

07;12

Высококочувствительный интерференционно-голографический метод исследования прозрачных объектов с малыми поперечными размерами

© И.А. Лявшук, А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 22 октября 2007 г. В окончательной редакции 28 февраля 2008 г.)

Рассмотрен новый метод исследования прозрачных объектов, имеющих малые поперечные размеры. Метод основан на голографической интерферометрии бокового сдвига, сочетающей смещение исследуемого прозрачного объекта между записью пары голографических интерферограмм и их оптическую обработку. Интерференционные картины исследуемого прозрачного объекта вследствие величины бокового сдвига, равного или превышающего линейные размеры объекта, эквивалентны по виду интерференционным картинам, получаемым в двулучевом интерферометре с референтной волной, кроме этого они имеют повышенную чувствительность отображения оптических неоднородностей исследуемого объекта.

Представлены результаты эксперимента по апробации данного метода для контроля оптических неоднородностей кристалла активной среды твердотельного лазера. Получены интерференционные картины, отображающие оптическую неоднородность кристалла с повышенной в 12 раз чувствительностью.

PACS 42.40.Kw

Введение

Интерференционные методы относятся к одним из наиболее чувствительных способов измерения различных параметров прозрачных объектов [1,2]. Однако при исследованиях объектов с малыми поперечными размерами часто возникают проблемы, связанные с недостаточным изгибом интерференционных полос. Одним из путей решения данной задачи является повышение чувствительности интерференционного метода [3,4]. В производственных условиях интерференционные методы из-за своей чувствительности к различного рода вибрациям имеют ограниченное использование.

Интерферометры сдвига имеют пониженную чувствительность к вибрациям, просты в юстировке оптической схемы и по чувствительности измерений не уступают двулучевым интерферометрам с референтной волной. Из всего многообразия способов осуществления сдвига между одинаковыми волновыми фронтами наибольшее распространение получили интерферометры бокового сдвига [1], которые в настоящее время находят наиболее широкое применение в различных областях науки и техники [5–9]. Главной особенностью интерферометрии бокового сдвига является зависимость поведения полос в интерференционной картине как от соотношения величины сдвига и размеров 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 для двулучевой интерферометрии с референтной волной [10]. Этот частный случай для интерферометрии заслуживает особого внимания, так как одновременно объединяет в себе все достоинства двух методов.

В первую очередь, это касается исключения сложности в расшифровке интерференционной картины, свойственной для интерферометрии сдвига. Для выше отмеченного частного случая интерферометрии бокового сдвига поведение интерференционных полос отображает непосредственно изменения фазы зондирующей волны исследуемым объектом.

Увеличение чувствительности измерений в интерферометрии сдвига при превышении величины бокового сдвига линейных размеров исследуемого объекта может быть достигнуто за счет использования последовательного двойного бокового сдвига [11]. В этом случае наблюдается муаровая картина, отображающая с двукратным повышением чувствительности в реальном масштабе времени изменения фазы зондирующей световой волны исследуемым объектом.

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 [12]. Однако в этих способах повышения чувствительности измерений остаточные аберрации, связанные с боковым сдвигом зондирующего пучка [10] или голографических интерферограмм [11], остаются не исключенными, что естественно, повышает требования к качеству используемых оптических элементов интерферометра бокового сдвига. В работе [13] описан метод голографической интерферометрии бокового сдвига, сочетающий запись опорной голографической интерферограммы бокового сдвига с последующим смещением исследуемого объекта на величину бокового сдвига. Метод позволяет одновременно получать несколько безаберрационных

интерференционных картин, отображающих с различной чувствительностью изменения фазы световой волны исследуемым объектом. Однако данный метод позволяет лишь удвоить чувствительность измерений, что в ряде случаев является недостаточным.

В настоящей работе рассмотрен новый метод исследования прозрачных объектов, имеющих малые поперечные размеры. Метод основан на голографической интерферометрии бокового сдвига, сочетающей смещение исследуемого прозрачного объекта между записью пары голографических интерферограмм с их оптической обработкой.

Схема установки для записи голографических интерферограмм

На рис. 1 представлена оптическая схема установки для записи голографических интерферограмм. Важной особенностью данной установки является то, что диаметр зондирующего светового пучка должен превышать линейные размеры исследуемого фазового объекта, определяемые вдоль направления бокового сдвига, не менее чем в два раза. Для объектов с малыми поперечными размерами реализовать данное условие не представляет труда.

При записи первой голографической интерферограммы исследуемый объект устанавливается в одну из половин зондирующего светового пучка, например в верхнюю, в положение 1. В этом случае в интерферометре 3 между интерферирующими пучками задается вертикальный боковой сдвиг на половину диаметра пучка. Перед записью второй голографической интерферограммы исследуемый объект перемещается с верхней половины в нижнюю положение 2. Для устранения эффектов прямотеневой визуализации оптических неоднородностей исследуемого объекта плоскость записи голографических интерферограмм 4 необходимо оптически сопрячь с плоскостью исследуемого объекта. В конкретном случае это реализовывалось объективом, расположенным в интерферометре бокового сдвига 3.

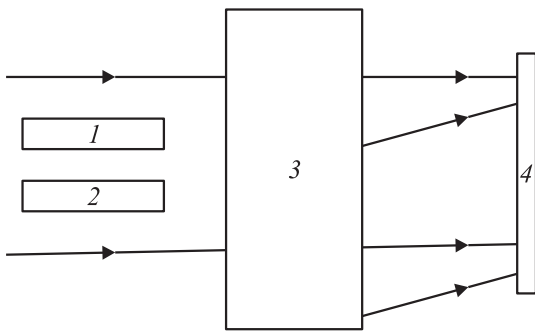


Рис. 1. Оптическая схема установки для записи голографических интерферограмм: 1, 2 — положение исследуемого объекта; 3 — интерферометр бокового сдвига; 4 — плоскость записи голографических интерферограмм.

В качестве интерферометра бокового сдвига использовался малогабаритный четырехзеркальный интерферометр с произвольным регулированием величины бокового сдвига и периода интерференционных полос в записываемых голографических интерферограммах.

Запись голографических интерферограмм

Выберем систему координат xuz следующим образом. Оси x и y расположим так, чтобы ось y совпала со сдвигом волновых фронтов в плоскости записи голографической интерферограммы, а z — с направлением распространения зондирующего светового пучка.

Предположим, что линейные размеры исследуемого фазового объекта вдоль оси y равны или меньше величины сдвига s . Это ограничение не касается линейных размеров объекта вдоль оси x . Расположим исследуемый фазовый объект в положение 1 (рис. 1). В этом случае распределение фазы $\Phi_1(x, y)$ зондирующего светового пучка с плоским волновым фронтом вследствие прохождения исследуемого фазового объекта удобней всего описать в виде:

$$\Phi_1(x, y) = \begin{cases} \varphi(x, y) + \varepsilon(x, y), & \text{для верхней зоны,} \\ \varepsilon(x, y), & \text{для нижней зоны,} \end{cases} \quad (1)$$

где $\varepsilon(x, y)$ и $\varphi(x, y)$ — искажения фазы, характеризующие деформацию плоского волнового фронта вследствие аберраций и прохождения им фазового объекта соответственно.

Голографическая интерферограмма бокового сдвига записывается при наложении двух световых пучков, полученных при делении зондирующего пучка по амплитуде в интерферометре бокового сдвига 3. Один из пучков распространяется вдоль оси z и фаза его описывается выражением (1). Другой пучок сдвинут вдоль оси y на величину s 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

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

где $\eta = \cos\beta/\lambda$, β — угол между направлением распространения пучка и осью y , λ — длина волны.

При записи первой голографической интерферограммы в плоскости 4 при таком условии задания бокового сдвига накладываются нижняя половина первого интерферирующего пучка с фазой (1) и верхняя половина второго пучка с фазой (2). Предположим, что действительные амплитуды интерферирующих световых пучков равны. В этом случае получим, согласно (1),

(2), амплитудное пропускание первой голографической интерферограммы бокового сдвига:

$$\tau_1(x, y) \sim \left\{ 1 + \cos[2\pi\eta y + \varphi(x, y + s) + \varepsilon(x, y + s) - \varepsilon(x, y)] \right\}^{-\gamma/2}, \quad (3)$$

где γ — коэффициент контрастности фотоэмульсии.

Перед записью второй голографической интерферограммы исследуемый объект из верхней половины пучка смещается в нижнюю на величину бокового сдвига. Приемлемая 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 изображений объекта в плоскости 4. Более точное совмещение достигается при получении бесконечно широкой полосы в муаровой картине, наблюдаемой в плоскости голографической интерферограммы 4. После этого объект 1 из верхней половины пучка перемещается в нижнюю половину в положение 2 до совмещения изображения его контуров с изображением объекта, записанным на первой голографической интерферограмме. После такого смещения объекта распределения фаз световых пучков, записывающих вторую голографическую интерферограмму, получим

$$\Phi'_1(x, y) = \begin{cases} \varepsilon(x, y), & \text{для верхней зоны,} \\ \varphi(x, y + s) + \varepsilon(x, y), & \text{для нижней зоны,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Phi'_2(x, y) = \begin{cases} 2\pi\eta y + \varepsilon(x, y + s), & \text{для верхней зоны,} \\ 2\pi\eta y + \varphi(x, y + s) + \varepsilon(x, y + s), & \text{для нижней зоны.} \end{cases} \quad (5)$$

При записи второй голографической интерферограммы в плоскости 4 накладываются нижняя половина первого интерферирующего пучка с фазой (4) и верхняя половина второго пучка с фазой (5). В этом случае амплитудное пропускание второй голографической интерферограммы:

$$\tau_2(x, y) \sim \left\{ 1 + \cos[2\pi\eta y - \varphi(x, y + s) + \varepsilon(x, y + s) - \varepsilon(x, y)] \right\}^{-\gamma/2}. \quad (6)$$

Из выражений (3) и (6) видно, что изменения фазы, вызванные объектом, имеют противоположные знаки. Это подтверждается противоположными изгибами опорных полос в первой (рис. 2, *a*) и второй (рис. 2, *b*) интерферограммах исследуемого фазового объекта, полученных при сравнительно небольшой частоте опорных полос. Исследуемый объект представлял собой тонкий цилиндрический кристалл активной среды твердотельного лазера с отполированными плоскопараллельными торцами. Диаметр кристалла 3.5, а длина — 51 mm. Величина бокового сдвига и соответственно перемещение исследуемого кристалла составили ~ 3.5 mm.

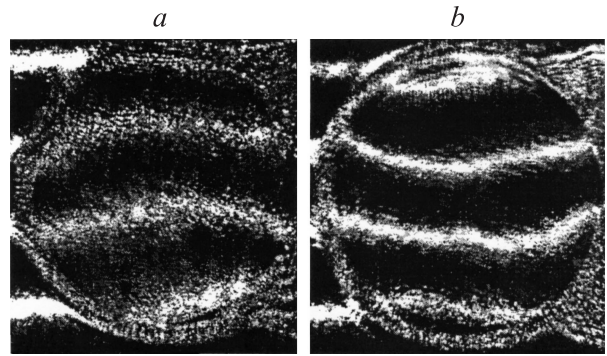


Рис. 2. Сдвиговые интерферограммы, полученные до (а) и после (б) смещения исследуемого объекта.

Получение высокочувствительных интерференционных картин

Возможны несколько способов оптической обработки пары голографических интерферограмм вида (3) и (6), отличающихся по сложности реализации, а также по чувствительности отображения в получаемых интерференционных картинах изменений волнового фронта исследуемым фазовым объектом. Важной особенностью реализации всех способов получения интерференционных картин является ограничение на минимальную величину частоты интерференционных полос обрабатываемых голографических интерферограмм, определяемую параметром η в выражениях (3) и (6). Обычно эта частота не должна быть менее 5 mm^{-1} .

Если голографические интерферограммы бокового сдвига (3) и (6) точно совместить так, чтобы записанные изображения фазового объекта совпали на первой и второй голографических интерферограммах, то будет наблюдаться муаровая картина, отображающая оптические неоднородности объекта с удвоенной чувствительностью. Для повышения контрастности картины можно использовать фильтрацию пространственных частот. Если совмещенные голографические интерферограммы осветить коллимированным пучком света и в задней фокальной плоскости объектива отверстием в диафрагме выделить первый порядок дифракции, то будет наблюдаться интерференционная картина с распределением освещенности

$$I(x, y) \sim 1 + \cos[2\varphi(x, y + s)]. \quad (7)$$

Для этой интерференционной картины искажения вследствие аберраций полностью исключены, но нет выигрыша в чувствительности по сравнению со случаем, рассмотренным в работе [13]. На рис. 3, *a* представлена интерференционная картина исследуемого кристалла в полосах бесконечной ширины, полученная при выделении первого порядка дифракции с двух совмещенных голографических интерферограмм. Интерференционная картина свидетельствует о наличии оптических неоднородностей в исследуемом кристалле, но чувствительность измерений для более детальных исследований недостаточна.

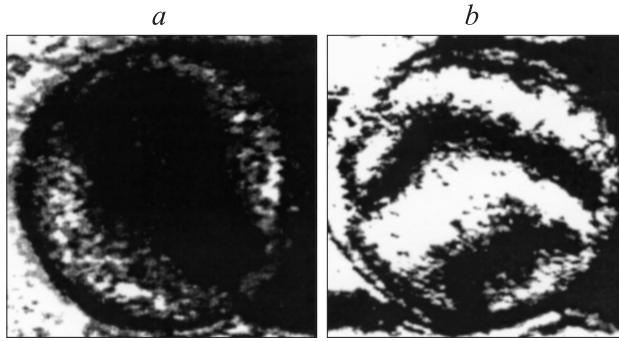


Рис. 3. Интерференционные картины исследуемого кристалла в полосах бесконечной ширины в полосах бесконечной (а) и конечной (b) ширины с двукратным повышением чувствительности.

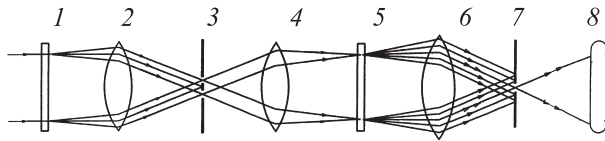


Рис. 4. Схема устройства оптической обработки пары оптически сопряженных голографических интерферограмм: 1, 5 — голографические интерферограммы; 2, 4, 6 — объективы; 3, 7 — диафрагмы; 8 — плоскость наблюдения интерференционной картины.

Для получения интерференционной картины в полосах конечной ширины одна из голографических интерферограмм разворачивалась на небольшой угол. На рис. 3, b представлена такая интерференционная картина. Однако, как следует заметить, при получении интерференционных картин в полосах конечной ширины происходит неполное исключение aberrаций, что сказывается на точности измерений при расшифровке таких картин.

Для достижения значительно большей чувствительности измерений можно использовать оптическую обработку пары голографических интерферограмм вида (3) и (6) в устройстве, приведенном на рис. 4. Такая схема использовалась ранее для оптической обработки объектной и опорной голограмм фазовых объектов, а также для пары голографических интерферограмм бокового сдвига, сдвинутых друг относительно друга [14]. Обязательным условием достижения высокой чувствительности в получаемых интерференционных картинах является нелинейность записанных голографических интерферограмм, определяемая условиями их записи и химической обработки. Нелинейность проявляется в возникновении высших порядков дифракции при освещении голографических интерферограмм [3].

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

дифрагируют волны вида

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

$$A_n^*(x, y) = a_n \exp\{-i[2\pi n\eta y + n\varphi(x, y + s) + n\varepsilon(x, y + s) - n\varepsilon(x, y)]\}, \quad (8)$$

где a_n — действительная амплитуда волны. Волны вида (8) 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 определится как

$$[A_n(x, y) + A_n^*(x, y)]\tau_2(x, y).$$

Можно показать с учетом (6) и (8), что по нормали ко второй голографической интерферограмме 5 будут распространяться волны, дифрагированные в $\pm n$ -е порядки, вида:

$$B_n(x, y) = b_n \exp[i2n\varphi(x, y + s)],$$

$$B_n^*(x, y) = b_n \exp[-i2n\varphi(x, y + s)], \quad (9)$$

где b_n — действительная амплитуда волны. Волны вида (9) выделяются в задней фокальной плоскости объектива 6 отверстием в диафрагме 7 и в плоскости 8, оптически сопряженной с голографическими интерферограммами 1, 5 и образуют интерференционную картину вида

$$I_n(x, y) \sim 1 + \cos[-4n\varphi(x, y + s)]. \quad (10)$$

Данная интерференционная картина отображает с $4n$ -кратным повышением чувствительности изменения волнового фронта объектной волны исследуемым объектом, при этом aberrации компенсированы.

На рис. 5 приведены интерференционные картины, полученные при оптической обработке пары голографических интерферограмм, размещенных в оптически

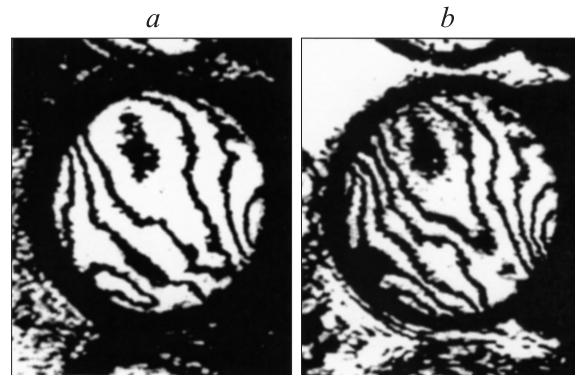


Рис. 5. Интерференционные картины, полученные в устройстве оптической обработки с повышенной чувствительностью измерений в 8 (a) и 12 (b) раз.

сопряженных плоскостях, при выделении ± 2 -х (рис. 5, *a*) и ± 3 -х (рис. 5, *b*) порядков дифракции. Данные интерференционные картины имеют повышенную чувствительность измерений соответственно в 8 и 12 раз по сравнению с интерференционными картинами исследуемого кристалла, полученными с помощью обычного двулучевого интерферометра с референтной волной.

Заключение

Таким образом, предложенный интерференционно-голографический метод исследования прозрачных объектов с малыми поперечными размерами позволяет за счет сочетания смещения исследуемого объекта между записью сдвиговых голографических интерферограмм и их оптической обработки значительно повысить чувствительность измерений и получить большее количество интерференционных полос в зоне оптической неоднородности. Несмотря на многоэтапность данного метода его можно рекомендовать для высокоточного контроля качества оптических элементов, особенно в случае их малых поперечных размеров.

Список литературы

- [1] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Макары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [2] *Афанасьев В.А.* Оптические измерения. М.: Высш. шк., 1981. 229 с.
- [3] *Зейликович И.С., Спорник Н.М.* Голографическая диагностика прозрачных сред. Минск: Университетское, 1988. 208 с.
- [4] *Зейликович И.С., Ляликов А.М.* // УФН. 1991. Т. 161. № 1. С. 143–164.
- [5] *Шехтман В.Н., Родинов А.Ю., Пельменев А.Г.* // Опт. и спектр. 1994. Т. 76. № 6. С. 988–993.
- [6] *Башкин А.С., Коротков П.И., Максимов Ю.П.* и др. // Квант. электрон. 1997. Т. 24. № 9. С. 786–790.
- [7] *Santhanakrishnan T., Palanisamy P.K., Sirohi R.S.* // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. № 16. P. 3447–3449.
- [8] *Иванов П.В., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И.* // Квант. электрон. 1999. Т. 27. № 1. С. 78–80.
- [9] *Соколов В.И.* // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 10. С. 891–896.
- [10] *Комиссарук В.А.* // Тр. ВВИА им. Жуковского. 1971. Вып. 1301. С. 121–144.
- [11] *Ляликов А.М.* // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 3. С. 290–292.
- [12] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2005. Т. 99. № 1. С. 151–155.
- [13] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2007. Т. 102. № 5. С. 874–879.
- [14] *Спорник Н.М., Белозеров А.Ф., Бывальцев А.М.* и др. А.с. СССР. № 396540 // Б.И. 1973. № 36.