

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРА СДВИГА С СИНГУЛЯРНЫМ ИСТОЧНИКОМ СВЕТА

© 2012 г. А. Н. Хорошун, канд. физ.-мат. наук; А. В. Черных; С. В. Кучер; А. Н. Цымбалюк

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск, Украина

E-mail: an\_khor@mail.ru

Определены оптимальные параметры интерферометра сдвига с сингулярным источником света по наилучшей видимости на интерферограммах областей расщепления полос равной толщины, положение которых позволяет определить боковой сдвиг пучков и характеристики светоделительного элемента.

**Ключевые слова:** сингулярный пучок, оптический вихрь, интерферограмма, области расщепления интерференционных полос.

Коды OCIS: 260.3160, 260.6042

Поступила в редакцию 27.09.2011

Интерферометрия бокового сдвига [1], являясь важной областью общей интерферометрии, широко применяется при исследовании оптических деталей и систем, при изучении потоков и явлений диффузии в газах и жидкостях, обеспечивая высокую точность и малую инерционность измерений. Основными достоинствами одноплечевого интерферометра сдвига являются низкий уровень микровибраций и высокое качество интерференционных картин (ИК), обеспечиваемое минимальным числом элементов в его оптической схеме.

Уникальность предложенного интерферометра состоит в использовании в качестве интерферирующих волн сингулярных пучков, или пучков с осевым оптическим вихрем (ОВ). Их свойства, широкая область применения и проведенные за последние десятилетия исследования по сингулярной оптике представлены, например, в работах [2, 3]. Получают пучки с осевыми ОВ в мощных лазерных резонаторах в виде определенной моды Лагерра–Гаусса или с помощью специальных дифракционных решеток и фазовых масок. Сингулярные пучки обладают особой, геликоидальной, формой волнового фронта, благодаря чему при интерференции с наклонной плоской волной происходит расщепление полос в области дислокации ОВ. Уверенное детектирование фазовой структуры ОВ используется для изучения свойств спекл-полей и термодинамических параметров объектов, а его устойчивая структура – для

передачи информации через турбулентную атмосферу.

Целью данной работы является нахождение оптимальных параметров интерферометра сдвига с сингулярным источником света по отчетливой регистрации на интерферограммах областей расщепления полос равной толщины и использование полученных результатов для определения бокового сдвига пучков и оптико-механических характеристик светоделительного элемента.

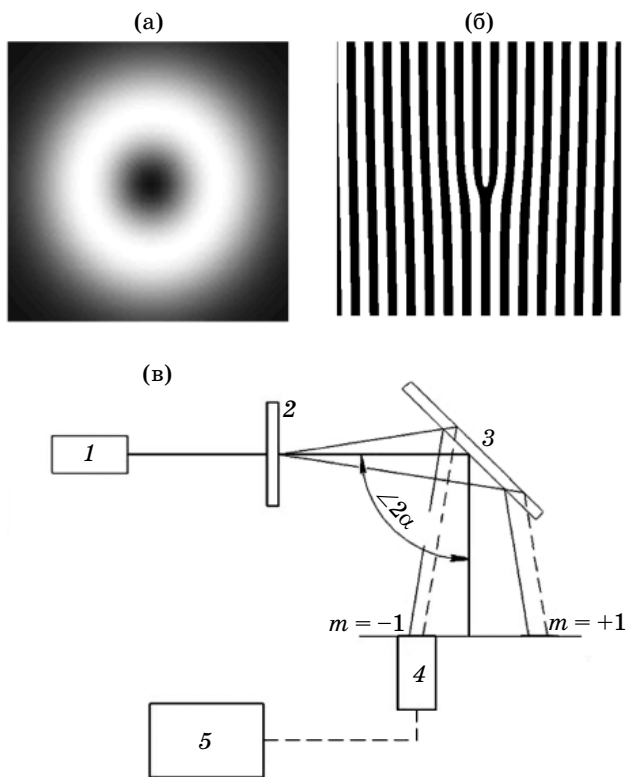
В схеме использовался световой пучок с осевым ОВ, примером которого является мода Лагерра–Гаусса  $LG_0^l$ , являющаяся решением волнового уравнения в парааксиальном приближении

$$E(LG_0^l) = E_{LG} \frac{w_0}{w} \left( \frac{\sqrt{2}\rho}{w} \right)^{|l|} \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2}\right) L_0^{|l|} \left( \frac{2\rho^2}{w^2} \right) \times \exp\left[ i \left[ kz + \frac{k\rho^2}{2R(z)} + k\rho - (|l|+1) \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right) \right] \right], \quad (1)$$

где  $E_{LG}$  – амплитудный параметр,  $w_0$  – параметр поперечного размера пучка в перетяжке,  $w = w_0(1 + z^2/z_R^2)^{1/2}$  – поперечный размер на расстоянии  $z$  от перетяжки,  $R(z) = z(1 + z_R^2/z^2)$  – радиус кривизны волнового фронта в сечении по оси пучка,  $z_R$  – длина Рэлея, равная  $kw_0^2/2$ ,  $k$  – волновое число,  $L_p^{|l|}$  – присоединенный полином Лагерра,  $l$  – азимутальный индекс моды.

На оси сингулярного пучка, как видно из выражения (1), амплитуда поля равна нулю, тогда фаза может принимать любое значение, т. е. она неопределенна. Основной характеристикой ОВ является его топологический заряд  $m = -l$ , определяющий значение набег фазы при обходе по замкнутому контуру вокруг оси вихря, кратное  $2\pi m$ . В работе использовался сингулярный пучок с зарядом  $m = +1$ , для которого расчетные распределение амплитуды в поперечном сечении и интерферограмма с наклонной плоской волной представлены, соответственно, на рис. 1а, б.

Значение бокового сдвига фронтов  $S$  равно расстоянию между дислокациями на интерферограммах, а также расстоянию между центрами пучков, отраженных от передней и задней поверхностей пластинки



**Рис. 1.** Распределение амплитуды в поперечном сечении сингулярного пучка единичного заряда (а) и его интерферограмма с наклонной плоской волной (б). Схема интерферометра сдвига с сингулярным источником света (в) для наблюдения интерференции в виде полос равной толщины. 1 – лазер, 2 – дифракционная решетка с сингулярностью, 3 – плоскопараллельная пластинка, 4 – цифровая фотокамера, 5 – ПК.

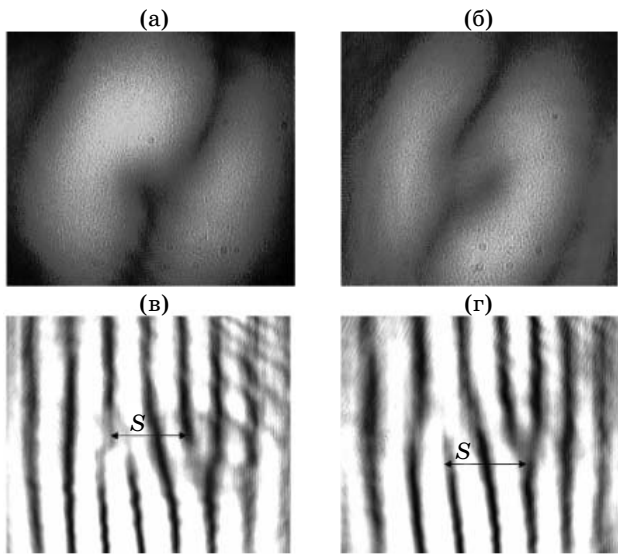
$$S = 2b \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}. \quad (2)$$

Как видно из формулы (2), определив по ИК боковой сдвиг  $S$ , можно найти для пластинки ее толщину  $b$ , угол наклона  $\alpha$  или показатель преломления  $n$ .

Структурная схема предлагаемого интерферометра сдвига с сингулярным источником света представлена на рис. 1в. Световой пучок с длиной волны  $\lambda = 0,6328$  мкм и мощностью 1,5 мВт падает на амплитудную решетку с периодом  $d = 37,2$  мкм. Решетка имеет линейчатый вид и содержит дефект в виде вилочки (рис. 1б), который способствует образованию в ненулевых дифракционных порядках сингулярных пучков [4]. В +1 дифракционном порядке образуется сингулярный пучок с зарядом  $m = +1$ , а в -1 дифракционном порядке – сингулярный пучок с зарядом  $m = -1$ . Оба пучка падают на плоскопараллельную пластинку, наклоненную на угол  $\alpha$ . Интерференция образована пучками, отраженными от передней и задней поверхностей пластинки толщиной 1,5 мм и с показателем преломления 1,5. Интерференционная картина наблюдалась на мониторе персонального компьютера (ПК), соединенного с цифровой фотокамерой без объектива.

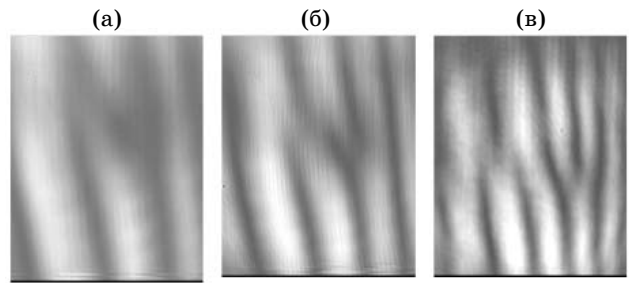
Падающие на пластинку пучки, соответствующие дифракционным порядкам -1, 0, +1, отклоняются на разные углы, как видно из схемы (рис. 1в), но угол  $\alpha$  во всех опытах записан для нулевого максимума. При малых углах наклона пластинки сдвиг между интерферирующими пучками, как и расстояние между ОВ, малы и дефект волнового фронта формирует на ИК области v-образного вида (рис. 2а, б). Явного расщепления полосы не наблюдается, следовательно, делать заключение о наличии дислокаций в световом поле по таким интерферограммам нежелательно. Отметим, что для +1 максимума угол отклонения лучей составит  $\alpha_{+1} = \alpha + 1^\circ$ , а для -1 максимума  $\alpha_{-1} = \alpha - 1^\circ$ , в соответствии с периодом дифракционной решетки. Отличие в  $2^\circ$  приводит к тому, что ИК в -1 максимуме (рис. 2а) и в +1 максимуме (рис. 2б) похожи, поэтому для изучения работы интерферометра сдвига с сингулярным источником света рассмотрим структуру поля только в одном максимуме.

На интерференционной картине в -1 дифракционном максимуме (рис. 2в) отчетливо видны две вилки: одна из них с расщеплением полос вверх, а другая – вниз. Расстояние меж-



**Рис. 2.** Интерференционные картины, зарегистрированные на расстоянии 30 см от пластинки, полученные в  $-1$  (а) и  $+1$  (б) дифракционных максимумах для угла  $\alpha = 9^\circ$ , а также в  $-1$  дифракционном максимуме  $\alpha = 35^\circ$  (в),  $\alpha = 37^\circ$  (г). Боковой сдвиг пучков  $S$  равен расстоянию между дислокациями.

ду ОВ равно боковому сдвигу пучков  $S$ . Отраженный сингулярный пучок содержит ОВ противоположного заряда по сравнению со знаком ОВ в падающем пучке (см. [3, С. 245]), поэтому оба отраженных пучка содержат ОВ с зарядом  $m = +1$ . Противоположное направление расщепления полос на интерферограмме обусловлено тем, что отраженные пучки падают друг на друга с разных сторон, визуализируя знак заряда одного из ОВ с зарядом  $m = +1$  как  $m = -1$ . Данное явление объясняется зависимостью направления расщепления полосы от направления падения наклонной референтной волны: волна падает слева – полосы расщеплены вниз, волна падает справа – вверх [4]. Возникшая между пучками разность фаз на  $\pi$  должна проявиться в формировании вилок противоположного цвета – белого и черного. Данная ситуация отчетливо видна на ИК для угла  $\alpha = 35^\circ$  (рис. 2в): правая вилка белая, а левая – черная. При незначительном изменении угла наклона пластинки ( $\alpha = 37^\circ$ ) цвета вилок синхронно меняются на противоположные (рис. 2г). Отметим, что при некоторых углах  $\alpha$  однозначно определить цвет дислокации не удастся. Для его уточнения, как показывает эксперимент, необходимо изме-



**Рис. 3.** Изображения интерферограмм, полученных при угле наклона пластинки  $60^\circ$  на различных расстояниях от пластинки – 135 см (а), 85 см (б), 20 см (в).

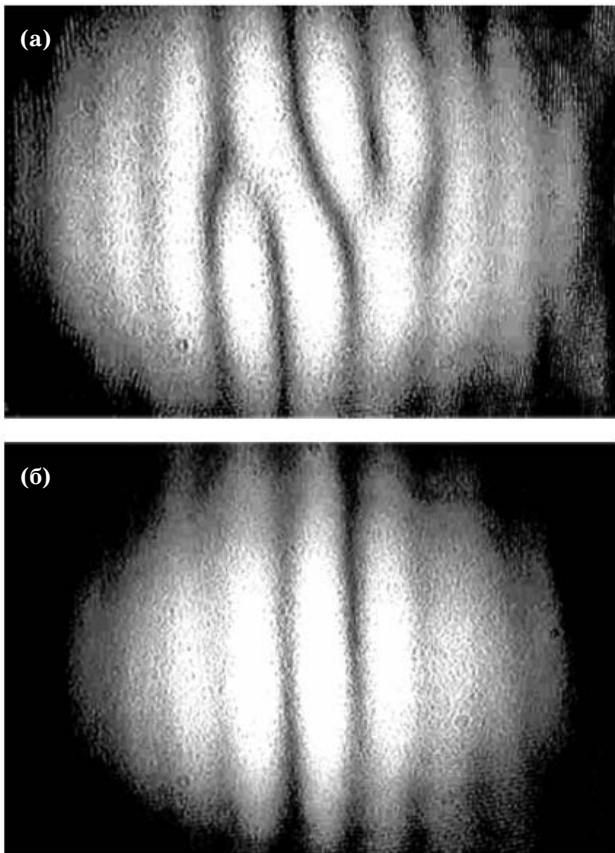
нить угол наклона пластинки на несколько градусов.

В данной измерительной установке изучено также качество изображения областей расщепления интерференционных полос в зависимости от расстояния между пластинкой и фотокамерой для угла  $\alpha = 60^\circ$ . На рис. 3а при расстоянии  $z = 135$  см хорошо различается точечный дефект, который при приближении камеры к пластинке ( $z = 85$  см) принимает вид двух сцепленных вилок (рис. 3б), а с расстояния  $z = 20$  см виден как две вилок противоположного направления расщепления (рис. 3в). По изображениям интерферограмм (рис. 3) видно, что при уменьшении расстояния между пластинкой и фотокамерой наблюдается улучшение качества изображения областей расщепления полос ИК.

Одновременно наблюдаемые два ОВ с противоположными зарядами, имеющие общую дислокационную траекторию, образующиеся в асимметричных интерференционных задачах, называют диполем оптических вихрей. На представленных ИК траектории двух оптических вихрей, имеющих на самом деле одинаковый знак заряда, представляют собой пересекающиеся линии.

Приведенная на рис. 4а интерферограмма получена после прохождения гауссова пучка дифракционной решетки периодом  $d = 37,2$  мкм с сингулярностью (см. рис. 1б), а ИК на рис. 4б – с использованием решетки того же периода, но без сингулярности. Они демонстрируют частичное совпадение интерференционных полос на периферии и большее расплывание сингулярного пучка по сравнению с гауссовым.

Для описания получаемых ИК рассмотрим отклонение волнового фронта от плоскости с



**Рис. 4.** Изображения интерференционных картин, полученных на расстоянии 30 см от пластинки, в  $-1$  дифракционном максимуме после прохождения гауссова пучка решетки с сингулярностью (а) и обычной дифракционной решетки (б) с тем же периодом.

помощью функции  $W(x, y)$  ( $x, y$  – координаты произвольной точки). Для сингулярного пучка единичного положительного заряда форму волнового фронта на некотором расстоянии  $z$  можно представить в соответствии с формулой (1) в виде

$$W(x, y) = \frac{(x^2 + y^2)}{2R(z)} - \frac{1}{k} \arctg(y/x). \quad (3)$$

При перемещении фронта на величину  $S$ , называемую боковым сдвигом, в направлении  $x$  его погрешность в выбранной точке составит  $W(x - S, y)$ , а результирующая разность хода  $\Delta W$  для двух фронтов определится как  $[W(x, y) - W(x - S, y)]$ . Разность хода в различных точках волнового фронта при малых значениях  $S$  получается из соотношения

$$\Delta W = \left( \frac{\partial W}{\partial x} \right) S = N\lambda, \quad (4)$$

где  $N$  – порядок интерференционной полосы.

Тогда полученные интерферограммы в виде системы полос, перпендикулярных к оси  $x$ , и области их расщепления описываются уравнением

$$\Delta W = \frac{x}{R(z)} + \frac{y}{kx^2(1 + y^2/x^2)} = \frac{N\lambda}{S}. \quad (5)$$

Первое слагаемое в уравнении (5) описывает систему равноудаленных полос, возникающих при интерференции гауссовых пучков (рис. 4б). Наличие второго слагаемого приводит к зависимости ширины полосы  $\Delta x$  от координат  $x, y$  и формированию областей расщепления полос (рис. 4а).

Определим оптимальный угол наклона плоскопараллельной пластинки, при котором происходит наилучшая регистрация ОВ. Минимальный угол наклона пластинки должен обеспечивать ширину полосы  $\Delta x$  меньшей, чем значение бокового сдвига  $S$ . Максимально возможный угол наклона пластинки определяется размерами интерференционной картины  $x$ , при которых дислокация одного пучка еще выделяется на периферии второго пучка с радиусами  $r = w/2$ , т. е.

$$\Delta x \leq S < r. \quad (6)$$

Таким образом, использование сингулярного пучка единичного заряда в интерферометре сдвига приводит к образованию на ИК в зоне расположения дислокаций “вилочек” – областей расщепления полос. Расстояние между ОВ равно боковому сдвигу пучков  $S$ , что позволяет вычислить толщину, наклон и показатель преломления светоделительного элемента. Найдены оптимальные параметры – угол наклона плоскопараллельной пластинки и расстояния наблюдения ИК в интерферометре сдвига с сингулярным источником света, которые позволяют достоверно регистрировать дислокации на ИК по расщеплению полос.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела оптической квантовой электроники Института физики НАН Украины за предоставление амплитудной решетки, позволяющей синтезировать оптические вихри.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Украины GP/F27/0198.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оптический производственный контроль / Под ред. Малакары Д. М.: Машиностроение, 1985. С. 87–116.
  2. *Mark D., Kivshar Y., Soskin, Swartzlander G.* Singular Optics: more ado about nothing // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2009. V. 11. P. 090201.
  3. *Soskin M.S., Vasnetsov M.V.* Singular Optics // *Progress in Optics.* 2001. V. 42. Chapter 4. P. 219–276.
  4. *Basistiy I.V., Bazhenov V.Yu., Soskin M.S., Vasnetsov M.V.* Optics of light beams with screw dislocations // *Opt. Commun.* 1993. V. 103. P. 422–428.
-