

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-НЕОДНОРОДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА МЕТОДАМИ БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ

Алфёров С.В.

Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

### Аннотация

Рассмотрено исследование острой фокусировки пучков с радиальной и азимутальной поляризациями, сформированных разработанной ранее оптической системой, основанной на суммировании двух пучков с круговой поляризацией. Исследование проводилось методами ближнепольной 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, ближнепольная 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.

Наиболее распространённый метод исследования распределений с субволновой локализацией света – это сканирующая ближнепольная микроскопия [2]. Главным преимуществом ближнепольной микроскопии является простота реализации и возможность измерения продольной компоненты электромагнитного поля.

### 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].

Моделирование проводилось для многокольцевых пучков, рассмотренных в [1] и имеющих радиальную и азимутальную поляризации. Результаты моделирования представлены в табл. 1. Общим является то, что при азимутальной поляризации всегда имеется нулевое значение в центре фокальной плоскости, а при радиальной поляризации с увеличением числовой апертуры возникает и растёт центральный пик.

Интересно, что один тип многокольцевых распределений, в частности, пучок Бесселя, позволяет получить лучшие результаты в серии экспериментов для «умеренных» значений числовой апертуры ( $NA = 0,6$ ), причём они достигаются вне фокуса, а другой, например, мода Лагерра-Гаусса – для высоких числовых апертур ( $NA = 0,8$ ) [13].

### 2. Экспериментальное исследование фокусировки поляризационно-неоднородных пучков

С помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ) исследовались распределения интенсивности в фокальной зоне остро сфокусированных неоднородно поляризованных пучков высоких порядков с длиной волны  $\lambda = 632$  нм.

Сами неоднородно поляризованные пучки высоких порядков получались путём суммирования двух пучков с круговой поляризацией по схеме, описанной в работе [1]. Существуют разные варианты ближнепольных микроскопов [2], отличающиеся типами применяемых зондов, а также схемами регистрации измеряемой интенсивности. Проведённое моделирование показало существенный вклад продольной компоненты электромагнитного поля в исследуемые распределения.

Исследования, проведённые например, в работе [2], показывают чувствительность волоконных тейперов к продольной компоненте, в отличие от микроканальных зондов с коллимирующим микрообъективом.

Для измерений применялась СБОМ измерительную головку, входящая в комплект зондовой нанолaborатории ИНТЕГРА Соларис. Оптоволоконный зондовый датчик представляет собой заострённое одномодовое волокно, на конец которого напылён слой металла с таким расчётом, чтобы на острие остался чистый участок с апертурой диаметром 50–100 нм. Подобные зонды применялись и в работе [2].

Для подвода фокусируемого пучка с неоднородной поляризацией к фокусирующему микрообъективу было изготовлено новое основание для измерительной головки с высотой, позволяющей разместить микрообъектив и его систему позиционирования. Система позиционирования фокусирующего высокоапертурного микрообъектива позволяет предварительно совмещать плоскость сканирования ближнепольного микроскопа с фокальной плоскостью микрообъектива, а

также оптическую ось микрообъектива с осью фокусируемого пучка. Точность позиционирования позволяет в дальнейшем проводить сканирование пучка XYZ-сканером измерительной головки в пределах его диапазона перемещений. Для исследований были выбраны: 40× микрообъектив с числовой апертурой 0,6 и 60× микрообъектив с числовой апертурой 0,8. Были изготовлены новые ДОЭ диаметром 8 мм под входные апертуры этих микрообъективов.

Таблица 1. Моделирование и натурный эксперимент по острой фокусировке цилиндрических пучков

Моделирование острой фокусировки цилиндрических пучков				Экспериментальное исследование острой фокусировки цилиндрических пучков			
Высшая мода Лагерра-Гаусса (3,0) В фокусе NA=0,8		Бесселев пучок вне фокуса, NA=0,6		Высшая мода Лагерра-Гаусса (3,0) В фокусе NA=0,8		Бесселев пучок вне фокуса, NA=0,6	
Тип поляризации							
радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная
Интенсивность (негативное изображение)							
Сечения							

Результаты измерений приведены в табл. 1. В общем, получено неплохое совпадение с результатами моделирования. Для всех пучков наблюдается кольцо вокруг центрального пика. Некоторая асимметрия пучков связана, по-видимому, с поляризационными эффектами на светоделительной пластине. Провал в центре бесселева пучка с радиальной поляризацией в эксперименте получился несколько больше, чем при моделировании, что объясняется, видимо, некоторым различием в положении плоскостной моделирования и проведённых измерений. Однако для пучка ЛГ при числовой апертуре 0,85 происходит полное формирование центрального пика, как и предсказывалось моделированием, а, следовательно, подтверждено предположение о возможности измерения продольной компоненты электромагнитного поля на данном оборудовании.

### 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. **Khonina, S.N.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.V. Karpeev, S.N. Khonina, S.V. Alferov // *Opt. Lett.* – 2012. – Vol. 37, N 12. – P 2385-2387.
2. **Descrovi, E.** Optical properties of microfabricated fully-metal-coated near-field probes in collection mode / E. Descrovi // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2005. – Vol. 22, N 7. – P. 1432.
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. Волоотовский // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 58-68.
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 / Q. Zhan // 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. Волоотовский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2010. – № 11. – С. 6-25.
  13. **Карпеев, С.В.** Исследование фокусировки поляризационно-неоднородных лазерных пучков высокого порядка / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, Н.Л. Казанский, С.В. Алфёров // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 355-339.
  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).
  13. **Karpeev, S.V.** Investigation of focusing inhomogeneously polarized higher-order laser beams / S.V. Karpeev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.V. Alferov // Computer Optics. – 2011. – V. 35(3). – P. 355-339. – (In Russian).

### References

1. **Khonina, S.N.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.V. Karpeev, S.N. Khonina, S.V. Alferov // Opt. Lett. – 2012. – Vol. 37, N 12. – P. 2385-2387.
2. **Descrovi, E.** Optical properties of microfabricated fully-metal-coated near-field probes in collection mode / E. Descrovi // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – Vol. 22, N 7. – P. 1432.

## INVESTIGATION OF TIGHT FOCUSING INHOMOGENEOUSLY POLARIZED HIGHER-ORDER LASER BEAMS BY NEAR FIELD MICROSCOPY METHODS

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 near-field microscopy. The experiments have shown differences in the distributions of intensity in the focal region for different types of inhomogeneously polarized beams, and are generally consistent with the results of numerical simulation.

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

### Сведения об авторе

**Алфёров Сергей Владимирович**, аспирант, инженер кафедры нанотехнологий 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.

