

ГЕНЕРАЦИЯ НЕОДНОРОДНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ¹

Н.Д. Кундикова², И.И. Попков³

Экспериментально доказана возможность генерации излучения с управляемым аксиально несимметричным распределением поляризации в поперечном сечении.

Ключевые слова: спин; орбитальный момент; оптическое волокно; топологический заряд; неоднородно-поляризованное излучение.

Введение

Активный интерес исследователей к пучкам с неоднородным аксиально симметричным распределением линейной поляризации стал проявляться после работ [1, 2], в которых было теоретически показано, что сфокусированные пучки с радиальным распределением поляризации имеют минимальный размер фокального пятна. Дальнейшие работы показали, что изменение распределения состояния поляризации в поперечном сечении световых пучков позволяет изменять размер перетяжки [1, 2] и форму фокального пятна [3].

Однако свойства пучков с аксиально несимметричным распределением поляризации по сечению пучка не рассматривалось.

Целью данной работы является экспериментальная реализация метода получения лазерного пучка с управляемым аксиально несимметричным распределением поляризации в поперечном сечении пучка.

Теоретическое обоснование метода генерации неоднородно-поляризованного излучения

Для генерации неоднородно-поляризованного в поперечном сечении пучка в настоящей работе используется метод интерференционного сложения полей.

При интерференционном сложении двух пучков с одинаковой интенсивностью, разными по знаку топологическими зарядами и ортогональной циркулярной поляризацией итоговое поле будет аксиально симметрично [4]. При добавлении третьего пучка в схему интерференционного сложения будет наблюдаться более сложная картина распределения поляризации в поперечном сечении пучка. В этом случае результирующий пучок в поперечном сечении становится асимметрично неоднородно поляризованным.

Пусть комплексные амплитуды интерферирующих полей описываются выражениями:

$$E_1 = E_{01}(e_x + ie_y)e^{-i\varphi}e^{i\Gamma}, \quad E_2 = E_{02}(e_x - ie_y)e^{i\varphi}, \quad E_3 = E_{02}(e_x + ie_y)e^{i\varphi}.$$

Здесь e_x, e_y – единичные вектора, составляющие ортонормированный базис, Γ – разность фаз одного пучка относительно двух других, E_{01}, E_{02}, E_{03} – амплитуды пучков, множитель $\exp(i\varphi)$ указывает на присутствие топологического заряда со знаком $l = \pm 1$. Для описания состояния поляризации результирующего поля достаточно знать значение комплексного параметра χ :

$$\chi = \frac{2E_{01}E_{02} \sin(2\varphi - \Gamma) + i \left[2E_{01}E_{03} \cos(2\varphi - \Gamma) + (E_{03}^2 - E_{02}^2 + E_{01}^2) \right]}{E_{01}^2 + (E_{02} + E_{03})^2 + 2E_{01}(E_{02} + E_{03}) \cos(2\varphi - \Gamma)}. \quad (1)$$

Величина χ позволяет найти угол наклона большей оси эллипса поляризации θ и угол эллиптичности поляризации ξ (эллиптичность $e = \tan \xi$) [5].

¹ Исследование выполнено в рамках работы по госзаданию Минобрнауки РФ 888 по теме №2014102-ГЗ.

² Кундикова Наталья Дмитриевна – доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета, Южно-Уральский государственный университет, заведующий лабораторией нелинейной оптики, Институт электрофизики УрО РАН.

E-mail: kundikovand@susu.ac.ru

³ Попков Иван Игоревич – кандидат физико-математических наук, ассистент, кафедра оптики и спектроскопии, Южно-Уральский государственный университет, младший научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики, Институт электрофизики УрО РАН.

E-mail: popkovii@susu.ac.ru

Из выражения (1) следует, что поляризационные свойства полученного пучка будут зависеть от четырех параметров – E_{01}, E_{02}, E_{03} и Γ , которые могут изменяться независимо друг от друга.

Экспериментальная реализация метода генерации неоднородно-поляризованного излучения

Для получения неоднородно поляризованного пучка методом интерференционного сложения трех световых полей использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1.

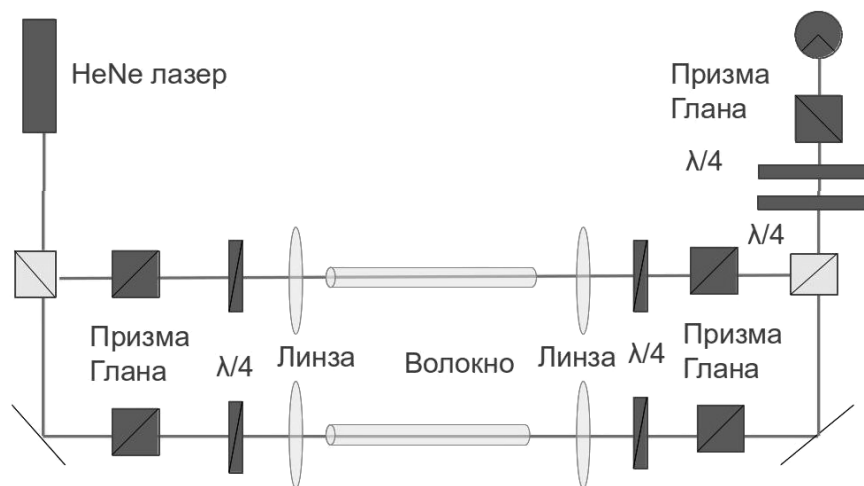


Рис. 1. Схема установки для получения неоднородно поляризованного излучения

Пучок с топологическим зарядом $l = \pm 1$ генерировался после прохождения циркулярно поляризованного пучка Гаусса через оптическое волокно методом, описанном в работе [4]. Использовалось маломодовое оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, радиусом сердцевины волокна $r = 4,5$ мкм, разница между показателем преломления сердцевины и оболочки $\Delta n = 1,7 \cdot 10^{-3}$.

Линейно поляризованное излучение He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм с помощью делительных кубиков было разделено на два пучка, которые пропускались через поляризаторы (призмы Глана). Призмы Глана были ориентированы таким образом, чтобы в первом и втором плече обеспечить ортогональность линейных поляризаций. Каждый из пучков Гаусса проходил через составную фазовую пластинку $\lambda/4$. Азимут падения линейной поляризации был настроен таким образом, чтобы при прохождении составной четвертьволновой пластинки излучение приобретало циркулярную поляризацию, для первого пучка $\sigma = +1$, а для второго $\sigma = -1$. Далее излучение фокусировалось микрообъективом с фокусным расстоянием $f = 1,5$ мм на торец оптического волокна. Выходной микрообъектив имел фокусное расстояние $f = 6$ мм и позволял получить коллимированное излучение, которое затем пропускалось через поляризационную систему (циркулярный анализатор), состоящую из составной четвертьволновой пластинки и поляризатора. Данная поляризационная система выделяла излучение с «чужой» поляризацией, содержащее единичную дислокацию и позволяла полностью гасить излучение со «своей» поляризацией. После прохождения поляризационной системы излучение, вышедшее из волокна, становилось линейно поляризованным и имело единичный топологический заряд.

Таким образом, были получены два пучка с единичным топологическим зарядом противоположного знака и ортогональной линейной поляризацией. Для получения неоднородно-поляризованного излучения оба пучка пропускались через составную пластинку $\lambda/4$. Так как линейные поляризации первого и второго пучка были ортогональными, то после прохождения пластинки $\lambda/4$ пучки приобретали циркулярную поляризацию разных знаков. При интерференционном сложении таких пучков результирующий пучок должен иметь осесимметричную неоднородно распределенную поляризацию. Для получения асимметричной неоднородной поляризации изменялся угол α ориентации циркулярного анализатора во втором плече, что позволяло

получать эллиптически поляризованный пучок, который является суперпозицией двух циркулярных ортогонально поляризованных пучков различной интенсивности. Изменение угла α позволяло изменять относительные интенсивности этих пучков. Разность фаз между первым пучком и двумя пучками, полученными во втором плече интерферометра, задавалась изменением оптической длины пути первого пучка.

Распределение интенсивности, полученное в результате интерференции трех циркулярно поляризованных пучков различной интенсивности, представлено на рис. 2. На распределение интенсивности нанесены рассчитанные эллипсы поляризации (рис. 2).

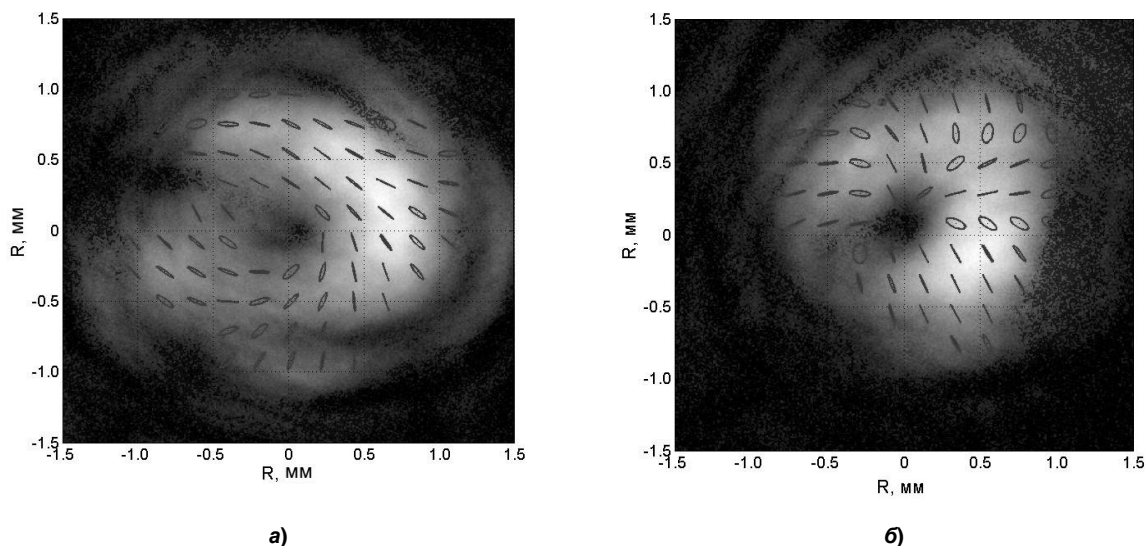


Рис. 2. Распределение интенсивности и поляризации в поперечном сечении исследуемого лазерного пучка:
а) $\Gamma = 6\pi/5, E_1 = 1, E_2 = 1, E_3 = 0$; б) $\Gamma = 0, E_1 = 1, E_2 = 0,8, E_3 = 0,2$

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность создания лазерных пучков с управляемым аксиально несимметричным распределением поляризации в поперечном сечении.

Литература

1. Focusing light into a tighter spot / S. Quabis, R. Dorn, M. Eberler *et al.* // Opt. Commun. – 2000. – Vol. 179. – P. 1–7.
2. Kozawa, Y. Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams / Y. Kozawa, S. Sato // JOSA A. – 2007. – Vol. 24, № 6. – P. 1793–1798.
3. Zhan, Q. Focus shaping using cylindrical vector beams / Q. Zhan, J. Leger // Opt. Express. – 2002. – Vol. 7, № 10. – P. 324–331.
4. Волоконно-интерференционный метод получения неоднородно поляризованного пучка / М.В. Большаков, А.В. Гусева, Н.Д. Кундикова, И.И. Попков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 128–132.
5. Азам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Азам, Н. Башара. – М.: Мир, 1981. – 583 с.

Поступила в редакцию 15 октября 2014 г.

GENERATION OF INHOMOGENEOUSLY POLARIZED RADIATION BY FIBER INTERFERENCE METHOD

N.D. Kundikova¹, I.I. Popkov²

Experimentally implemented method for generating radiation with controlled distribution of the polarization beam cross section. The method is based on the addition of the interference of three circularly polarized laser beams of varying intensity with unit topological charges. Generation method of inhomogeneously polarized radiation allows to control the distribution of polarization of the beam cross section. Basic advantage of this method is the ability to generate an axially asymmetric polarization distribution in the cross section of the beam.

Keywords: spin; orbital momentum; optical fiber; topological charge; inhomogeneously polarized radiation.

References

1. Quabis S., Dorn R., Eberler M., Gleckl O., Leuchs G. Focusing light into a tighter spot. *Opt. Commun.* 2000. Vol. 179. pp. 1–7.
2. Kozawa Y., Sato S. Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams. *JOSA A.* 2007. Vol. 24, no. 6. pp. 1793–1798.
3. Zhan Q., Leger J. Focus shaping using cylindrical vector beams. *Opt. Express.* 2002. Vol. 7, no. 10. pp. 324–331.
4. Bolshakov M.V., Guseva A.V., Kundikova N.D., Popkov I.I. Volokonno-interferentsionnyy metod polucheniya neodnorodno polyarizovannogo puchka (Fiber and interferential method of obtaining non-homogeneous polarized beam). *Bulletin of the South Ural State University. Series of "Mathematics. Mechanics. Physics"*. 2013. Vol. 5, no. 2. pp. 128–132. (in Russ.).
5. Azzam R., Bashara N.M. *Ellipsometriya i polyarizovanny svet* (Ellipsometry and Polarized Light). Moscow, Mir Publ., 1981. 583 p. (in Russ.). [Azzam R.M.A., Bashara N.M. *Ellipsometry and Polarized Light*. Amsterdam, North-Holland, 1977. 653 p.]

Received 15 October 2014

¹ Kundikova Nataliya Dmitrievna is Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor; Dean of Physics Faculty, South Ural State University, Joint Nonlinear Optics Laboratory, Institute of Electrophysics, Ural Branch of the RAS.

E-mail: kundikovand@susu.ac.ru

² Popkov Ivan Igorevich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant, Department of Optics and Spectroscopy, South Ural State University, Junior Research Fellow, Nonlinear Optics Laboratory, Institute of Electrophysics, Ural Branch of the RAS.

E-mail: popkov.iv@gmail.com