 мм.

Для получения интерференционных картин в полосах конечной ширины одна из голографических интерферограмм разворачивалась на небольшой угол. Однако, как следует отметить, в этом случае наблюдалось смещение изображения исследуемого объекта по отношению к изображению, зафиксированному на голографической интерферограмме. При этом с уменьшением периода интерференционных полос данное смещение возрастало, что было нежелательным.

#### 4. Оптически сопряженные голографические интерферограммы

Рассмотренный ниже способ оптической обработки пары голографических интерферограмм более сложен в технической реализации, но имеет ряд преимуществ.

На рис.4. приведена схема устройства для оптической обработки пары оптически сопряженных голографических интерферограмм. Такая схема использовалась ранее для оптической обработки объектной и опорной голограмм фазовых объектов [12], а также пары голографических интерферограмм бокового сдвига, сдвинутых относительно друг друга [11]. Основное достоинство схемы – возможность получения интерференционных картин со значительно большей чувствительностью измерений. Поэтому данный способ оптической обработки голографических интерферограмм будем рассматривать только для интерференционного изображения, соответствующего максимальной чувствительности отображения изменений волнового фронта исследуемым объектом (интерференционное изображение зоны 3, см. рис.1,з).

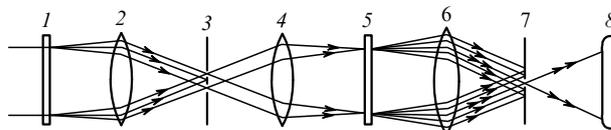


Рис.4. Схема устройства для оптической обработки пары оптически сопряженных голографических интерферограмм: 1, 5 – голографические интерферограммы; 2, 4, 6 – объективы; 3, 7 – диафрагмы; 8 – плоскость, оптически сопряженная с плоскостями голографических интерферограмм 1, 5.

Голографические интерферограммы 1 и 5 (рис.4) устанавливаются в плоскостях, оптически сопряженных объективами 2, 4. При освещении первой голографической интерферограммы, например вида (3), в комплексно-сопряженных  $\pm n$ -х ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) порядках в зоне 3 (рис.1,з) дифрагируют волны

$$A_{n,3}(x, y) = a_n \exp\{i[2\pi n \eta y + n\varphi(x + s, y) + n\varepsilon(x + s, y) - n\varepsilon(x, y)]\},$$

$$A_{n,3}^*(x, y) = a_n \exp\{-i[2\pi n \eta y + n\varphi(x + s, y) + n\varepsilon(x + s, y) - n\varepsilon(x, y)]\},$$
(13)

где  $a_n$  – действительная амплитуда волны. Волны вида (13) в задней фокальной плоскости объектива 2 отделяются от других порядков дифракции двумя отверстиями в диафрагме 3. Выделенные волны коллимируются объективом 4 и освещают вторую голографическую интерферограмму 5 вида (6). Распределение комплексных амплитуд на выходе второй голографической интерферограммы определяется как  $|A_{n,3}(x, y) + A_{n,3}^*(x, y)|\tau_2(x, y)$ . С учетом (6) и (13) можно показать, что по нормали ко второй голографической интерферограмме 5 будут распространяться волны, дифрагировавшие в  $\pm n$ -е порядки,

$$B_{n,3}(x, y) = b_n \exp[i2n\varphi(x + s, y)],$$

$$B_{n,3}^*(x, y) = b_n \exp[-i2n\varphi(x + s, y)],$$
(14)

где  $b_n$  – действительная амплитуда волны. Волны вида (14) выделяются в задней фокальной плоскости объектива 6 отверстием в диафрагме 7 и в плоскости 8, оптически сопряженной с плоскостями голографических интерферограмм 1, 5, образуют интерференционную картину вида

$$I_{n,3}(x, y) \sim 1 + \cos[-4n\varphi(x + s, y)].$$
(15)

Данная интерференционная картина отображает с  $4n$ -кратным увеличением чувствительности изменения волнового фронта объектной волны исследуемым объектом.

На рис.5 приведены интерференционные изображения зоны 3 (рис.1,з) при оптической обработке пары голографических интерферограмм, размещенных в оптически сопряженных плоскостях, при выделении  $\pm 2$ -х (рис.5,а) и  $\pm 3$ -х (рис.5,б) порядков дифракции. Согласно выражению (15), чувствительность измерений данных интерференционных картин соответственно в 8 и 12 раз больше, чем интерференционных картин исследуемого кристалла, наблюдаемого в зонах 2, 4 (рис.3) при предыдущем способе оптической обработки.

## 5. Заключение

Таким образом, рассмотренные способы оптической обработки голографических интерферограмм бокового сдвига, записанных при смещении исследуемого объекта, позволяют одновременно получать несколько, в частном случае три, безабберационных интерференционных картин, отображающих с различной чувствительностью изменения исследуемым объектом фазы световой волны. Способы различаются по сложности их реализации и по максимально достижимой чувствительности измерений.

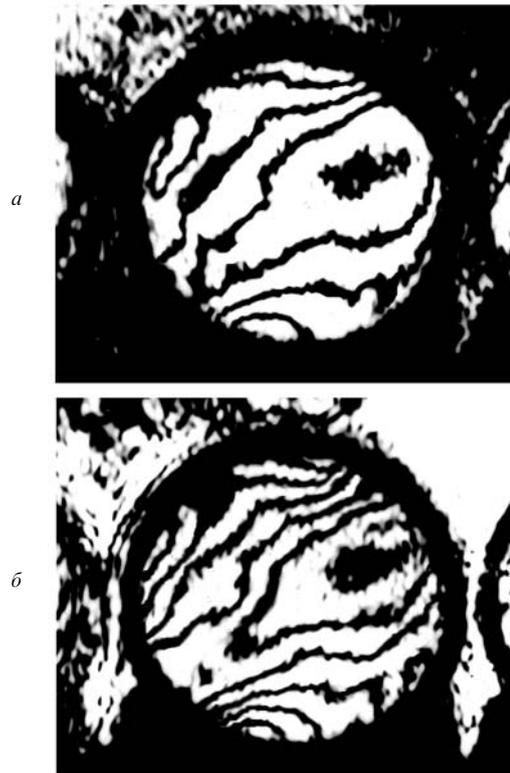


Рис.5. Интерференционные картины, полученные при оптической обработке пары голографических интерферограмм, размещенных в оптически сопряженных плоскостях; чувствительность измерений больше в 8 (а) и 12 (б) раз.

Следует отметить, что если как для первого, так и для второго способа оптической обработки требуется получить только центральное изображение интерференционной картины с повышенной чувствительностью, то линейные размеры и, следовательно, величину сдвига по отношению к диаметру зондирующего светового пучка можно увеличить. В этом случае размеры исследуемого объекта вдоль направления бокового сдвига не должны превышать половины диаметра зондирующего светового пучка, а боковой сдвиг должен быть равен половине диаметра пучка.

Автор выражает благодарность А.В. Сутягину за помощь в обработке голограмм бокового сдвига и получении интерференционных картин.

1. Waetzmann E. *Annalen der Physik*, **39**, 1042 (1912).
2. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д. Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
3. Шехтман В.Н., Родинов А.Ю., Пельменев А.Г. *Оптика и спектроскопия*, **76**, 988 (1994).
4. Башкин А.С., Коротков П.И., Максимов Ю.П. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 786 (1997).
5. Toker G.R., Levin D. *Appl. Opt.*, **37**, 5162 (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. Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 891 (2001).
9. Комиссарук В.А. В сб. *Исследования пространственных газодинамических течений на основе оптических методов. Труды ВВИА им. Н.Е. Жуковского* (М., 1971, с. 121).
10. Ляликов А.М. *Квантовая электроника*, **35**, 290 (2005).
11. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **99**, 151 (2005).
12. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).