

07;12

Голографическая интерферометрия фазовых объектов, основанная на записи голограмм бокового сдвига на последовательно установленных носителях

© А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,
230023 Гродно, Белоруссия
e-mail: lyalikov@inbox.ru

(Поступило в Редакцию 31 января 2006 г.)

Рассмотрены способы одновременной записи за один эксперимент пары голограмм бокового сдвига на последовательно установленных носителях. Способы позволяют получать интерференционные картины, отображающие с регулируемой чувствительностью изменения фазы исследуемым объектом. Представлены результаты экспериментальной апробации предложенных способов голографической интерферометрии при исследовании плоских образцов полиметилметакрилата в процессе их термической обработки. Представлены интерференционные картины, подтверждающие перспективность способов для изучения быстропротекающих процессов.

PACS: 42.40.Kw

Введение

При интерферометрических измерениях одной из актуальных проблем является согласование чувствительности применяемого способа с величиной и диапазоном изменений параметра исследуемого объекта. Данная проблема еще более обостряется при исследовании быстропротекающих процессов, когда в достаточной мере промежуток времени необходимо произвести измерение или запись измеряемого сигнала. Для двулучевой голографической интерферометрии с референтной волной согласование чувствительности способа и величины измеряемого параметра объекта реализуется обычно использованием многих длин волн при записи голограмм [1–3].

Одна из особенностей интерферометрии бокового сдвига для случая малых величин сдвига волновых фронтов — прямо пропорциональная зависимость чувствительности данного способа от величины сдвига [4]. Данное обстоятельство и позволяет регулировать чувствительность интерференционного способа в соответствии с величиной измеряемого параметра исследуемого объекта на стадиях как записи голограмм бокового сдвига, так и получения интерференционных картин при восстановлении волнового фронта с голограммы [5,6].

В случае неопределенности диапазона изменения величины измеряемого параметра исследуемого объекта, особенно при изучении быстропротекающих процессов, желательнее одновременно получить несколько интерферограмм или голограмм с различной величиной бокового сдвига и отображающих с различной чувствительностью измеряемый параметр. Такой подход к исследованию позволяет согласовать чувствительность способа с величиной измеряемого параметра исследуемого объекта.

В настоящей работе рассматриваются несколько способов голографической интерферометрии, основанных

на одновременной записи голограмм бокового сдвига на последовательно установленных носителях, позволяющих изменять чувствительность отображения изменений параметра применительно к фазовым объектам при получении интерференционных картин.

Схема интерферометра

На рис. 1 приведена оптическая схема интерферометра для одновременной записи голограмм бокового сдвига на двух последовательно установленных носителях. Излучение лазерного источника света 1 расширялось и коллимировалось телескопической системой 2, 3 в объективной световой пучок с диаметром, соответствующим размерам исследуемой зоны фазового объекта 4. Объектный световой пучок, прошедший исследуемую зону 4, телескопической системой 5, 6 сужался до необходимых размеров и направлялся в интерферометр бокового сдвига 7. В качестве последнего использовался малогабаритный четырехзеркальный интерферометр регулируемого бокового сдвига с возможностью изменения угла между интерферирующими пучками. На выходе 7, в зоне, оптически сопряженной с 4, вдоль хода интерферирующих пучков, устанавливалась пара фотопластинок 8, 9 для одновременной записи голограмм бокового сдвига.

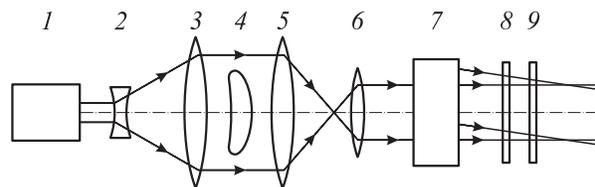


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра для записи голограмм бокового сдвига.

Методика

В зависимости от расположения носителей 8, 9 (рис. 1) относительно плоскости точного совмещения интерферирующих пучков можно рассмотреть два основных способа голографической интерферометрии бокового сдвига, позволяющих получать картины, отображающие с регулируемой чувствительностью изменение формы волнового фронта оптическими неоднородностями объекта 4.

Получение интерференционных картин повышенной чувствительности

На рис. 2, *a* приведена схема записи голограмм бокового сдвига, позволяющая получать пару голограмм с одинаковыми по модулю и различными по знаку значениями сдвига. Такая пара голограмм позволяет на стадии оптической обработки получать интерференционные картины с повышенной чувствительностью отображения.

Совместим плоскость xy пространственной системы координат с плоскостью точного совмещения интерферирующих пучков на 7 (рис. 1). Направление осей y и z (рис. 2, *a*) выберем так, чтобы один из интерферирующих пучков распространялся строго вдоль оси z , а другой был расположен в плоскости yz под углом α к оси z . Предположим, что суммарная величина искажений формы волнового фронта, вызванных

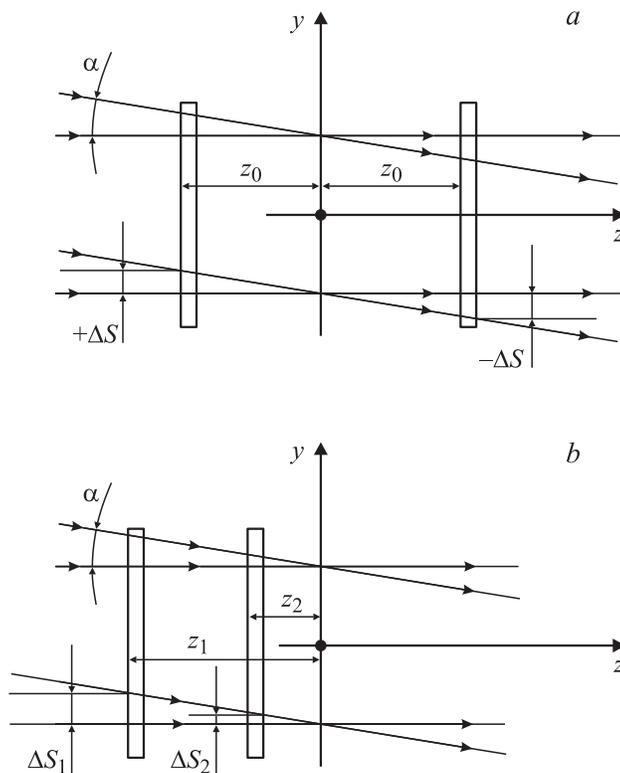


Рис. 2. Схемы записи пары голограмм бокового сдвига, позволяющие повышать (*a*) и изменять (*b*) чувствительность измерений.

абберациями оптической системы объектной ветви и интерферометра бокового сдвига, значительно меньше величины изменений формы волнового фронта оптическими неоднородностями объекта. В этом случае при описании изменений фазы в выражениях комплексных амплитуд интерферирующих волн можно учитывать только изменение фазы $\varphi(x, y)$ неоднородностями. Тогда комплексная амплитуда первой волны, распространяющейся строго вдоль оси z

$$A_0(x, y) = a_1 \exp[i\varphi(x, y)], \quad (1)$$

где a_1 — действительная амплитуда.

Если носители голограмм расположены по обе стороны от плоскости xy и на одинаковом расстоянии z_0 (рис. 2, *a*), то комплексная амплитуда второй волны, распространяющейся под углом α к оси z , в плоскостях первого и второго носителей

$$A_1(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varphi(x, y + \Delta s)]\}, \quad (2)$$

$$A_2(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varphi(x, y - \Delta s)]\}, \quad (3)$$

где $\eta = \sin \alpha / \lambda$, λ — длина волны лазерного источника света I (рис. 1), Δs — величина бокового сдвига волнового фронта второго светового пучка относительно первого, причем $\Delta s = z_0 \tan \alpha$.

В этом случае на первом и втором носителях записываются голограммы со сдвигом, одинаковым по модулю и противоположным по направлению. Если величина бокового сдвига значительно меньше линейных размеров оптической неоднородности, то амплитудное пропускание такой пары голограмм можно представить в виде

$$\tau_1(x, y) \sim \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Delta s \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right] \right\}^{-\gamma/2}, \quad (4)$$

$$\tau_2(x, y) \sim \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} - \Delta s \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right] \right\}^{-\gamma/2}, \quad (5)$$

где $T = 1/\eta$ — период несущих полос голографической структуры, γ — коэффициент контрастности фотоэмульсии.

При оптической обработке такой пары голограмм бокового сдвига по методике [7], но с учетом нелинейной записи голограмм, приводящей к появлению высших порядков дифракции, распределение интенсивности в наблюдаемой интерференционной картине в полосах бесконечной ширины

$$I_{12}(x, y) \sim 1 + \cos \left[2n\Delta s \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right], \quad (6)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — номер порядка дифракции. Следует отметить, что при получении интерференционной картины (6) при совмещении пары голограмм бокового сдвига (4) и (5) в (6), в коэффициенте чувствительности, стоящем перед производной от фазы, число $n = 1$

независимо от выделяемых порядков дифракции [8]. При получении интерференционной картины с пары оптически сопряженных голограмм (4) и (5) в выражении (6) подставляется удвоенный номер выделяемых комплексно сопряженных порядков дифракции.

Чувствительность отображения изменений фазы $\partial\varphi(x, y)/\partial y$ оптическими неоднородностями исследуемого объекта в обоих случаях данного голографического способа в (6) определяется значением коэффициента $2n\Delta s$.

Получение безабберационных интерференционных картин с изменяемой чувствительностью

Прямо пропорциональную зависимость чувствительности отображения изменений фазы оптическими неоднородностями исследуемого объекта от величины бокового сдвига (справедливо только для малого бокового сдвига) удобно использовать при исследовании быстропротекающих процессов, когда величина оптической неоднородности фазового объекта может изменяться в широком диапазоне. В этом случае желательно одновременно записывать несколько голограмм с различными величинами бокового сдвига и чувствительностью отображения изменений фаз неоднородностями.

На рис. 2, *b* приведена схема записи голограмм, отличающаяся от первой (рис. 2, *a*) тем, что носители расположены по одну сторону от плоскости точного совмещения интерферирующих волн (плоскость xy) на расстояниях Δz_1 и Δz_2 от этой плоскости.

Отличительной особенностью второго способа получения интерференционных картин от первого является возможность исключения aberrаций оптической системы записи голограмм бокового сдвига. С учетом искажений, вносимых aberrациями, распределение комплексной амплитуды волны, распространяющейся под углом α к оси z , в плоскости первого и второго носителей соответственно

$$A_1(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varphi(x, y + \Delta s_1) + \Psi(x, y + \Delta s_1)]\}, \quad (7)$$

$$A_2(x, y) = a_1 \exp\{i[2\pi\eta y + \varphi(x, y + \Delta s_2) + \Psi(x, y + \Delta s_2)]\}, \quad (8)$$

где функция $\Psi(x, y)$ определяет суммарные искажения фазы aberrациями оптической системы записи голограмм. Значения боковых сдвигов: $\Delta s_1 = z_1 \operatorname{tg} \alpha$ и $\Delta s_2 = z_2 \operatorname{tg} \alpha$. Соответственно для первой волны, распространяющейся строго вдоль оси z , комплексная амплитуда в отличие от (1) под экспонентой будет содержать дополнительный член $\Psi(x, y)$.

Предположим, что носители экспонируются дважды: один раз с исследуемым объектом 4 (рис. 1), а другой — без него. В этом случае записывается пара двухэкспозиционных голограмм с Δs_1 и Δs_2 . Амплитудные пропускания записанных таким образом голограмм для случая

малых боковых сдвигов и при выполнении линейных условий записи ($\gamma = -2$):

$$\tau_1(x, y) \sim 2 + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Delta s_1 \frac{\partial\varphi(x, y)}{\partial y} + \Delta s_1 \frac{\partial\Psi(x, y)}{\partial y} \right] + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Delta s_1 \frac{\partial\Psi(x, y)}{\partial y} \right], \quad (9)$$

$$\tau_2(x, y) \sim 2 + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Delta s_2 \frac{\partial\varphi(x, y)}{\partial y} + \Delta s_2 \frac{\partial\Psi(x, y)}{\partial y} \right] + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Delta s_2 \frac{\partial\Psi(x, y)}{\partial y} \right]. \quad (10)$$

При освещении первой двухэкспозиционной голограммы бокового сдвига (9) наблюдается интерференционная картина в полосах бесконечной ширины, свободная от aberrаций,

$$I_1(x, y) \sim 1 + \cos \left[\Delta s_1 \frac{\partial\varphi(x, y)}{\partial y} \right]. \quad (11)$$

При освещении второй голограммы бокового сдвига (10) наблюдается интерференционная картина в полосах бесконечной ширины, свободная от aberrаций,

$$I_2(x, y) \sim 1 + \cos \left[\Delta s_2 \frac{\partial\varphi(x, y)}{\partial y} \right]. \quad (12)$$

Из (11) и (12), отображающих с различной чувствительностью изменения фазы оптическими неоднородностями исследуемого объекта, выбирается наиболее оптимальная (обычно, по количеству интерференционных полос в измеряемой зоне). Очевидно, что количество полос в интерференционной картине в полосах бесконечной ширины для одной и той же исследуемой зоны прямо пропорционально коэффициентам чувствительности, т. е. Δs_1 и Δs_2 .

Эксперимент

Рассмотренные способы голографической интерферометрии, основанные на одновременной записи голограмм бокового сдвига на последовательно установленных носителях, были апробированы при исследовании зон плавления плоских образцов полиметилметакрилата в процессе их термической обработки. В качестве регистрирующей среды использовались фотопластинки „Микрат ЛОИ-2“ с толщиной стеклянной подложки 2 mm.

Плоский образец полиметилметакрилата устанавливался в схему интерферометра (рис. 1) в положение 4. Диаметр объективного светового пучка (60 mm) телескопической системой 5, 6 при вводе в малогабаритный четырехзеркальный интерферометр бокового сдвига 7 уменьшался до 20 mm. Угол голографирования при записи голограмм во всех случаях составлял 0.05 rad.

При использовании первого способа получения интерференционных картин повышенной чувствительности на этапе записи голограмм фотопластинки устанавливались по схеме (рис. 2, *a*) на расстоянии $z_0 = 12 \text{ mm}$ от плоскости точного совмещения интерферирующих волн. Величина бокового сдвига вдоль оси y (в вертикальном направлении) составила $\Delta s = \pm 0.6 \text{ mm}$. На рис. 3 приведена интерференционная картина в полосах бесконечной ширины, отображающая с двукратным повышением чувствительности изменение толщины плоского образца полиметилметакрилата в момент его термической обработки. Интерференционная картина получена при освещении коллимированным пучком когерентного света совмещенной пары голограмм бокового сдвига. Для улучшения видности интерференционных полос в задней фокальной плоскости линзы выделялся первый порядок дифракции.

При использовании второго способа получения интерференционных картин записывалась пара голограмм на фотопластинках, установленных по схеме (рис. 2, *b*) на расстояниях от плоскости точного совмещения интерферирующих волн $z_1 = 40$ и $z_2 = 12 \text{ mm}$, соответственно $\Delta s_1 = 2.0$ и $\Delta s_2 = 0.6 \text{ mm}$. Первая экспозиция при записи голограмм производилась до начала термической обработки образца, а вторая — в момент обработки.

На рис. 4 представлены интерференционные картины в полосах бесконечной ширины, полученные с двухэкспозиционных голограмм бокового сдвига и отображающие с различной чувствительностью одну и ту же зону исследуемого образца. Первая интерференционная картина (рис. 4, *a*) отображает изменения толщины образца



Рис. 3. Интерференционная картина, отображающая с повышением чувствительности изменения толщины плоского образца полиметилметакрилата и получения при совмещении пары голограмм бокового сдвига для $\Delta s = \pm 0.6 \text{ mm}$.

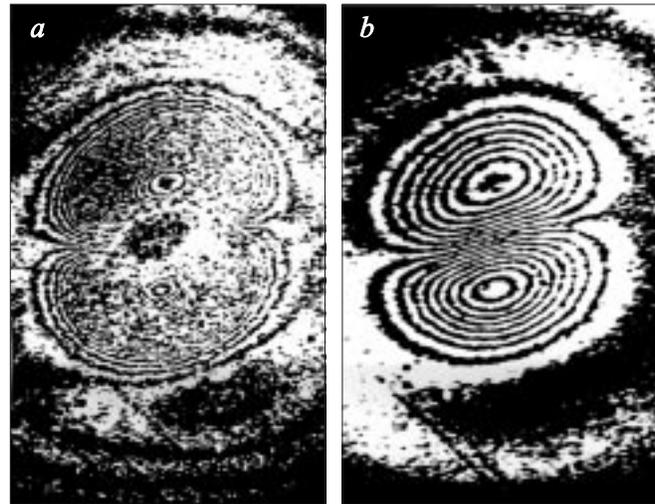


Рис. 4. Безабберационные интерференционные картины, отображающие с различной чувствительностью изменения толщины плоского образца полиметилметакрилата и полученная с двухэкспозиционных голограмм бокового сдвига для $\Delta s_1 = 2.0 \text{ mm}$ (*a*) и $\Delta s_2 = 0.6 \text{ mm}$ (*b*).

с чувствительностью, большей в 3.3 раза, чем у второй картины (рис. 4, *b*). Видно, что чувствительность первой настолько велика, что интерференционные полосы практически неразличимы из-за большого их количества, что нельзя сказать о второй картине. Для количественной оценки наиболее подходящей является вторая картина с меньшей чувствительностью отображения изменений толщины исследуемого образца в зоне термической обработки.

Заключение

Таким образом, запись голограмм бокового сдвига на последовательно установленных носителях позволяет реализовать ряд способов голографической интерферометрии как с повышением чувствительности отображения изменений формы волнового фронта исследуемой оптической неоднородностью фазового объекта, так и с изменением ее, причем даже в сторону уменьшения. Данная методика проведения интерференционных исследований перспективна при согласовании чувствительности интерференционного способа и величины оптической неоднородности исследуемого фазового объекта, например, при исследовании быстропротекающих процессов в случае неопределенности диапазона изменений величины неоднородности.

Автор благодарит А.В. Сулягина за помощь в обработке голограмм бокового сдвига и получении интерференционных картин.

Список литературы

- [1] *Мустафин К.С., Селезнев В.А.* // Опт. и спектр. 1972. Т. 32. Вып. 5. С. 993–1000.
- [2] *Игнатов А.Б., Комиссарова И.И., Островская Г.В.* и др. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 2. С. 417–423.
- [3] *Ляликов А.М., Туев А.Ф.* // Опт. и спектр. 1992. Т. 73. № 2. С. 388–392.
- [4] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [5] *Зейликович И.С., Спорник Н.М.* Голографическая диагностика прозрачных сред. Минск: Университетское, 1988. 208 с.
- [6] *Toker G., Levin D.* // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. N 22. P. 5162–5168.
- [7] *Ляликов А.М.* // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 6. С. 573–575.
- [8] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.* и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.