

07;12

Дисперсионная двухдлинноволновая голографическая интерферометрия бокового сдвига

© А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 16 июля 2003 г. В окончательной редакции 26 апреля 2004 г.)

Показано, что двухдлинноволновая регистрация голографических интерферограмм малого бокового сдвига в интерферометре с дифракционной решеткой позволяет исследовать дисперсионные свойства прозрачных объектов при использовании зондирующих излучений с произвольными длинами волн. Восстановленные интерференционные картины представляют собой линии на восстановленном изображении объекта, характеризующие величину производной по направлению сдвига от разности показателей преломления исследуемой среды на длинах волн зондирующих пучков. Приведены результаты экспериментальной апробации предложенной методики.

Введение

Дисперсионная двухдлинноволновая голографическая интерферометрия нашла широкое применение в диагностике плазмы при определении концентрации электронов без введения каких-либо поправок на рефракцию тяжелых частиц [1–7]. Регистрация двухдлинноволновых голограмм в нелинейных условиях позволила восстанавливать интерферограммы, в которых вид интерференционной картины определялся разностью показателей преломления $n_1(x, y, z) - n_2(x, y, z)$ на длинах волн λ_1 и λ_2 зондирующих световых пучков [1,2]. Получение интерференционных картин, соответствующих контурам постоянной разности показателей преломления для предложенной методики, реализовывалось для длин волн, кратных целому числу, в частности $\lambda_2/\lambda_1 = 2$. Это было связано с зависимостью коэффициента чувствительности измерений от номера порядка дифракции света на нелинейной голограмме. Метод интерферометрии малого бокового сдвига в отличие от двухлучевой интерферометрии, основанной на принципе сравнения волнового фронта с фронтом референтной волны, позволяет получать интерферограммы, чувствительность измерений в которых определяется величиной относительного сдвига Δs интерферирующих волновых фронтов [8]. Интерферометрия бокового сдвига перспективна для диагностических задач в случаях, когда возникают проблемы с формированием референтной эталонной волны.

В настоящее время интерферометрия сдвига находит широкое применение для измерения малых искажений волнового фронта [9,10]. Применение принципов голографии для интерферометрии бокового сдвига позволило значительно расширить возможности метода [7,11–14]. Использование различных приемов регистрации и оптической обработки голографических интерферограмм бокового сдвига, широко используемых в голографической интерферометрии фазовых объектов, позволило разрабо-

тать методы проведения исследований быстропротекающих процессов в прозрачных объектах с возможностью изменения коэффициента чувствительности измерений в широком диапазоне [15,16].

В данной работе показана возможность исследования дисперсионных свойств прозрачных сред на произвольных длинах волн методом интерферометрии малого бокового сдвига с использованием интерферометра с дифракционной решеткой.

Регистрация двухдлинноволновых голографических интерферограмм бокового сдвига

На рис. 1, а приведена оптическая схема установки для исследования дисперсионных свойств прозрачных сред излучением на двух длинах волн. Основную часть установки составляет интерферометр с дифракционной решеткой [17] для регистрации голографических интерферограмм бокового сдвига.

Световые пучки от двух лазеров 1 и 2 светоделителем 3 совмещаются и направляются в интерферометр сдвига с дифракционной решеткой. Телескопической системой 4, 5 пучки света расширяются, коллимируются и освещают исследуемый объект 6. При прохождении прозрачного объекта 6 изменения фаз $\varphi_1(x, y)$ и $\varphi_2(x, y)$ световых пучков можно представить в виде

$$\varphi_{1,2}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_{1,2}} \int_0^l n_{1,2}(x, y, z) dz, \quad (1)$$

где нижние индексы 1 и 2 относятся соответственно к параметрам первого и второго световых пучков с длинами волн λ_1 и λ_2 ; $n_1(x, y, z)$ и $n_2(x, y, z)$ — показатели преломления объекта 6 на длинах волн λ_1 и λ_2 ; l — толщина объекта вдоль направления зондирования; прямоугольная система координат x, y, z выбрана так, что

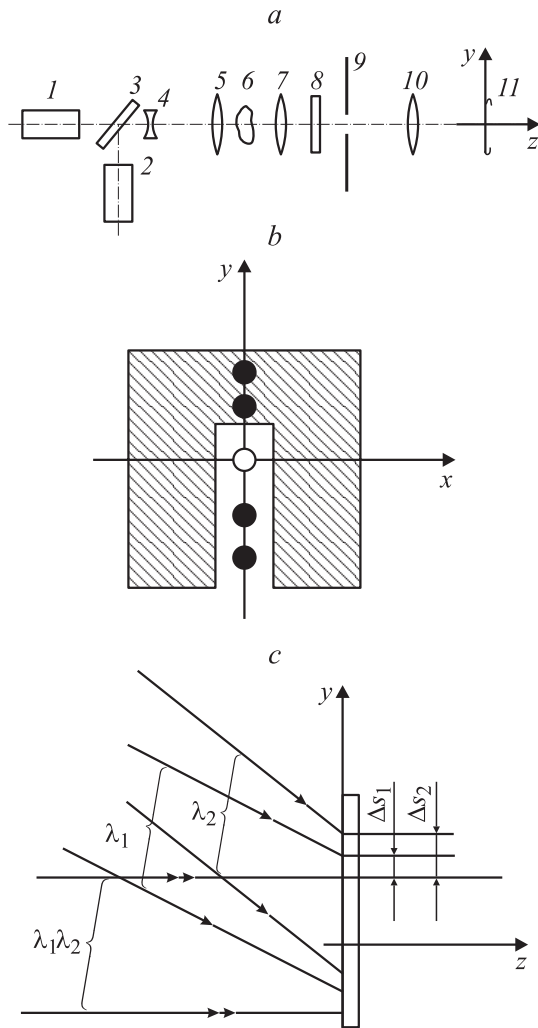


Рис. 1. Оптическая схема установки для исследования дисперсионных свойств прозрачных сред (а), вид диафрагмы и картина дифракционного спектра световых пучков с длинами волн λ_1 и λ_2 (b) и схема наложения световых пучков в плоскости регистрации двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига (с).

направление распространения светового пучка, зондирующего прозрачный объект, параллельно оси z .

Разделение каждого из световых пучков на два когерентных осуществляется дифракционной решеткой 8, установленной вблизи задней фокальной плоскости объектива 7, перед диафрагмой 9. Предположим, что штрихи дифракционной решетки 8 ориентированы перпендикулярно оси координат y . На рис. 1, b приведены вид диафрагмы 9 (рис. 1, a) и картины дифракционного спектра (рис. 1, b) световых пучков с длинами волн λ_1 и λ_2 . Дифракционные максимумы расположены на прямой, параллельной оси координат y . Центральный дифракционный максимум соответствует прямопрошедшим пучкам с длинами волн λ_1 и λ_2 , причем дифракционные максимумы для пучков с длинами волн λ_1 и λ_2 совпадают. Вследствие дисперсии дифракционной

решетки дифракционные максимумы плюс и минус первых порядков разнесены в пространстве и не совпадают, причем крайнее положение дифракционных максимумов соответствует пучку с большей длиной волны ($\lambda_1 < \lambda_2$). Отверстием в диафрагме (рис. 1, b) выделяются пучки, дифрагированные в первые порядки одного знака, например минус первые. Таким образом, две пары пучков с длинами волн λ_1 и λ_2 отделяются диафрагмой 9 (рис. 1, a) от других пучков, коллимируются объективом 10 и в плоскости 11 образуют (каждая для своей длины волны) две интерференционные картины бокового сдвига. На рис. 1, c представлена схема наложения световых пучков в плоскости регистрации 11 (рис. 1, a) двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига. Боковые сдвиги Δs_1 и Δs_2 для интерференционных картин, образованных световыми пучками с длинами волн λ_1 и λ_2 , различаются вследствие дисперсии дифракционной решетки и направлены вдоль оси y . Распределение интенсивностей в голографических интерферограммах бокового сдвига в случае малых величин сдвигов, удовлетворяющих условию $\Delta s_{1,2} \ll L$, где L — поперечные размеры исследуемого объекта б (рис. 1, a), можно представить как

$$I_{1,2}(x, y) \sim 1 + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Delta s_{1,2} \frac{\partial \varphi_{1,2}(x, y)}{\partial y} \right], \quad (2)$$

где T — период полос голографических интерферограмм, определяемый углами между интерферирующими когерентными пучками и регулируемый как периодом штрихов дифракционной решетки 8 (рис. 1, a), так и ее положением относительно задней фокальной плоскости объектива 7 [18,19].

Следует отметить, что периоды полос голографических интерферограмм, полученных пучками с различными длинами волн, вследствие особенностей интерферометра бокового сдвига с дифракционной решеткой одинаковы [19].

Таким образом, в плоскости 11 (рис. 1, a) регистрируется пара голографических интерферограмм бокового сдвига вида (2), которые вследствие различия длин волн λ_1 и λ_2 некогерентно накладываются друг на друга, образуя на фотопленке двухдлинноволновую голографическую интерферограмму бокового сдвига. После экспонирования фотопленки и ее химической обработки в случае выполнения линейных условий регистрации ($\gamma = -2$, где γ — коэффициент контрастности фотозульсии) амплитудное пропускание двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига можно представить в виде

$$\begin{aligned} \tau(x, y) &\sim I_1(x, y) + I_2(x, y) \\ &\sim 2 + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Phi_1(x, y) \right] + \cos \left[\frac{2\pi y}{T} + \Phi_2(x, y) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\Phi_{1,2}(x, y) = \Delta s_{1,2} \frac{\partial \varphi_{1,2}(x, y)}{\partial y}. \quad (4)$$

Амплитудное пропускание двухдлинноволновой голографической интерферограммы вида (3) соответствует по своему виду пропусканию двухэкспозиционной голограммы.

Восстановление контурных линий

Методика восстановления интерференционной картины с двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига (3) принципиально не отличается от восстановления интерференционной картины с двухэкспозиционной голограммы. При освещении голограммы вида (3) коллимированным пучком света в первом порядке дифракции распространяются две волны, дифрагированные на структуре полос голографических структур, соответствующих голографическим интерферограммам бокового сдвига, образованным излучением с длинами волн λ_1 и λ_2 . Фазы этих волн, согласно (3), $\Phi_1(x, y)$ и $\Phi_2(x, y)$. Для повышения видности восстановленных контурных линий обычно используется фильтрация пространственных частот, т.е. отверстием в диафрагме выделяются световые пучки, дифрагированные в первом порядке. В этом случае распределение интенсивности в интерференционной картине, согласно (3), имеет вид

$$I_2(x, y) \sim 1 + \cos[\Phi_1(x, y) - \Phi_2(x, y)]. \quad (5)$$

Для светлых интерференционных полос выполняется условие

$$\Phi_1(x, y) - \Phi_2(x, y) = 2\pi N, \quad \text{где } N = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

С учетом (1) и (4) последнее условие можно записать в виде

$$\frac{\Delta s_1}{\lambda_1} \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_0^l n_1(x, y, z) dz \right] - \frac{\Delta s_2}{\lambda_2} \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_0^l n_2(x, y, z) dz \right] = N. \quad (7)$$

Данное выражение приобретает еще более удобный вид, если коэффициенты, характеризующие чувствительность измерений, становятся равными, т.е.

$$\frac{\Delta s_1}{\lambda_1} = \frac{\Delta s_2}{\lambda_2} = C. \quad (8)$$

Одним из замечательных свойств интерферометра бокового сдвига с дифракционной решеткой, установленной в фокусе или вблизи фокуса, является постоянство отношения величины сдвига интерферирующих пучков к длине волны источника света, т.е. для этого типа интерферометра $\Delta s/\lambda = \text{const}$ [19].

Таким образом, для нашего случая условие (8) выполняется автоматически. С учетом (8) условие образования светлых интерференционных полос можно представить в виде

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \int_0^l [n_1(x, y, z) - n_2(x, y, z)] dz \right\} = \frac{N}{C}. \quad (9)$$

Выражение (9) описывает интерференционные полосы в восстановленном изображении исследуемого объекта. Каждая интерференционная полоса соответствует зоне исследуемого прозрачного объекта, где произведение производной от разности показателей преломления на его толщину величина постоянная. Вид интерференционной картины зависит от дисперсионных свойств исследуемого объекта.

Экспериментальная апробация

Для апробации предложенной методики была собрана экспериментальная установка, приведенная на рис. 1, а. В качестве лазеров 1, 2 использовались аргоновый лазер, генерирующий на длине волны $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$, и гелий-неоновый лазер ЛГН-215, генерирующий на длине волны $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$. Выравнивание экспозиций излучений на разных длинах волн при регистрации двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига осуществлялось вращением поляризатора, установленного на выходе аргонового лазера. В качестве дифракционной решетки 8 (рис. 1, а) использовалась фазовая дифракционная решетка с периодом полос $\sim 60 \mu\text{m}$, полученная голографическим способом на фотопленке ФГ-690 с последующим отбеливанием.

В качестве объекта была использована стеклянная пластина, поверхность которой была термически обработана и отличалась от плоской. На рис. 2, а приведена интерферограмма бокового сдвига ($\Delta s = 1.0 \text{ mm}$) исследуемой пластины, полученная при настройке на бесконечно широкую полосу и при использовании излучения гелий-неонового лазера ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). На рис. 2, б приведена восстановленная интерференционная картина с двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига той же стеклянной пластины.

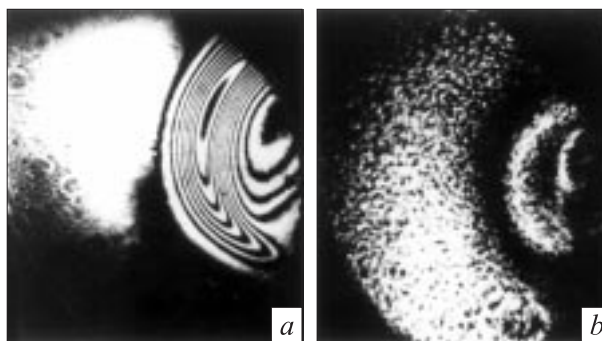


Рис. 2. Интерферограмма бокового сдвига ($\Delta s = 1.0 \text{ mm}$) исследуемой стеклянной пластины, полученная при настройке на бесконечно широкую полосу при использовании излучения гелий-неонового лазера ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) (а); и восстановленная интерференционная картина с двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига, зарегистрированной излучением на длинах волн $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$ и $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$, той же стеклянной пластины (б).

При регистрации двухдлинноволновой голографической интерферограммы бокового сдвига на фотопленку ФГ-690 относительные сдвиги пучков с длинами волн $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$ и $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$ составляли $\Delta s_1 = 0.8 \text{ mm}$ и $\Delta s_2 = 1.0 \text{ mm}$. Интерференционные полосы в последней интерферограмме (рис. 2, *b*) соответствуют зонам исследуемой стеклянной пластины, где производная по направлению сдвига от произведения разности показателей преломления данного сорта стекла на длину волн $\lambda_1 = 488.0 \text{ nm}$ и $\lambda_2 = 632.8 \text{ nm}$ на его толщину — величина постоянная. Ввиду специфичности объекта данная интерферограмма характеризует форму рельефа поверхности пластины, причем чувствительность ее определяется дисперсионными свойствами данного сорта стекла.

Заключение

Следует отметить перспективность данной методики при исследовании дисперсионных свойств плазменных объектов. В этом случае в качестве зондирующих источников света могут быть использованы любые импульсные источники света, излучающие на любых длинах волн, удобных для зондирования плазмы.

В заключение работы выражаю признательность В.О. Семеновичу за помощь в постановке эксперимента.

Список литературы

- [1] *Островская Г.В., Островский Ю.И.* // ЖТФ. 1970. Т. 40. Вып. 11. С. 2419–2422.
- [2] *Игнатов А.Б., Комиссарова И.И., Островская Г.В.* и др. // ЖТФ. 1971. Т. 41. Вып. 2. С. 2419–2422.
- [3] *Островская Г.В.* // Материалы IV Всесоюз. школы по голографии. Л., 1973. С. 51–76.
- [4] *Островская Г.В., Победоносцева Н.П.* // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 7. С. 1462–1469.
- [5] *Алум Х.П., Ковальчук Ю.В., Островская Г.В.* // Материалы XIII Всесоюз. школы по голографии. Л., 1981. С. 84–97.
- [6] *Алум Х.П., Ковальчук Ю.В., Островская Г.В.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 5. С. 896–904.
- [7] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [8] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [9] *Нугуманов А.М., Смирнов Р.В., Соколов В.И.* // Квантовая электрон. 2000. Т. 30. № 5. С. 435–440.
- [10] *Соколов В.И.* // Квантовая электрон. 2001. Т. 31. № 10. С. 891–896.
- [11] *Kulkarni V.G.* // Opt. and Laser Technol. 1979. Vol. 5. N 11. P. 269–273.
- [12] *Гусев В.Г.* // ОМП. 1992. № 4. С. 3–7.
- [13] *Гусев А.Ф.* // ОМП. 1993. № 3. С. 75–77.
- [14] *Гусев В.Г.* // Изв. вузов. Сер. физ. 2000. Т. 43. № 12. С. 8–13.
- [15] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 93. № 3. С. 512–516.
- [16] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 93. № 3. С. 517–521.
- [17] *Белозеров А.Ф., Спорник Н.М.* // Тр. ВВИА им. Жуковского. 1971. Вып. 1301. С. 90–94.

- [18] *Комиссарук В.А.* // Тр. ВВИА им. Жуковского. 1971. Вып. 1301. С. 124–144.
- [19] *Васильев Л.А., Еришов И.В.* Интерферометр с дифракционной решеткой. М.: Машиностроение, 1976. 232 с.