

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕОДНОРОДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Карпеев С.В., Хонина С.Н., Казанский Н.Л., Алфёров С.В.

Институт систем обработки изображений РАН,

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)*

Аннотация

Рассмотрено исследование фокусировки пучков с радиальной и азимутальной поляризациями, сформированных разработанной ранее оптической системой, основанной на суммировании двух пучков с круговой поляризацией. Исследование проводилось методом конфокальной микроскопии. Проведённые эксперименты показали различия распределений интенсивности в фокальной области для разных типов неоднородно-поляризованных пучков и в целом согласуются с результатами проведённого численного моделирования.

Ключевые слова: поляризационно-неоднородные пучки, радиальная и азимутальная поляризации, цилиндрические пучки высокого порядка, конфокальная микроскопия.

Введение

В последнее время всё большее внимание исследователей привлекают лазерные пучки с поляризационно-неоднородным распределением. Ранее сообщалось [1] о формировании неоднородно поляризованных пучков высоких порядков путём суммирования двух пучков с круговой поляризацией. Такие пучки могут быть полезны в задачах острой фокусировки и сверхразрешения. Для более детального изучения возможностей таких приложений необходимо исследование распределений интенсивности в фокальной области высокоапертурной фокусирующей системы при различных типах неоднородной поляризации.

Известны различные методы исследования распределений с субволновой локализацией света [2], такие как ближнепольная и конфокальная микроскопия. Главным преимуществом конфокальной микроскопии является простота реализации и возможность получения результата без сканирования исследуемой области.

1. Моделирование

В работе [1] сформированные цилиндрические пучки с радиальной и азимутальной поляризациями как низкого, так и высокого порядка фокусировались линзой с низкой числовой апертурой ($NA < 0,1$), что не позволяет различать эти два типа поляризации, демонстрирующие различные свойства при острой фокусировке. При радиальной поляризации в этом случае в фокусе возникает мощная продольная компонента [3 - 6], которая совершенно отсутствует при азимутальной поляризации [7 - 9].

Продольная компонента проявляется в фокусе для равномерного распределения с радиальной поляризацией только при числовых апертурах $NA > 0,7$ [5]. Однако для распределений, с кольцевой структурой, этот эффект будет иметь место при меньших значениях числовой апертуры [4, 8].

Моделирование острой фокусировки цилиндрических пучков выполнялось в приближении Дебая [10] с использованием правила для дифракционных фокусирующих систем [11, 12].

Результаты моделирования для одно- и многокольцевых пучков, рассмотренных в [1] и имеющих

радиальную и азимутальную поляризации, приведены в табл. 1. Как видно, при азимутальной поляризации всегда имеется нулевое значение в центре фокальной плоскости. А при радиальной поляризации с увеличением числовой апертуры возникает и растёт центральный пик. Причём при использовании пучков высокого порядка центральное пятно настолько уменьшается, что наблюдается преодоление дифракционного предела: диаметр пятна по полуспаду интенсивности $FWHM < 0,5\lambda$.

Интересно, что один тип многокольцевых распределений, в частности, пучок Бесселя, позволяет получить лучшие результаты для «умеренных» значений числовой апертуры ($NA = 0,7$), а другой, например, мода Лагерра-Гаусса – для высоких числовых апертур ($NA = 0,89$).

2. Описание метода исследования

Наиболее простой вариант конфокального микроскопа основан на обратимости хода световых лучей при отражении от зеркала, установленного вблизи фокальной плоскости исследуемой высокоапертурной системы, задняя фокальная плоскость которой совмещена с передней фокальной плоскостью второго длиннофокусного объектива. Увеличение, даваемое такой системой, равно отношению фокусных расстояний.

Данный принцип реализуется в оптической схеме экспериментальной установки, приведённой на рис. 1. Часть оптической схемы до решётки G включительно и её функционирование описано ранее [1]. Далее для согласования апертуры полученного пучка с апертурой фокусирующего микрообъектива L3 пучок масштабировался при помощи телескопической системы из двух объективов L1 и L2. Светоделительная пластина BS служит для разделения получаемого изображения от источника. Пластина имеет небольшую клиновидность для разделения отражений от разных граней и, кроме того, позволяет контролировать состояние поляризации падающего пучка в отличие от светоделительных кубиков. Система крепления высокоапертурного микрообъектива позволяет совмещать с высокой точностью

поверхность зеркала М с фокальной плоскостью микрообъектива L3. Часть энергии отражённых лучей попадает в апертуру длиннофокусного объекти-

ва L4 и формирует увеличенное изображение в фокальной плоскости, где расположена ПЗС-матрица камеры CCD.

Таблица 1. Моделирование острой фокусировки цилиндрических пучков (распределение интенсивности, негативное изображение)

Тип пучка	Низшая гауссовая мода		Высшая мода Лагерра-Гаусса		Бесселевый пучок	
	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная
Входное распределение (интенсивность и фаза)						
Тип поляризации	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная
Интенсивность в фокусе NA=0,55						
			FWHM=1,62λ			
NA=0,7						
	FWHM=1,89λ		FWHM=0,85λ		FWHM=0,75λ	
NA=0,89						
	FWHM=0,8λ		FWHM=0,44λ		FWHM=0,46λ	

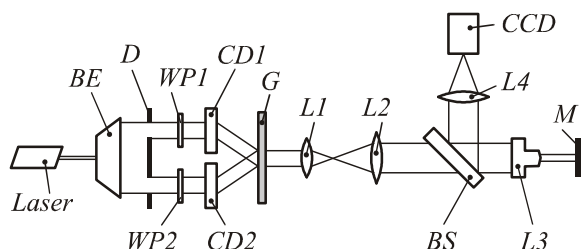


Рис. 1. Оптическая схема для исследования фокусировки поляризационно-неоднородных пучков.

BE – расширитель лазерного пучка, D – диафрагма, WP1, WP2 – четвертьволновые пластинки, CD1, CD2 – ДОО с несущей частотой, G – дифракционная решётка, L1, L2 – объективы телескопа, L3, L4 – объективы конфокального микроскопа, CCD – ПЗС-камера

3. Экспериментальное исследование фокусировки поляризационно-неоднородных пучков

Параметры оптической системы до решётки G включительно и её функционирование описаны ранее [1]. Пучок после решётки G имеет для кольцевых распределений диаметр 1,7-1,8 мм, а входная апертура 40× микрообъектива L3 с числовой апертурой 0,65 имеет диаметр около 8 мм, таким образом телескопическая система должна обеспечивать увеличение не более, чем в 4 раза. При увеличении в 4 раза будет

реализовываться числовая апертура немного менее 0,65 для распределений, имеющих кольцевую структуру. В качестве объектива L2 использовался объектив Индустар-61 ЛЗМС с многослойным просветлением и механической системой наводки на резкость. Фокусное расстояние объектива 50 мм, а диаметр апертуры около 18 мм. Это позволяет осуществить точную настройку коллиматора и предотвратить виньетирование пучка при прохождении через объектив. В качестве L1 использовался микрообъектив с фокусным расстоянием 13,9 мм. Таким образом, реально увеличение телескопической системы приблизительно трёхкратное. При таком увеличении эквивалентная числовая апертура получается около 0,55, то есть соответствует первой строке табл. 1. Точная юстировка телескопа производилась с помощью наблюдения за картиной интерференции пучков, отражённых от поверхности наклонной плоскопараллельной пластины. Светоделительная пластинка обеспечивает равную энергию отражённого и прошедшего пучков. Фокусное расстояние объектива L4 равно 300 мм, что обеспечивает увеличение приблизительно в 75 раз. На рис. 2 приведены распределения интенсивности, зафиксированные в фокальной плоскости объектива L4 при различных поляризациях и различных типах пучков, сформированных поляризационным конвертором. Исследовались низ-

шая гауссова мода и высшая мода Лагерра-Гаусса как обеспечивающие наибольшую локализацию света в фокальной области.

Как видно из рис. 2, результаты эксперимента качественно согласуются с результатами моделирования. Интенсивность в центре пика для пучков с радиальной поляризацией существенно больше, а для пучка высшего порядка провал в центре отсутствует.

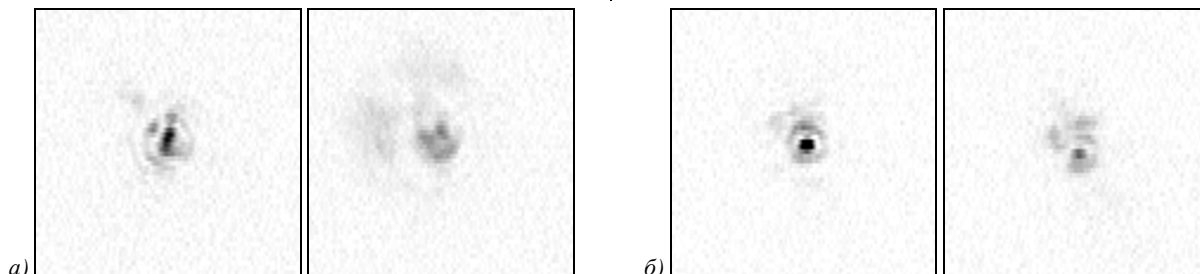


Рис. 2. Вид сфокусированных пучков низшего (а) и высшего (б) порядков с радиальной (изображение слева) и азимутальной (изображение справа) поляризациями

Заключение

Таким образом, экспериментально исследованы свойства пучков высшего порядка с радиальной и азимутальной поляризациями при фокусировке их высокоапертурной оптической системой. Полученные распределения качественно согласуются с результатами моделирования и подтверждают эффективность применения пучков высокого порядка с радиальной поляризацией в задаче острой фокусировки и сверхразрешения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а, 10-07-00533, 11-07-00153, 11-07-13164 и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9.

Литература

1. **Карпеев, С.В.** Формирование поляризационно-неоднородных лазерных пучков высокого порядка на основе пучков с круговой поляризацией / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 34, № 2. – С. 224-230.
2. **Новотный, Л.** Основы нанооптики / Л. Новотный, Б. Хехт. – Кембридж юниверсити пресс, 2006.
3. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis and G. Leuchs // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 91. – P. 233901.
4. **Kozawa, Y.** Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams // Y. Kozawa and S. Sato // J. Opt. Soc. Am. B. – 2007. – V. 24. – P. 1793.
5. **Lerman, G.M.** Effect of radial polarization and apodization on spot size under tight focusing conditions // G.M. Lerman and V. Levy // Opt. Express. – 2008. – V. 16. – P. 4567.
6. **Хонина, С.Н.** Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 58-68.

Для пучка высшего порядка наблюдается кольцо вокруг центрального пика. Видимая асимметрия пучков связана, по-видимому, с поляризационными эффектами на светоделительной пластине. Как указывалось выше, данные эффекты использовались для настройки на определённый тип поляризации, но из-за негативного влияния их на результаты планируется в дальнейшем использовать светоделительный кубик, а настройку поляризации осуществлять в отдельной ветви схемы.

7. **Kozawa, Y.** Dark spot formation by vector beams / Y. Kozawa and S. Sato // Opt. Lett. – 2008. – V. 33. – P. 2326.
8. **Tian, B.** Tight focusing of a double-ring-shaped, azimuthally polarized beam / B. Tian and J. Pu // Opt. Lett. – 2011. – V. 36. – P. 2014-2016.
9. **Хонина, С.Н.** Анализ влияния волновых aberrаций на уменьшение размеров фокального пятна в высокоапертурных фокусирующих системах // С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Е.А. Пелевина // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 203-219.
10. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards and E. Wolf // Proc. Royal Soc. A. – 1959. – Vol. 253. – P. 358-379.
11. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications // Advances in Optics and Photonics. – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
12. **Хонина, С.Н.** Анализ возможности субволновой локализации света и углубления фокуса высокоапертурной фокусирующей системы при использовании вихревой фазовой функции пропускания / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2010. – № 11. – С. 6-25.

References

1. **Karpeev, S.V.** Simple technique of generation inhomogeneously polarized laser beams by means of DOEs / S.V. Karpeev, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2011. – V. 35(1). – P. 54-62. – (in Russian).
2. **Novotny, L.** Principles of nano-optics / L. Novotny and B. Hecht. – Cambridge University Press, 2006.
3. **Dorn, R.** Sharper focus for a radially polarized light beam / R. Dorn, S. Quabis and G. Leuchs // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 91. – P. 233901.
4. **Kozawa, Y.** Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams / Y. Kozawa and S. Sato // J. Opt. Soc. Am. B. – 2007. – V. 24. – P. 1793.
5. **Lerman, G.M.** Effect of radial polarization and apodization on spot size under tight focusing conditions / G.M. Lerman and V. Levy // Opt. Express. – 2008. – V. 16. – P. 4567.
6. **Khonina, S.N.** Control by contribution of components of vector electric field in focus of a high-aperture lens by means of binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // Computer Optics. – 2011. – V. 34(1). – P. 58-68. – (in Russian).

7. **Kozawa, Y.** Dark spot formation by vector beams / Y. Kozawa and S. Sato // *Opt. Lett.* – 2008. – V. 33. – P. 2326.
8. **Tian, B.** Tight focusing of a double-ring-shaped, azimuthally polarized beam / B. Tian and J. Pu // *Opt. Lett.* – 2011. – V. 36. – P. 2014-2016.
9. **Khonina, S.N.** Analysis of wave aberration influence on reducing focal spot size in a high-aperture focusing system / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, E.A. Pelevina // *Computer Optics.* – 2011. – V. 35(2). – P. 203-219. – (in Russian).
10. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards and E. Wolf // *Proc. Royal Soc. A.* – 1959. – Vol. 253. – P. 358-379.
11. **Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics.* – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
12. **Khonina, S.N.** Possibility Analysis of Subwavelength Light Localization and Focus Extending for High-Aperture Focusing System Using Vortical Phase Transmission Function / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Electromagnetic Waves and Electronic Systems.* – 2010. – N 11. – P. 6-25. – (In Russian).

INVESTIGATION OF FOCUSING INHOMOGENEOUSLY POLARIZED HIGHER-ORDER LASER BEAMS

S.V. Karpeev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.V. Alferov
Image Processing Systems Institute of the RAS,

S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

We investigate focusing of laser beams with radial and azimuthal polarization formed by earlier developed optical system based on summation of two beams with circular polarization. Investigation was spent by a method of confocal microscopy. The experiments have shown distinctions in focal intensity distributions for different types of the inhomogeneously polarized beams and as a whole are in agreement with results of the numerical modeling.

Key words: inhomogeneously polarized beams, circular, radial and azimuthal polarization, higher-order cylindrical beams, confocal microscopy.

Сведения об авторах



Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений.

E-mail: karp@smr.ru.

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.



Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

E-mail: khonina@smr.ru.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

Сведения об авторе **Казанский Николай Львович** – см. стр. 328 этого номера.



Алфёров Сергей Владимирович, программист лаборатории НИЛ-35 Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: дифракционная оптика, ближнепольная микроскопия.

Sergei Vladimirovich Alferov, programmer of laboratory SRL-35 of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, near-field microscopy.

Поступила в редакцию 25 июня 2011 г.