

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

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

Институт систем обработки изображений РАН,

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

Аннотация

Проведено 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 интенсивности электромагнитного поля с субволновым разрешением.

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 синусного правила для апланатических объективов [6, 12].

Сравнительные результаты моделирования для мало- и многокольцевых лазерных пучков (соответствуют модам низкого и высокого порядка) с различной поляризацией при значениях числовой апертуры $NA = 0,6$ и $NA = 0,8$ приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Как следует из результатов табл. 1, даже при «умеренных» значениях числовой апертуры наблюдается различие при фокусировке пучков с различной поляризацией.

В частности, абсолютный ноль интенсивности в центре фокуса обеспечивается только в двух случаях: когда пучок с круговой поляризацией имеет фазовую вихревую особенность того же направления, что и направление круговой поляризации, а также при азимутальной поляризации.

При других рассмотренных типах поляризации независимо от типа пучка в центре фокуса имеется ненулевое значение интенсивности. Причём при радиальной поляризации это значение наибольшее.

При увеличении числовой апертуры (см. табл. 2) наблюдается рост значения интенсивности в центре фокальной области, связанный с усилением продольной компоненты электрического поля. Данная компонента принципиально отсутствует для полей с азимутальной поляризацией и уничтожается при внесении в поле с круговой поляризацией фазовой вихревой особенности того же направления [6, 12].

Таким образом, на основе картины интенсивности в фокусе можно дифференцировать типы поляризаций падающего поля. В частности, это удобно при определении типа поляризации векторных цилиндрических пучков, созданных универсальными преобразователями [1] – азимутальная и радиальная поляризация существенно различаются в центральной части фокуса.

Заметим также, что для различных приложений актуально формирование не только фокального пятна малого размера, но и узкого кольцевого распределения [13]. В частности, кольцевая интенсивность

с нулевой центральной областью очень малого радиуса используется для повышения разрешающей способности оптических систем за счёт технологии вынужденного истощения излучения (stimulated emission depletion, STED).

Причём, как видно из результатов расчёта, получить кольцевое распределение с малым внутренним диаметром по полуспаду интенсивности (full width half maximum, FWHM) значительно проще, чем факальное пятно с аналогичными характеристиками.

Таблица 1. Моделирование острой фокусировки ($NA=0,6$) лазерных пучков с различной поляризацией (распределение интенсивности, негативное изображение размером $10\lambda \times 10\lambda$)

Тип пучка	Входное распределение интенсивности	Распределение интенсивности в фокусе при различных поляризациях				
		линейная	круговая «+»	круговая «-»	радиальная	азимутальная
Вихревой гауссов пучок						
Вихревая мода Лагерра-Гаусса						
Вихревой бесселев пучок						

2. Экспериментальное исследование фокусировки поляризационно-неоднородных пучков

С помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа 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. Мы применяли для измерений СБОМ измерительную головку, входящую 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 измери-

тельной головки в пределах его диапазона перемещений. Для исследований были выбраны: 40× микробиолин с числовой апертурой 0,6 и 60× микробиолин с числовой апертурой 0,8. Были изготовлены новые ДОО диаметром 8 мм под входные апертуры этих микробиолинов.

Результаты измерений приведены в табл. 3. 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

для числовой апертуры 0,6 в эксперименте получился несколько больше, чем при моделировании, что объясняется, видимо, некоторым различием в положении плоскостей моделирования и проведённых измерений. По всей видимости, по той же причине при числовой апертуре 0,8 ширина центрального пика меньше, чем при моделировании. Однако для пучка ЛГ при числовой апертуре 0,8 в фокусе происходит формирование центрального пика такой ширины, как и предсказывалось моделированием. Следовательно, нами показана возможность измерения продольной компоненты электромагнитного поля на данном оборудовании.

Таблица 2. Моделирование острой фокусировки ($NA=0,8$) лазерных пучков с различной поляризацией (распределение интенсивности, негативное изображение размером $10\lambda \times 10\lambda$)

Тип пучка	Входное распределение интенсивности	Распределение интенсивности в фокусе при различных поляризациях				
		линейная	круговая «+»	круговая «-»	радиальная	азимутальная
Вихревой гауссов пучок						
Вихревая мода Лагерра-Гаусса						
Вихревой бесселев пучок вне фокуса						

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 грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а, гранта Президента РФ

поддержки ведущих научных школ НШ-4128.2012.9 и ФЦП «Кадры» Минобрнауки (соглашение 8231).

Литература

1. **Khonina, S.N** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // Opt. Lett. – 2012. – Vol. 37, N 13.
2. **Descrovi, E.** Optical properties of microfabricated fully-metal-coated near-field probes in collection mode / E. Descrovi // J. Opt. Soc. Am. A. – 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.

Таблица 3. Экспериментальное исследование острой фокусировки цилиндрических пучков (распределение интенсивности)

Тип пучка	Бесселевый пучок вне фокуса, NA = 0,6		Бесселевый пучок вне фокуса, NA = 0,8		Высшая мода Лагерра-Гаусса в фокусе NA = 0,8	
	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная	радиальная	азимутальная
Тип поляризации						
Интенсив- ность (негативное изображение)						
Сечения						
			FWHM = 1,05λ		FWHM = 0,83λ	

- Kozawa, Y.** Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2007. – V. 24. – P. 1793.
- 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.
- Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2010. – Vol. 27, N 10. – P. 2188-2197.
- Kozawa, Y.** Dark spot formation by vector beams / Y. Kozawa and S. Sato // *Opt. Lett.* – 2008. – V. 33. – P. 2326.
- 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.
- Хонина, С.Н.** Анализ влияния волновых aberrаций на уменьшение размеров фокального пятна в высоко-апертурных фокусирующих системах // С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Е.А. Пелевина // *Компьютерная оптика.* – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 203-219.
- 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.
- Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics.* – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
- Khonina, S.N.** Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Journal of Modern Optics.* – 2011. – Vol. 58, N 9. – P. 748-760.
- Khonina, S.N.** Enlightening darkness to dif fraction limit and beyond: comparison and optimization of different polarizations for dark spot generation / S.N. Khonina and I. Golub // *J. Opt. Soc. Am. A* – 2012. – Vol. 29, N 7. – P. 1470-1474.
- Hell, S.W.** Breaking the diffraction resolution limit by stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy / S.W. Hell and J. Wichmann // *Opt. Lett.* – 1994. – V. 19. – P. 780-782.

References

- Khonina, S.N.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // *Opt. Lett.* – 2012. – Vol. 37, N 13.
- Descrovi, E.** Optical properties of microfabricated fully-metal-coated near-field probes in collection mode / E. Descrovi // *J. Opt. Soc. Am. A.* – Vol. 22, N 7. – P. 1432.
- 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.
- 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.
- 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.
- Khonina, S.N.** Controlling the contribution of the electric field components to the focus of a high-aperture lens using binary phase structures / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2010. – Vol. 27, N 10. – P. 2188-2197.
- Kozawa, Y.** Dark spot formation by vector beams / Y. Kozawa and S. Sato // *Opt. Lett.* – 2008. – V. 33. – P. 2326.
- 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.
- 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).
- 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.
- Zhan, Q.** Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Advances in Optics and Photonics.* – 2009. – Vol. 1. – P. 1-57.
- Khonina, S.N.** Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.G. Volotovskiy // *Journal of Modern Optics.* – 2011. – Vol. 58, N 9. – P. 748-760.

13. **Khonina, S.N.** Enlightening darkness to dif fraction limit and beyond: comparison and optimization of different polarizations for dark spot generation / S.N. Khonina and I. Golub // J. Opt. Soc. Am. A – 2012. – Vol. 29, N 7. – P. 1470-1474.

14. **Hell, S.W.** Breaking the diffraction resolution limit by stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy / S.W. Hell and J. Wichmann // Opt. Lett. – 1994. – V. 19. – P. 780-782.

INVESTIGATION OF FOCUSING INHOMOGENEOUSLY POLARIZED HIGHER-ORDER LASER BEAMS

*S.V. Karpeev, S.N. Khonina, 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.

Сведения об авторе **Хонина Светлана Николаевна** см. стр. 478 этого номера.



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

Sergei Vladimirovich Alferov, he is trainee researcher of Laboratory of Micro- and Nanotechnology at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Post graduated student, 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 сентября 2012 г.