

07;12

## **Определение малых углов поворота светоделителя в оптическом вихревом интерферометре сдвига**

© А.Н. Хорошун, Д.Н. Арцишевский

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля,  
Луганск, Украина  
E-mail: an\_khor@mail.ru

*Поступило в Редакцию 27 октября 2009 г.*

Предложено использование сингулярного пучка единичного заряда в схеме интерферометра сдвига, предназначенного для наблюдения полос равного наклона. На интерферограмме области расщепления интерференционных полос определяют локализацию дислокаций волнового фронта и смещаются в зависимости от угла поворота светоделителя. Данный метод позволяет находить величину малых углов поворота с точностью, определяющейся шириной интерференционной полосы.

Интерферометрические методы благодаря высокой чувствительности, точности и безынерционности являются на сегодняшний день одними из наиболее активно используемых [1,2] для контроля качества, исследования макро- и микрогеометрии оптических элементов. Микровибрации и несовершенство оптических элементов интерферометра снижают качество интерференционных сигналов и соответственно достоверность получаемой информации. Частично решить такие трудности предлагается путем минимизации числа элементов в оптической схеме интерферометра сдвига. В качестве интерферирующих волн выбраны сингулярные пучки или пучки с осевыми оптическими вихрями (ОВ), уникальные свойства и область применения которых являются предметом исследования бурно развивающейся в последние десятилетия сингулярной оптики [3,4]. Наглядное детектирование фазовой структуры ОВ используется для изучения свойств спекл-полей, термодинамических параметров объектов и др.

В некоторых двухплечевых схемах замена на предлагаемую в работе одноплечевую схему с использованием сингулярного пучка позволит не только определять малый угол поворота светоделительного элемента

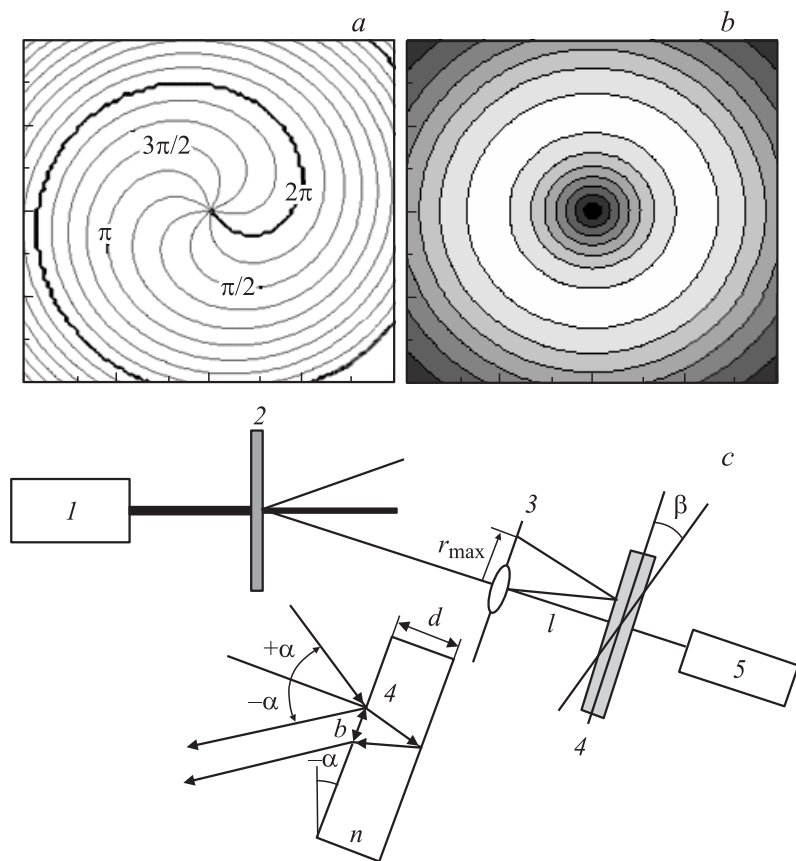
интерферометра по локализации оптического вихря, но и изучить возможность управлением топологической перестройки волнового фронта результирующего поля, инициируя образование или аннигиляцию ОВ. Под малым углом рассматривается такой, для которого смещение всей интерференционной картины или проявление ее эллиптичности на близком расстоянии не регистрируется.

Целью данной работы являлось изучение динамики областей расщепления полос равного наклона в интерференционной картине в зависимости от угла поворота плоскопараллельной пластинки вихревого интерферометра сдвига. В схеме использовался световой пучок с осевым ОВ, примером которого является мода Лагерра–Гаусса  $LG_0^l$ , являющаяся решением волнового уравнения в параксиальном приближении:

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

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. неопределенна. Основной характеристикой ОВ является его топологический заряд  $m = -1$ , определяющий величину набега фазы при обходе по замкнутому контуру вокруг оси вихря, кратную  $2\pi m$ . В работе использовался сингулярный пучок в зарядом  $m = -1$ , распределения фазы и амплитуды в поперечном сечении которого представлены соответственно на рис. 1, *a* и *b*. Волновой фронт такого пучка имеет форму геликоида, который при интерференции с наклонной плоской волной или гауссовым пучком проявляется расщеплением интерференционной полосы в виде вилочки, а при соосном падении — спиральной картиной.

Структурная схема предлагаемого вихревого интерферометра сдвига представлена на рис. 1, *c*. Световой пучок с длиной волны  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$



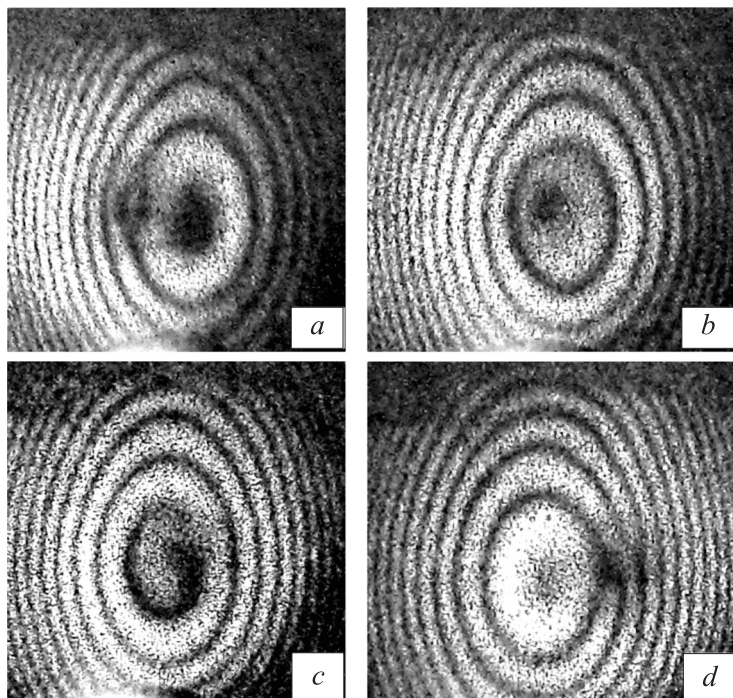
**Рис. 1.** Распределение фазы (а) и амплитуды (b) в поперечном сечении сингулярного пучка с зарядом  $m = -1$ . Оптическая схема вихревого интерферометра сдвига (с): 1 — лазер, 2 — дифракционная решетка с „вилочкой“, 3 — экран с короткофокусной линзой, 4 — плоскопараллельная пластинка, 5 — фотокамера.

и мощностью 1.5 mW падает на амплитудную решетку с „вилочкой“, дающей в ненулевых дифракционных порядках сингулярные пучки [5]. В +1 дифракционном порядке образуется сингулярный пучок с зарядом  $m = -1$ , который расширяется посредством короткофокусной линзы и

падает на плоскопараллельную пластинку. Интерференция образована пучками, отраженными от передней и задней поверхностей пластинки толщиной  $d = 1$  см и показателем преломления  $n = 1.5$ , изготовленной из стекла марки М1, используемой с целью усиления интенсивности отраженных волн и соответственно улучшения видности результирующего поля. Интерференционная картина (ИК) наблюдалась на экране, расположенном в плоскости линзы на расстоянии от пластинки  $l$ , и регистрировалась с помощью цифровой фотокамеры Canon ixus 80IS в режиме макросъемки. Отметим, что пластинка наклонялась на некоторый угол  $\beta$  от плоскости, перпендикулярной к оси распространения лазерного пучка (рис. 1, *c*), с целью локализации распределения поля вне линзы.

В данной измерительной установке вследствие вариации угла наклона пластинки в направлениях  $-\alpha$ ,  $0$ ,  $+\alpha$  коренным образом изменялась топология волнового фронта в виде появления или аннигиляции двух ОВ с противоположными зарядами. Такие структуры зачастую образуются в суперпозиционных полях [6] и называются диполями оптических вихрей. На интерференционной картине (рис. 2) образование ОВ определяется по расщеплению колец, причем структура с „вилочкой“ вверх соответствует заряду  $m = -1$ , а вниз —  $m = +1$ . Нижний ОВ соответствует пучку, отраженному от передней поверхности пластинки, и знак его заряда противоположен знаку заряда падающего вихря вследствие отражения от более плотной среды. Динамика топологии волнового фронта определялась углом  $\alpha$ , а эллиптичность ИК обусловлена наклоном пластинки на постоянный угол  $\beta$  (рис. 1, *c*). Под углом поворота пластинки  $\alpha = -0.5$  наблюдался диполь оптических вихрей со сцепленными вилочками (рис. 2, *a*). Интерферограмма при нулевом угле  $\alpha$  демонстрирует отсутствие дислокаций, смещение центрального пятна и образование колец равного наклона (рис. 2, *b*), как и в случае интерференции наклонно падающих сферических волн. Отклонив пластинку в противоположную сторону, определяемую углами  $+\alpha$ , зарегистрировано образование диполя ОВ с расщепленными вилочками для  $+0.33^\circ$  (рис. 2, *c*) и его смещение на одну интерференционную полосу для угла  $+1^\circ$  (рис. 2, *d*). Вследствие изменения направления падения опорной и референтной волн, знаки зарядов дислокаций, относительно центра ИК, при углах  $+\alpha$  противоположны знакам зарядов ОВ для углов  $-\alpha$ .

Оценим точность измерения и предельные значения регистрируемого угла  $\alpha$  по смещению оптических вихрей в предлагаемом вихревом



**Рис. 2.** Вид интерференционных картин, образуемых сингулярными пучками единичного заряда, отраженными от передней и задней поверхностей стеклянной пластинки при повороте пластинки относительно падающего луча на угол  $\alpha$ , равный  $-0.5^\circ$  (a),  $0^\circ$  (b),  $+0.33^\circ$  (c) и  $+1^\circ$  (d).

интерферометре сдвига. Расстояние  $b$  между оптическими вихрями диполя или центрами пучков, отраженных от передней и задней поверхностей пластинки, определим как:

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

Характерной величиной периодичности фазовой структуры результирующего поля при интерференционном наблюдении является ширина полосы  $\Delta r$ . При малых углах наблюдения  $\alpha$ , ОВ противоположного

заряда находятся в центре ИК, т.е. в области к наибольшей шириной полосы, и могут не проявляться, скрыв информацию о локализации дислокаций и соответственно величине угла поворота  $\alpha$ . Тогда условие достоверного выявления диполя ОВ на ИК выразим следующим образом: величина сдвига между центрами пучков  $b$  должна быть более или равна ширине полосы  $\Delta r$ :

$$b \geq \Delta r. \quad (3)$$

При падении монохроматического света длиной волны  $\lambda_0$  на плоскопараллельную пластинку толщиной  $d$  и показателем преломления  $n$  оптическая разность хода когерентных лучей определяется выражением

$$\Delta_k = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi_k} - \frac{\lambda_0}{2}, \quad (4)$$

где  $\sin \varphi_k \approx r_k/2l$ ,  $r_k$  — радиус кольца с порядковым номером  $k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), а  $l$  — расстояние от пластинки до экрана наблюдения интерференционной картины.

Тогда ширину полосы вычислим по формуле

$$\Delta r_k \approx \frac{2n^2 \lambda_0}{dr_k}. \quad (5)$$

Величина смещения ближайшей дислокации  $r_{OV}$  от центра пучка в отраженном поле определяет угол наклона пластинки  $\alpha$  как

$$\alpha = \arctg(r_{OV}/l). \quad (6)$$

Максимально возможный угол наклона определяется размерами интерференционной картины  $r_{OV} = r_{\max}$ , а минимальный — шириной интерференционной полосы  $r_{OV} = \Delta r_k$ . Отметим, что точность измерений угла наклона пластинки  $\alpha$  определяется шагом интерферограммы  $\Delta r_k$ , который в соответствии с (5) уменьшается при удалении от центра ИК. Регистрировать поле на периферии интерферограммы предлагается с помощью ССД-камеры со снятым объективом, установленной в области расположения экрана. Толщина пластинки  $d$  для определения углов поворота  $\alpha$  в заданном диапазоне значений с помощью рассмотренного интерферометра сдвига определяется из условия (3) как:

$$d \geq \left( \frac{n \lambda_0 l^2}{r_k} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Таким образом, использование сингулярного пучка с зарядом  $m = -1$  в интерферометре сдвига, обеспечивающего для пучков с гладким волновым фронтом образование интерференционной картины в виде колец равного наклона, позволяет определять малые углы поворота светоделительного элемента. Угол вычисляется по величине смещения оптических вихрей, детектируемых на интерферограмме в виде вилочек, расщепляющих кольца. Определены основные характеристики схемы, влияющие на точность и величину измеряемого угла. Отметим, что аннигиляция ОВ при условии  $\alpha = 0$ ,  $\beta \neq 0$  не доказана, так как в центре ИК точность измерений минимальна. Поэтому вопрос о параметрах схемы, определяющих изменение топологии волнового фронта, требует дальнейшего изучения.

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

## Список литературы

- [1] Власов Н.Г. // 6-я Междунар. конф. „ГОЛОЭКСПО-2009“. Голография. Наука и практика. Киев, 2009.
- [2] Ляликов А.М. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 9. С. 78–82.
- [3] Vasnetsov M., Staliunas K. // Horizons in world physics, Nova Science Publ. 1999. V. 228. P. 313.
- [4] Bekshaev A.Ya., Vasnetsov M.V., Soskin M.S. // Ukr. J. Phys.: Rev. 2005. V. 2. P. 73–113.
- [5] Bazhenov V.Yu., Vasnetsov M.V., Soskin M.S. // JEPT Lett. 1990. V. 52. P. 429–431.
- [6] Gorshkov V.N., Khoroshun A.N., Soskin M.S. // Український фізичний журнал. 2005. V. 50. N 4. P. 351–360.