

## ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ СО СЛОЖНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТИГМАТИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ЛИНЗЫ

© 2011 В.Г. Волостников<sup>1</sup>, Е.Н. Воронцов<sup>1,2</sup>, С.П. Котова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский филиал Учреждения Российской академии наук

Физического института им. П.Н. Лебедева

<sup>2</sup> Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 10.03.2011

Представлен новый способ формирования полей с неоднородной поляризацией на основе интерференционного подхода. Необходимые для реализации метода комплексно сопряженные пучки Лагерра-Гаусса формируются посредством астигматического преобразования пучка Эрмита-Гаусса с использованием специального дифракционного элемента.

Ключевые слова: неоднородная поляризация, астигматическое преобразование.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрос интерес к полям с неоднородной поляризацией, в том числе к полям с аксиальносимметричным распределением поляризации. Это, в первую очередь, объясняется особыми свойствами таких полей, которые проявляются при их фокусировке и взаимодействии с веществом. Поля с аксиальносимметричным распределением поляризации используют для исследования свойств отдельных молекул [1], для ускорения электронов [2, 3], для обработки, в том числе резки, металлов [4], а также в лазерной манипуляции [5, 6]. Представляется актуальной задача разработки новых способов формирования полей с неоднородной поляризацией. Целью настоящей работы был поиск одного из путей ее решения.

Предложенным ранее общим подходом к формированию пучков с неоднородным распределением поляризации является интерференционное сложение пучков, комплексные амплитуды которых имеют следующий вид [7, 8]:

$$\vec{E}_1(r, \theta) = \frac{E_0(r)}{2} (\vec{x} + i\vec{y}) \exp(im\theta),$$

$$\vec{E}_2(r, \theta) = \frac{E_0(r)}{2} (\vec{x} \pm i\vec{y}) \exp(-im\theta), \quad (1)$$

где  $\vec{x}, \vec{y}$  – орты декартовой системы координат, введенной в поперечном сечении пучка,  $r, \theta$  – цилиндрические координаты. В центре пучка находится особая точка, при обходе вокруг которой по часовой стрелке фаза пучка меняется от 0 до  $2\pi$   $m$  раз. В особой точке интенсивность обращается в нуль, а фаза неопределена. Число  $m$  также называют топологическим зарядом пучка, а особую точку – сингулярностью. Как видно, данные пучки имеют противоположные по знаку топологические заряды (т.е. комплексно сопряженные фазы), идентичные аксиальносимметричные распределения интенсивности и однородную, но различную по направлению вращения вектора напряженности, круговую поляризацию. В известных экспериментальных схемах для формирования комплексно сопряженных пучков вида (1) используются спиральные фазовые пластинки. Поля, образующиеся при дифракции на таких элементах, не обладают структурной устойчивостью интенсивности и фазы при переходе из ближней в дальнюю зону дифракции [9, 10]. Поэтому интерференционное поле имеет требуемое распределение поляризации только в определенной пространственной области. Пространственно инвариантное распределение поляризации можно получить, используя структурно устойчивые поля вида (1), к которым относятся, в частности, пучки Лагерра-Гаусса:

$$\vec{E}(r, \theta) = E_0 \left( \frac{r}{w} \right)^m \exp\left(-\frac{r^2}{2w^2}\right) L_l^m \left( -\frac{r^2}{w^2} \right) e^{im\theta}, \quad (2)$$

где  $L_l^m(\bullet)$  – полиномы Лагерра-Гаусса,  $w$  – полуширина пучка. Для формирования двух комплексно сопряженных пучков Лагерра-Гаусса в данной работе предлагается использовать специальный дифракционный оптический элемент.

Волостников Владимир Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: coherent@fian.smr.ru.  
Воронцов Евгений Николаевич, инженер СФ ФИАН, аспирант Самарского государственного университета. E-mail: vorontsoven@fian.smr.ru.

Котова Светлана Павловна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией моделирования и автоматизации лазерных систем, доцент. E-mail: kotova@fian.smr.ru.

## 2. АСТИГМАТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

В работе [11] было показано, что пучки Эрмита-Гаусса  $H_{n,m}$  могут быть преобразованы в пучки Лагерра-Гаусса  $LG_{n,m}$  путем следующей операции:

$$\iint_{R^2} \exp(-i(x\xi + y\eta) + 2i\xi\eta) HG_{n,m}(\xi, \eta) d\xi d\eta = \frac{\pi}{\sqrt{2}} (-1)^{n+m} \exp\left(-\frac{ixy}{4}\right) \begin{cases} (2i)^n m! LG_{m,n-m}\left(\frac{x}{2\sqrt{2}}, \frac{y}{2\sqrt{2}}\right) & \text{for } n \geq m, \\ (2i)^m n! LG_{n,m-n}\left(\frac{y}{2\sqrt{2}}, \frac{x}{2\sqrt{2}}\right) & \text{for } n \leq m. \end{cases} \quad (3)$$

Преобразование (3) названо астигматическим, т.к. в его ядро входит астигматическое слагаемое  $2\xi\eta$ . Экспериментально такое преобразование удастся осуществить с помощью системы сферических и цилиндрических линз (рис. 1).

Оказывается возможным с помощью астигматического преобразования получить комплексно сопряженные пучки Лагерра-Гаусса. Для этого предлагается заменить цилиндрическую линзу, выполняющую астигматическое преобразование пучка Эрмита-Гаусса, на бинарный дифракционный элемент. Фаза такого элемента определяется выражением:

$$\varphi = -\varphi_0 \text{sign} \cos(2xy + \alpha x). \quad (4)$$

По своей структуре дифракционный элемент представляет собой дифракционную решетку, период которой задается параметром  $\alpha$ . При дифракции на данном дифракционном элементе пучка Эрмита-Гаусса в  $\pm 1$  порядках дифракции формируются пучки Лагерра-Гаусса. В частном случае [12]:

$$\iint_{R^2} \exp(-i(x\xi + y\eta) \pm 2i\xi\eta) HG_{1,0}(\xi, \eta) d\xi d\eta = C \begin{cases} LG_{0,1}\left(\frac{x}{2\sqrt{2}}, \frac{y}{2\sqrt{2}}\right) e^{\left(\frac{-ixy}{4}\right)} & \text{in } +1 \text{ order,} \\ LG_{0,-1}\left(\frac{y}{2\sqrt{2}}, \frac{x}{2\sqrt{2}}\right) e^{\left(\frac{ixy}{4}\right)} & \text{in } -1 \text{ order.} \end{cases} \quad (5)$$

где  $C$  – некоторая постоянная. Фазы пучков Лагерра-Гаусса, как следует из математического представления (5), являются комплексно сопряженными. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ С НЕОДНОРОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Схема разработанной экспериментальной установки для формирования полей с неоднородной поляризацией на основе дифракционного элемента (4) показана на рис. 3. Гелий-неоновый лазер настроен на генерацию исходного пучка Эрмита-Гаусса с линейной поляризацией. Дифракционный элемент преобразует пучок Эрмита-Гаусса в комплексно сопряженную пару пучков Лагерра-Гаусса. Дополнительные цилиндрические линзы CL1 и CL2 позволяют скомпенсировать остаточный астигматизм  $\exp(\pm xy / 4)$  (см. формулу 5). Четвертьволновые пластинки QR1 и QR2 преобразуют линейную поляризацию пучков в левую и правую круговую. С помощью делительного кубика осуществляется интерференционное сложение пучков. Таким образом, на

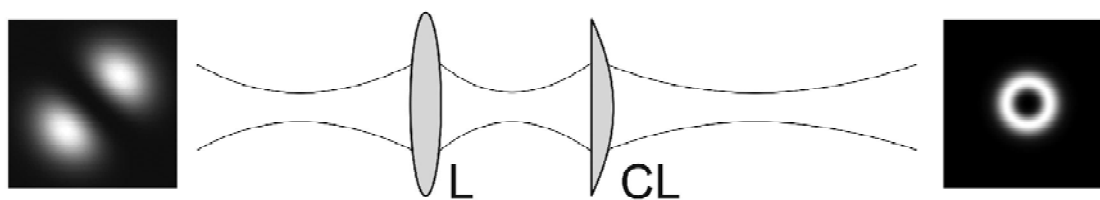


Рис. 1. Экспериментальная схема астигматического преобразования пучков Эрмита-Гаусса в пучки Лагерра-Гаусса. L - сферическая линза, CL - цилиндрическая линза

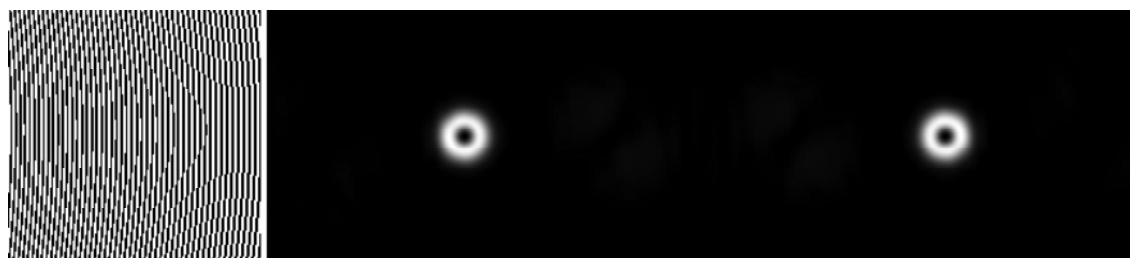
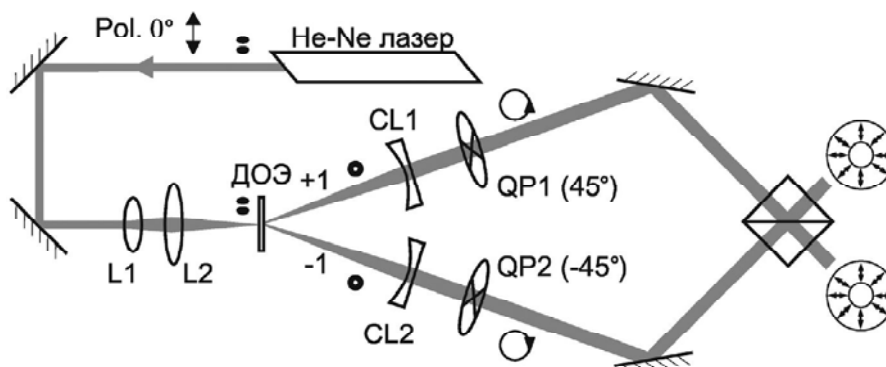
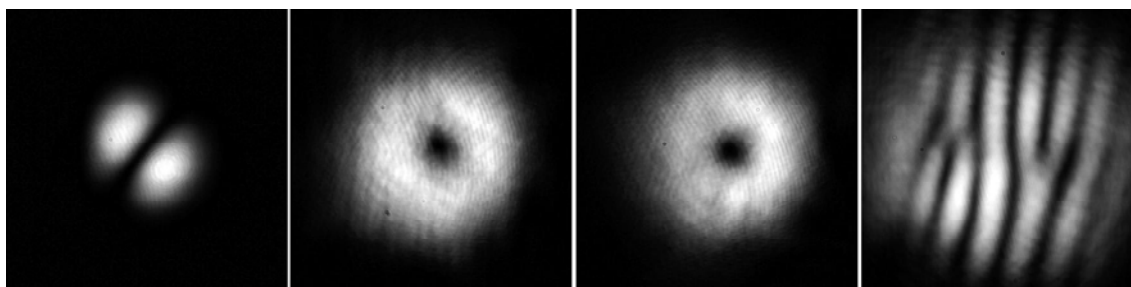


Рис. 2. а – фрагмент структуры дифракционного оптического элемента (4); б – картина дифракции на данном дифракционном элементе



**Рис. 3.** Схема формирования неоднородно поляризованных пучков на основе дифракционного оптического элемента (ДОЭ)



**Рис. 4.** а – Пучок Эрмита-Гаусса; б, в – пучки Лагерра-Гаусса в  $\pm 1$  порядке дифракции, сформированные с помощью дифракционного элемента; г – интерференция пучков Лагерра-Гаусса с противоположными по знаку топологическими зарядами

выходе из системы формируются два идентичных неоднородно поляризованных пучка. Дифракционная эффективность в данном случае составляет порядка 40%, что превышает эффективность ряда известных интерференционных схем более чем в 3 раза.

Дифракционный элемент был изготовлен в Институте систем обработки изображений РАН методом лазерной фотолитографии и химического травления на стеклянной подложке с разрешением 2 мкм. На рис. 4 изображены фотографии исходного пучка Эрмита-Гаусса и пучков Лагерра-Гаусса, полученных с помощью дифракционного элемента. По характерному расположению интерференционных полос на рисунке - 4, г можно судить о комплексной сопряженности пучков Лагерра-Гаусса.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен дифракционный оптический элемент, осуществляющий преобразование пучка Эрмита-Гаусса в пару комплексно сопряженных пучков Лагерра-Гаусса, что подтверждено результатами эксперимента. На основе данного оптического элемента разработана интерференционная схема формирования пучков с неоднородной поляризацией, которая имеет дифракционную эффективность, более чем в 3 раза превышающую эффективность ряда известных интерференционных схем.

*Авторы выражают благодарность сотрудникам Института системы обработки изображений РАН А.В. Волкову, О.Ю. Моисееву и Д.М. Якуненковой за помощь в изготовлении дифракционного элемента.*

*Работа выполнена при поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы (Государственный контракт № 14.740.11.0063) и УНК ФИАН им. П.Н. Лебедева.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Longitudinal Field Modes Probed by Single Molecules / L. Novotny, M.R. Beversluis, K.S. Youngworth, T.G. Brown // Physical Review Letters. 2001. Vol. 86, № 23. PP. 5251-5254.
2. Steinhauer, L.C. A new approach for laser particle acceleration in vacuum / L.C. Steinhauer, W.D. Kimura // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 72(a). PP. 3238-3245.
3. Optical guiding of a radially polarized laser beam for inverse Cherenkov acceleration in a plasma channel / P. Serafim, P. Sprangle, B. Hafizi // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28, № 4. PP. 1190-1193.
4. Niziev V.G., Nesterov A.V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. PP. 1455-1461.
5. Kozawa, Y., Sato S. Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams // Opt. Exp. 2010. Vol. 18, № 10. PP. 10828-10833.
6. Zhan Q. Trapping metallic Rayleigh particles with radial

- polarization // Opt. Exp. 2004. Vol. 12, № 15. PP. 3377-3382.
7. Generating radially polarized beams interferometrically / *S.C. Tidwell, D.H. Ford, W.D. Kimura* // Appl. Opt. 1990. Vol. 29, № 15. PP. 2234-2239.
  8. Efficient radially polarized laser beam generation with a double interferometer / *S.C. Tidwell, G.H. Kim, W.D. Kimura* // Appl. Opt. 1993. Vol. 32, № 27. PP. 5222-5229.
  9. Дифракция конической волны и гауссового пучка на спиральной фазовой пластинке / *В.В. Котляр, А.А. Ковалев, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, В.А. Соуфер, Я. Турунен* // Компьютерная оптика. 2005. № 28. С. 29-36.
  10. *Garcia-Gracia, H., Gutiérrez-Vega J.C.* Diffraction of plane waves by finite-radius spiral phase plates of integer and fractional topological charge // J. Opt. Soc. Am. A. 2009. Vol. 26, № 4. PP. 794-803.
  11. *Abramochkin E., Volostnikov V.* Beam transformations and nontransformed beams // Optics Communications. 1991. Vol. 83, № 1-2. PP. 123-135.
  12. Light fields of complex polarization structure / *V.G. Volostnikov, S.P. Kotova, O.Yu. Moiseev, A.V. Volkov, E.N. Vorontsov, D.M. Yakunenkov* // Conference proceedings CAOL 2010. 2010. PP. 74-75.

## ASTIGMATIC-DIFFRACTIVE-LENS-ASSISTED FORMATION OF COMPLEXILY POLARIZED LIGHT FIELDS

© 2011 V.G. Volostnikov<sup>1</sup>, E.N. Vorontsov<sup>1,2</sup>, S.P. Kotova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara Branch

<sup>2</sup> Samara State University

The new method for generation of fields with space-variant polarization on the basis of the interferential technique is presented in the paper. The technique is based on the astigmatic transformation of Hermite–Gaussian beams into complexly conjugated Laguerre–Gaussian beams by special diffractive element.  
Key words: space-variant polarization; astigmatic transformation; diffractive element.

---

*Vladimir Volostnikov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor. E-mail: coherent@fian.smr.ru*  
*Evgeny Vorontsov, engineer of LPI, Post-Graduate Student. E-mail: vorontsoven@fian.smr.ru*  
*Svetlana Kotova, Candidate of Physics and Mathematics, Laboratory Head, Associate Professor.*