

## Голографическая интерферометрия реального масштаба времени с использованием наложенных голограмм-компенсаторов

© А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 7 ноября 2006 г.)

Показана перспективность использования наложенных голограмм-компенсаторов для решения ряда проблем в голографической интерферометрии реального масштаба времени, в частности, для получения интерференционных картин с фиксированной настройкой опорных полос, а также для регулирования чувствительности измерений. Представлены результаты экспериментальной апробации предложенных способов при визуализации процессов плавления плоского образца полиметилметакрилата методом голографической интерферометрии бокового сдвига.

PACS: 42.40.Kw.

### Введение

Основным преимуществом голографической интерферометрии по сравнению с классической является возможность компенсации aberrаций некачественной оптики интерферометра, а самое главное — возможность интерферометрических исследований различных объектов, находящихся в камерах и кюветах, ограниченных некачественными стеклянными окнами. Методы голографической интерферометрии (двухэкспозиционная, дифференциальная или в реальном масштабе времени) дали возможность исследовать различные процессы в оптических кюветах и камерах со стеклами очень низкого качества, что для классической интерферометрии было в принципе невозможно [1–3].

Исключение aberrаций в голографической интерферометрии реализуется на стадии восстановления интерференционной картины обычно применением двухэкспозиционной записи голограммы либо за счет голограммы-компенсатора, зарегистрированной без исследуемого объекта. Использование голограммы-компенсатора в голографической интерферометрии реального масштаба времени позволило получать безабберационные интерферограммы, отображающие изменения, происходящие с исследуемым объектом, непосредственно в процессе эксперимента [4]. Регулировка ширины и направления интерференционных полос (настройка интерференционных полос) в последнем случае достигалась изменением направления освещающего голограмму-компенсатор опорного пучка либо разворотом или наклоном самой голограммы-компенсатора и контролировалось обычно визуально [2].

При визуальном контроле за шириной и направлением опорных интерференционных полос часто возникала проблема достоверности такого контроля. Если размеры возмущенной объектом зоны были велики и в поле интерференционной картины отсутствовали невозмущенные зоны, то реализовать визуальный контроль

за шириной и направлением интерференционных полос не представлялось возможным, что, естественно, приводило к погрешности измерений при обработке такой интерференционной картины.

Второй проблемой в голографической интерферометрии реального масштаба времени является трудность полного исключения aberrаций при изменении чувствительности измерений в процессе эксперимента. Изменение чувствительности интерферометрических измерений в широком диапазоне может быть осуществлено для интерферометрии бокового сдвига [5] в случае малой его величины [6,7] либо для голографического варианта интерферометрии малого бокового сдвига [8]. Исключение aberrаций в голографическом варианте сдвиговой интерферометрии с изменяемой чувствительностью измерений достигалось за счет оптической обработки полученной серии голограмм в специальных оптических устройствах [9,10]. До сих пор не создан способ получения безабберационных интерференционных картин в реальном масштабе времени с возможностью изменения чувствительности измерений в процессе эксперимента.

В настоящей работе показана перспективность использования наложенных голограмм-компенсаторов для решения ряда проблем в голографической интерферометрии реального масштаба времени. В частности, показано, что применение в качестве опорной голограммы наложенных в одной регистрирующей среде нескольких голограмм-компенсаторов позволяет сравнительно просто получать интерференционные картины с фиксированной настройкой опорных полос, а в случае регулирования чувствительности измерений — полностью компенсировать искажения, вносимые некачественными элементами объектной ветви голографического интерферометра.

Ранее наложенные голограммы, представляющие собой записанные в одной регистрирующей среде две и более элементарных голограммы, нашли применение в ряде способов голографической интерферометрии, на-

пример, в двухэкспозиционной [11,12], а также в прикладной голографии для цветокодирования и мультиплицирования изображений [13,14]. Однако наибольшие возможности имеют наложенные голограммы, записанные в одной среде за счет ее разворота между циклами записи. Использование такого типа голограмм позволило полностью исключить aberrации системы записи при получении интерференционных картин, характеризующих изменение фазы исследуемым объектом за промежуток между временами записи соответствующих наложенных голограмм [15,16].

## Схема голографического интерферометра

На рис. 1 приведена оптическая схема голографического интерферометра, работающего в реальном масштабе времени, с использованием наложенных голограмм-компенсаторов для реализации как способа получения интерференционных картин с фиксированной настройкой опорных полос, так и получения интерференционных картин бокового сдвига с изменяемой чувствительностью измерений. Как для первого, так и для второго способа в основу метода положена голографическая интерферометрия малого бокового сдвига [8].

Излучение гелий-неонового лазера (ЛГН-212) 1 зеркалом 2 направлялось в оптическую ветвь, образованную парой телескопических систем — 3, 4 и 6, 7. Первая телескопическая система (3, 4) служила для формирования светового пучка необходимых размеров, согласованных с размерами исследуемой зоны фазового объекта 5, а вторая (6, 7) — для уменьшения размеров светового пучка, вводимого в интерферометр бокового сдвига 8. В плоскости 9 в зависимости от реализуемого способа записывалась серия наложенных голограмм-компенсаторов.

Рассмотрим особенности записи серии наложенных голограмм-компенсаторов в схеме интерферометра бокового сдвига (рис. 1) для реализации как способа получения интерференционных картин с фиксированной настройкой опорных полос, так и способа получения интерференционных картин бокового сдвига с изменяемой чувствительностью измерений.

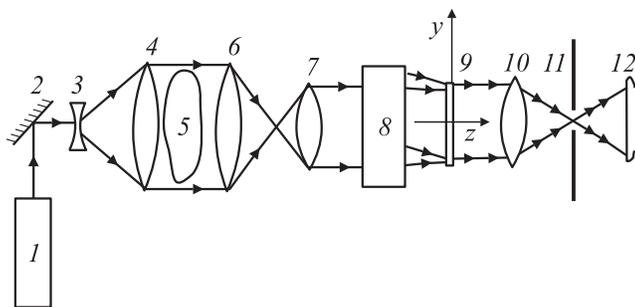


Рис. 1. Оптическая схема голографического интерферометра.

## Получение фиксированной настройки интерференционных полос

При исследовании различного рода объектов методом голографической интерферометрии в реальном масштабе времени, в некоторых случаях для устранения неоднозначности интерпретации поведения интерференционных полос в наблюдаемых картинах, необходимо менять их ширину и направление. Если возмущенные объектом зоны велики, то, как это было отмечено выше, получить полосы известной ширины и направления трудно из-за невозможности визуального контроля. Задача еще больше усложняется в таких условиях, если необходимо получить несколько различных настроек интерференционных картин с фиксированными шириной и направлением полос. При исследованиях динамического объекта особенно важна и скорость переключения настройки полос интерференционной картины голографического интерферометра реального масштаба времени. С метрологической точки зрения наиболее достоверные параметры (ширина и направление) опорных полос интерференционной картины могут быть получены не при развороте или наклоне голограммы-компенсатора, а при использовании голограммы-компенсатора, установленной в положение, соответствующее ее записи. В последнем случае ширина и ориентация интерференционных полос определяются соотношением параметров решетки голограммы-компенсатора и освещающих голограмму световых пучков интерферометра. В первом способе для обеспечения более или менее достоверной настройки картины при отсутствии визуального контроля конструкция держателя голограммы будет очень сложной. Во втором способе используется голограмма-компенсатор с заранее записанной определенным образом голографической решеткой, которая устанавливается в прежнее место, соответствующее ее записи. При этом особых технических проблем с точным совмещением голограммы-компенсатора и положением, соответствующим ее первоначальной записи, не возникает.

Для обеспечения быстрого переключения настроек интерференционных картин с фиксированными шириной и направлением полос предлагается записывать несколько голограмм-компенсаторов с соответствующим образом настроенными голографическими решетками, в одной регистрирующей среде 9 (рис. 1), с использованием вращения этой среды вокруг оси  $z$  на строго фиксированные углы по методике записи [16]. Интерференционная картина, отображающая в реальном масштабе времени изменение фазы исследуемым объектом 5, наблюдается в плоскости 12 при выделении волны, прямо прошедшей носитель голограмм-компенсаторов 9 и дифрагированной на определенной, например  $l$ -й, решетке голограммы-компенсатора в первый порядок. Вышеотмеченные волны, участвующие в образовании безаберрационной интерференционной картины, выделяются отверстием в диафрагме 11, установленной в

задней фокальной плоскости объектива 10. Для обеспечения компенсации аберраций и получения фиксированной настройки полос носитель 9 разворачивают в положение, соответствующее записи  $l$ -й голограммы-компенсатора.

Известно, что ширина и ориентация интерференционных полос при совмещении интерференционного поля и записанной в среде голографической решетки определяются разностью векторов структур интерференционного поля и решетки голограммы [17]. Эти векторы расположены перпендикулярно полосам интерференционного поля или решетки голограммы, а модуль их определяется как  $|\mathbf{K}| = 2\pi/T$ , где  $T$  — период полос интерференционного поля или решетки голограммы. Ширина и ориентация интерференционных полос в голографической интерферометрии реального масштаба времени в этом случае будут определяться аналогично случаю двух совмещенных голограмм, т.е. разностью векторов решеток совмещенных голограмм [18].

Распределение интенсивности в безаберрационной интерференционной картине, наблюдаемой в плоскости 12, можно представить в виде

$$I = I_0 + V \cos(\mathbf{K}_{10} \mathbf{r} + \Phi), \quad (1)$$

где  $I_0$  — постоянная составляющая интенсивности,  $V$  — коэффициент, определяющий видность интерференционных полос,  $\mathbf{K}_{10}$  — вектор интерференционной картины опорных полос, определяющий ее настройку,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор,  $\Phi$  — изменение фазы, определяемое разностью фаз интерферирующих волн. Для нашего конкретного случая регистрации интерферограмм малого бокового сдвига [8] в образовании интерференционной картины участвуют два волновых фронта, получивших одинаковую деформацию, описываемую функцией  $\varphi$ , после прохождения исследуемого фазового объекта 5, но сдвинутые в пространстве на небольшую величину по сравнению с исследуемой неоднородностью. Если сдвиг волновых фронтов осуществляется, например, вдоль оси  $y$ , то

$$\Phi \approx \Delta s \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad (2)$$

где  $\Delta s$  — величина бокового сдвига. Вектор  $\mathbf{K}_{10}$  расположен в плоскости наблюдения 12 и перпендикулярен опорным интерференционным полосам. Его модуль определяет ширину полос  $|\mathbf{K}_{10}| = 2\pi/P_l$ , где  $P_l$  — период полос.

Обозначим вектор интерференционного поля, образованного освещающими носитель голограмм-компенсаторов 9 световыми волнами, выходящими из интерферометра 8, через  $\overline{AB}$ , а вектор решетки определенной  $l$ -й голограммы-компенсатора — через  $\overline{AC}$ . При получении интерференционной картины предполагается, что носитель 9 развернут в положение, соответствующее его положению при записи  $l$ -й голограммы-компенсатора.

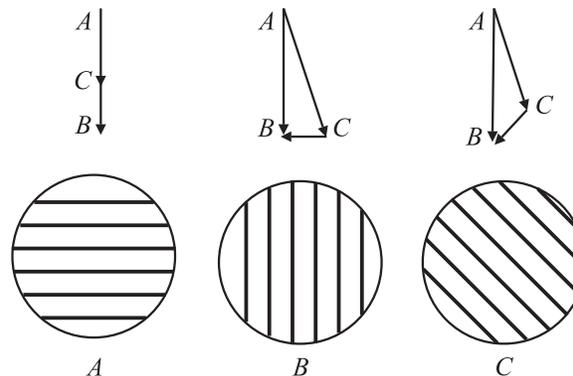


Рис. 2. Векторные диаграммы, поясняющие настройку фоновых полос, и им соответствующие интерференционные картины.

Рассмотрим различные варианты получения интерференционных картин в плоскости 12 с определенной фиксированной настройкой полос, проиллюстрированные рис. 2.

1. Для получения интерференционной картины с полосами бесконечной ширины ( $P_l \rightarrow \infty$ ) требуется, чтобы вектора  $\overline{AB}$  и  $\overline{AC}$  были строго коллинеарны и равны.

2. Для получения интерференционной картины с горизонтальными, направленными вдоль оси  $x$  опорными полосами вектора  $\overline{AB}$  и  $\overline{AC}$  должны быть строго коллинеарны, но отличаться по модулю (рис. 2, а). В этом случае ширина полос определится по формуле

$$P_l = \frac{2\pi}{|\overline{CB}|}. \quad (3)$$

3. Так как период решетки голограммы-компенсатора много меньше требуемого периода вертикально направленных вдоль оси  $y$  опорных полос, то модули векторов  $\overline{AB}$  и  $\overline{AC}$  могут быть равны, но направления их должны быть различными (рис. 2, b). Ширина полос, определяемая выражением (3), будет зависеть от модулей  $\overline{AB}$  и  $\overline{AC}$  и от угла между этими векторами.

4. Для случая, когда модули векторов  $\overline{AB}$  и  $\overline{AC}$ , а также их направления отличаются, имеет место направление опорных полос под определенными углами к осям  $x$  и  $y$  (рис. 2, c).

Для реализации рассмотренных случаев настроек полос интерференционных картин записывается серия голограмм-компенсаторов в одной регистрирующей среде с определенной ориентацией голографических структур. Для визуального контроля, позволяющего предсказать вид получаемых полос при реализации данной методики, можно использовать следующий подход. Перед записью серии голограмм-компенсаторов с различной ориентацией вектора решетки  $\overline{AC}$  дополнительно записывается на отдельном регистраторе эталонная голограмма, в дальнейшем используемая для настройки интерферометра. Вектор интерференционного поля  $\overline{AB}$

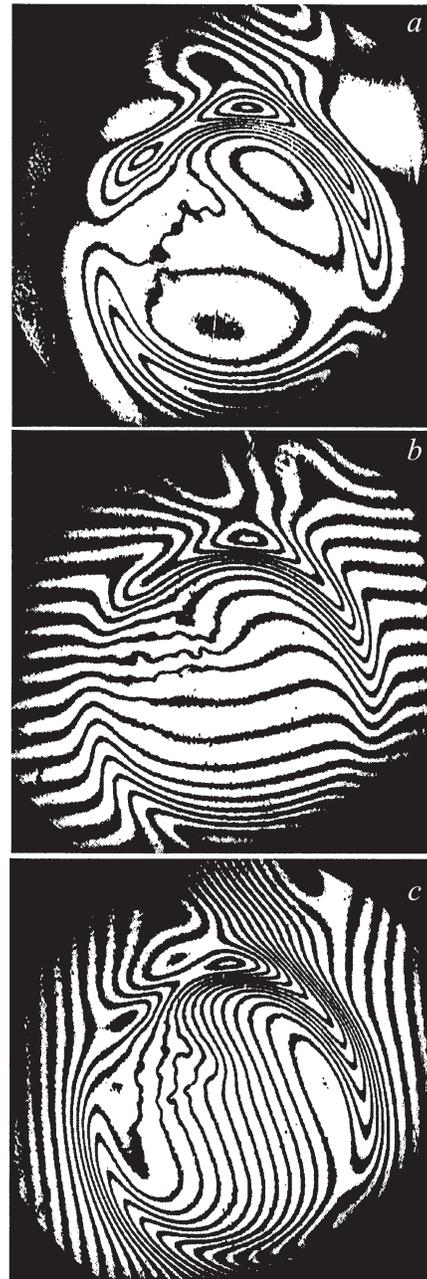
настраивается по данной эталонной голограмме. После записи эталонной голограммы последняя устанавливается в положение 9 (рис. 1), соответствующее ее записи. На следующем этапе перед записью голограммы-компенсатора, позволяющей получать соответствующую ориентацию интерференционных полос, настраивают вектор интерференционного поля. Вид муаровых полос, обычно наблюдаемых в отраженном свете при взаимодействии записывающего интерференционного поля и решетки эталонной голограммы, и определяет картину полос, наблюдаемую в плоскости 12 при реализации данной методики. После такой настройки за эталонной голограммой устанавливается регистрирующая среда 9 для записи серии голограмм-компенсаторов. Непосредственно перед записью голограммы-компенсатора эталонная голограмма убирается из схемы. Последующую голограмму-компенсатор записывают при развороте регистрирующей среды 9 на фиксированный угол. При этом перед записью снова перед регистрирующей средой 9 устанавливают эталонную голограмму и производят настройку вектора интерференционного поля по виду наблюдаемых муаровых полос. При настройках интерференционного поля по виду муаровой картины перед регистрирующей средой 9 устанавливают непрозрачный экран для исключения экспонирования регистрирующей среды. Таким образом, записывается необходимое количество голограмм-компенсаторов, которое определяется особенностями исследуемого объекта.

При подготовке интерферометра к работе для настройки вектора интерференционного поля, определяемого вектором  $\overline{AB}$ , можно использовать не только эталонную голограмму, но и голограмму-компенсатор, позволяющую получать полосы бесконечной ширины. После настройки интерференционного поля угол между освещающими пучками на выходе интерферометра бокового сдвига  $\delta$  остается неизменным в процессе всего эксперимента.

Следует отметить, что данный способ получения интерференционных картин с фиксированной настройкой полос применим как для голографической интерферометрии бокового сдвига, так и для двухлучевой интерферометрии с референтной волной сравнения. Различия в данных методах заключаются лишь в используемых интерферометрах  $\delta$  (рис. 1).

Данный способ получения интерференционных картин с фиксированной настройкой полос был применен для визуализации процессов плавления плоского образца полиметилметакрилата при его термической обработке. Для реализации различных настроек интерференционных полос перед экспериментом были записаны три голограммы-компенсатора в одной регистрирующей среде.

На рис. 3 представлены интерференционные картины с различной настройкой, отображающие состояние плоского образца в определенный момент времени. Все интерференционные картины были зарегистрированы в



**Рис. 3.** Интерференционные картины с различной настройкой полос: *a* — полосы бесконечной и *b, c* — конечной ширины.

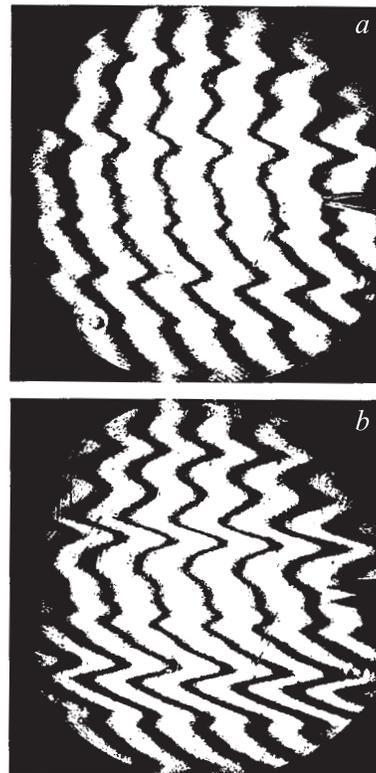
течение времени, не превышающего 2 s, требуемого, главным образом, на перенастройку интерферометра, т. е. разворот регистратора 9. Предварительные эксперименты показали, что за такой промежуток времени изменений с образцом полиметилметакрилата вследствие термического воздействия не происходит. Полученные в реальном масштабе времени безаберрационные интерференционные картины (рис. 3) имеют фиксированную настройку полос, которая была определена перед началом эксперимента.

## Изменение чувствительности измерений

Одним из замечательных свойств интерферометра бокового сдвига, для случая малого бокового сдвига (величина сдвига много меньше линейных размеров оптической неоднородности), является возможность изменения чувствительности метода, которая, согласно выражению (2), прямо пропорциональна величине бокового сдвига  $\Delta s$ . Таким образом, изменяя величину  $\Delta s$ , можно согласовывать чувствительность метода с величиной измеряемой оптической неоднородности. Однако при возрастании величины бокового сдвига одновременно возрастает не только величина полезного сигнала, в частном случае  $\Delta s \partial \varphi / \partial y$ , но и искажения, возникающие вследствие некачественной оптики, определяемые  $\Delta s \partial \varepsilon / \partial y$ , где  $\varepsilon$  — искажения фазы световой волны вследствие aberrаций оптической системы. Для полного исключения aberrаций системы регистрации при исследовании фазовых объектов методом сдвиговой интерферометрии в реальном масштабе времени с регулированием чувствительности измерений требуется соответствующее количество голограмм-компенсаторов, зарегистрированных с соответствующими сдвигами волновых фронтов. Количество голограмм-компенсаторов определяется диапазоном регулирования чувствительности метода. Такая серия голограмм-компенсаторов для удобства перенастройки интерферометра способом, аналогичным вышерассмотренному, может быть реализована в виде записи наложенных голограмм, представляющих собой записанный в одной регистрирующей среде без исследуемого объекта голограммы-компенсаторы с различной величиной бокового сдвига.

Для удобства реализации данного способа и обеспечения полного исключения aberrаций оптической системы боковой сдвиг в интерферометре 8 (рис. 1) должен изменяться фиксировано. При экспериментальной апробации данного способа использовался четырехзеркальный интерферометр бокового сдвига, позволяющий получать как классические интерферограммы, так и голографические с величиной бокового сдвига интерферирующих волновых фронтов, кратной 0.2 mm.

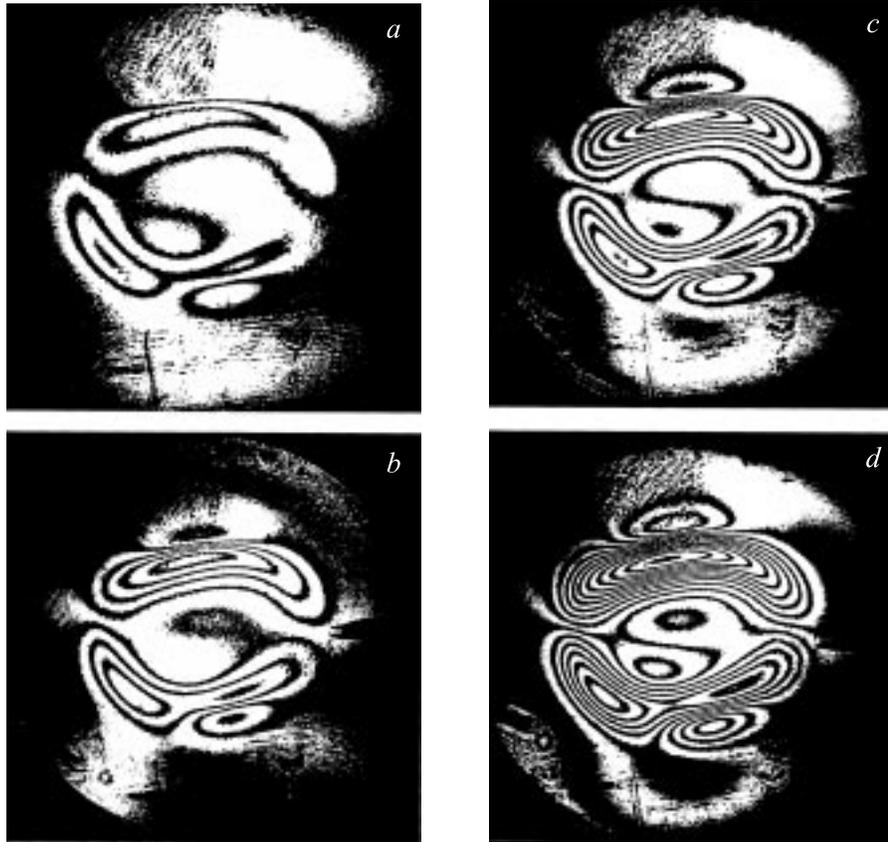
Способ получения безабберационных интерференционных картин бокового сдвига в реальном масштабе времени и с изменяемой чувствительностью измерений был экспериментально апробирован при визуализации процесса плавления плоского образца полиметилметакрилата при его термической обработке в камере высокого давления. Исследование процессов плавления методом классической интерферометрии бокового сдвига не представлялось возможным из-за плохого качества стеклянных окон камеры. На рис. 4 представлены интерферограммы, полученные при сдвигах вдоль оси  $y$ , равных 0.4 и 0.8 mm, подтверждающие необходимость компенсации aberrаций стеклянных окон камеры в случае интерферометрического исследования процессов, происходящих внутри камеры.



**Рис. 4.** Интерференционные картины, визуализирующие aberrации стеклянных окон камеры, полученные при относительных сдвигах вдоль оси  $y$  интерферирующих волн 0.4 (а) и 0.8 (б) mm.

Перед началом эксперимента до термообработки образца в одной регистрирующей среде 9 (рис. 1) записывались 7 голограмм-компенсаторов с возрастающими фиксированными величинами боковых сдвигов: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 и 1.4 mm с использованием вращения этой среды вокруг оси  $z$  на строго фиксированные углы. Перед записью второй голограммы-компенсатора ( $\Delta s = 0.4$  mm) регистрирующая среда разворачивалась на угол  $20^\circ$ . Перед записью последующих голограмм-компенсаторов также осуществлялся ее разворот на строго фиксированный угол  $20^\circ$ . Для обеспечения полной компенсации aberrаций при исследовании объекта 5 в реальном масштабе времени с соответствующей чувствительностью, определяемой величиной сдвига  $\Delta s$ , регистрирующая среда 9 разворачивалась в положение, соответствующее записи голограммы-компенсатора, имеющей такой же сдвиг.

На рис. 5 представлены четыре интерференционные картины (из семи возможных), отображающие с изменяемой чувствительностью в реальном масштабе времени состояние образца, помещенного в камеру высокого давления и подвергающегося локальной термической обработке поверхности. Из рис. 4 и 5 видно, что aberrации, вносимые стеклянными окнами камеры, исключены полностью.



**Рис. 5.** Безабберационные интерференционные картины, отображающие с изменяемой чувствительностью в реальном масштабе времени состояние образца, помещенного в камеру высокого давления, и полученные при относительных сдвигах вдоль оси у интерферирующих волн 0.2 (a), 0.4 (b), 0.8 (c), 1.4 mm (d).

Следует отметить и возможность получения интерференционных картин в данном способе в полосах конечной ширины. Для этого достаточно изменить угол между световыми пучками, освещающими регистрирующую среду  $\vartheta$ .

Хотелось бы отметить перспективность применения последнего способа при исследовании динамических объектов, когда сила оптических неоднородностей изменяется в широком интервале, или объектов, имеющих одновременно зоны с сильными и слабыми возмущениями. В этом случае путем подбора величины бокового сдвига возможно получение интерференционной картины, оптимально отображающей исследуемый процесс.

## Заключение

Таким образом, использование наложенных голограмм-компенсаторов в голографической интерферометрии реального масштаба времени позволяет сравнительно просто получать интерференционные картины с фиксированной настройкой опорных полос в случаях затруднения визуального контроля вследствие отсутствия невозмущенных объектов зон, а также получать безабберационные интерференционные картины с произвольной чувствительностью, определяемой величиной бокового сдвига.

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

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

## Список литературы

- [1] Белозеров А.Ф. // Мат. 2-й Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1971. С. 109–138.
- [2] Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [3] Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [4] Dudderar T.D. // Exp. Mech. 1969. Vol. 9. N 6. P. 281.
- [5] Waetzmann E. // Ann. Physik. 1912. Bd 39. S. 1042–1052.
- [6] Оптический производственный контроль / Под ред. Д.М. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [7] Зейликович И.С., Спорник Н.М. Голографическая диагностика прозрачных сред. Минск: Университетское, 1988. 208 с.

- [8] *Toker G., Levin D.* // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. N 22. P. 5162–5168.
- [9] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 93. № 3. С. 512–516.
- [10] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2004. Т. 96. № 1. С. 148–153.
- [11] *Heflinger L.O., Wuerker R.F., Brooks R.E.* // J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. N 2. P. 642–649.
- [12] *Tanner L.J.* // Sci. Instr. 1966. Vol. 43. N 1. P. 81–83.
- [13] Оптическая голография / Под ред. Г. Колфилда. М.: Мир, 1982. 735 с.
- [14] *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
- [15] *Лявшук И.А., Ляликов А.М.* // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 2. С. 154–158.
- [16] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2006. Т. 100. № 3. С. 511–515.
- [17] *Турухано Б.Г., Турухано Н.* // Мат. 3-й Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1972 С. 213.
- [18] *Зейликович И.С., Спорник Н.М., Овечкин А.П.* // Опт. и спектр. 1977. Т. 42. Вып. 5. С. 969–972.