

ФОРМИРОВАНИЕ СПИРАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ БИНАРНЫМ ВИХРЕВЫМ АКСИКОНОМ*Дегтярев С.А., Хонина С.Н., Подлипов В.В.**Институт систем обработки изображений РАН,**Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)***Аннотация**

Показана возможность формирования фотонной микроспирали в ближней зоне дифракции лазерного пучка на бинарном вихревом фазовом аксиконе. Численное моделирование выполнено в пакете Comsol, в котором уравнение Гельмгольца решается методом конечных элементов. Верификация численных расчётов произведена путём экспериментальных измерений, проведённых с помощью ближнепольного микроскопа NT-MDT Integra Spectra.

Ключевые слова: фокусировка, фотонная спираль, бинарный фазовый вихревой аксикон, метод конечных элементов, ПО Comsol, ближнепольный микроскоп NT-MDT Integra Spectra.

Введение

Замечательные свойства структурированных особым образом световых полей находят применение при манипулировании микро- и нанообъектами [1–5], причём особый интерес представляют вихревые пучки, обладающие орбитальным угловым моментом. Как правило, вихревые пучки создаются различными методами внесения вихревой фазовой сингулярности. В частности, спиральные фазовые пластинки, вихревые аксиконы, вихревые зонные пластинки, бинарные вилкообразные решётки являются элементами дифракционной оптики, позволяющими эффективно формировать вихревые пучки [6].

Поперечное распределение интенсивности пучков, имеющих фазовую вихревую сингулярность целого порядка, выглядит как симметричное световое кольцо. Визуализировать спирально-поступательный характер таких пучков можно внесением некоторой асимметрии, в частности, закрытием части пучка экраном [7] или внесением поперечной децентровки для оптического элемента [8].

Однако для формирования лазерных пучков, трёхмерное распределение интенсивности которых имеет спиральный вид, необходимо использовать суперпозиции оптических вихрей различных порядков [1–3, 6, 9–11]. В этом случае весь пучок может даже не иметь углового орбитального момента [12], но отдельные его составляющие выглядят как спиральные световые трубки, которые могут перемещать по спиральной траектории захваченные частицы [1–3].

В работе [13] предложен новый оптический элемент для создания оптической сабли. Оптическая сабля – спирально закрученное распределение интенсивности в Фурье-плоскости изображающей системы.

Заметим, что упомянутые выше пучки, имеющие спиральную интенсивность, рассматривались в параксиальном режиме. Формирование таких пучков в ближней зоне дифракции требует использования элементов микрооптики.

В [14] предложен преобразователь поляризации из эллиптической в радиальную на основе кавитационных микропузырьков в кварце. С помощью микропузырьков получены оптические поля с вихревой сингулярностью, распределение интенсивности которых

представляет собой две двумерные закрученные спирали. Пространственное строение структуры распределения интенсивности изучалось косвенно, путём дефокусировки изображающей системы.

В [15] предложена оптическая схема, в которой с помощью спирального аксикона получен фемтосекундный импульс с вихревым угловым моментом второго порядка.

В [16] описан эксперимент по измерению дифракции Гауссова пучка на высокоапертурном вихревом бинарном аксиконе. Однако картина интенсивности была получена только в одном сечении, и спиральная структура распределения интенсивности не была выявлена. В работе [17] также рассматривалась фокусировка лазерного излучения с помощью бинарного фазового спирального аксикона и была обнаружена асимметрия в распределении интенсивности, но объяснения этому явлению не было дано.

Моделирование, проведённое в данной работе, показывает, что объёмное строение спирального аксикона позволяет создать спиралевидное распределение интенсивности в ближней зоне дифракции. Результаты моделирования подтверждены экспериментально с помощью ближнепольного микроскопа NT-MDT Integra Spectra.

1. Моделирование дифракции Гауссова пучка на бинарном вихревом аксиконе в приближении тонкого оптического элемента

Бинарный вихревой фазовый аксикон (рис. 1) представляет собой дифракционный оптический элемент с функцией пропускания:

$$\tau(r, \varphi) = \exp\left(i \arg\left[\cos(k \alpha_0 r + m\varphi)\right]\right), \quad (1)$$

где (r, φ) – полярные координаты, $\arg(\cdot)$ – операция взятия аргумента, α_0 – параметр аксикона, соответствующий его числовой апертуре, m – порядок оптического вихря, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны падающего на аксикон излучения.

Функция пропускания (1) объединяет функцию пропускания аксикона, а также вихревую фазовую составляющую.

На рис. 1 показаны результаты расчёта дифракции линейно-поляризованного Гауссова пучка на аксиконе (1) в приближении тонкого элемента с использованием интегральных операторов распространения [18].

Параметры расчёта: $\lambda = 0,633$ мкм, радиус Гауссова пучка – 10 мкм, $\alpha_0 = 0,5$, $m = 1$.

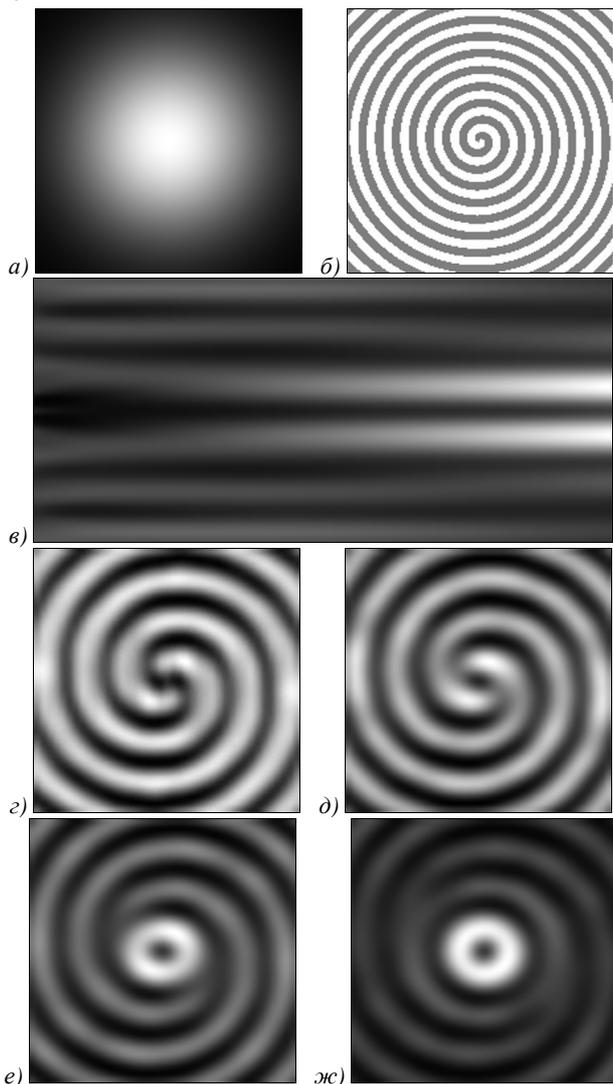


Рис. 1. Дифракция Гауссова пучка на аксиционе (1) в приближении тонкого элемента: освещающий пучок (а), центральная часть фазы аксициона (б), картина дифракции в продольном сечении $z \in [0, 1$ мкм, 2 мкм] (в) и в поперечных сечениях (4 мкм×4 мкм) на расстояниях $z = 0,2$ мкм (г), $z = 0,6$ мкм (д), $z = 1,2$ мкм (е), $z = 2$ мкм (ж)

Модель тонкого элемента предсказывает формирование из спиральной структуры полой световой трубки уже на расстоянии 2 мкм от плоскости оптического элемента. При этом световое кольцо в поперечной плоскости постепенно приобретает радиальную симметрию.

Ранее полученные экспериментальные результаты [17] показывали несколько иной тип асимметрии, чем в полученной картине дифракции на рис. 1г-е. Чтобы более детально исследовать это явление, используем более точную модель расчёта.

2. Моделирование дифракции Гауссова пучка на бинарном вихревом аксиционе методом конечных элементов

Моделирование дифракции лазерного излучения на объёмном оптическом элементе (1) выполнялось на ос-

нове решения уравнения Гельмгольца методом конечных элементов, реализованном в программном пакете Comsol. На рис. 2 изображён исследуемый бинарный вихревой аксицион с элементами тетраэдрической сетки.

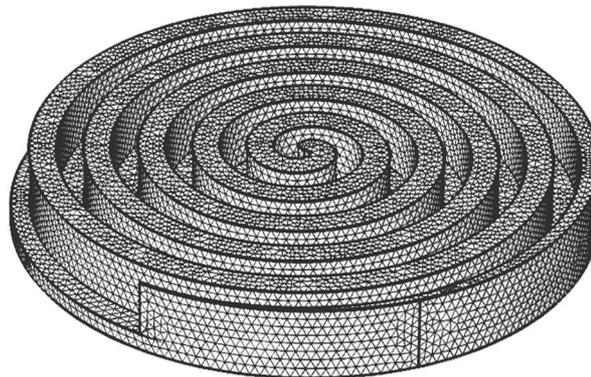


Рис. 2. Бинарный дифракционный фазовый аксицион с элементами тетраэдрической сетки

Высота рельефа бинарного аксициона равна:

$$h = \frac{\lambda}{n-1}, \tag{2}$$

где $n = 1,5$ – показатель преломления.

На рис. 3 показаны результаты моделирования: аксицион, расположенный в цилиндрической области пространства, освещается снизу Гауссовым пучком, который, проходя через вихревой аксицион, фокусируется и приобретает вихревую фазу. Параметры расчёта такие же, как в предыдущем разделе, расчётная область – 10 мкм×10 мкм×5 мкм.

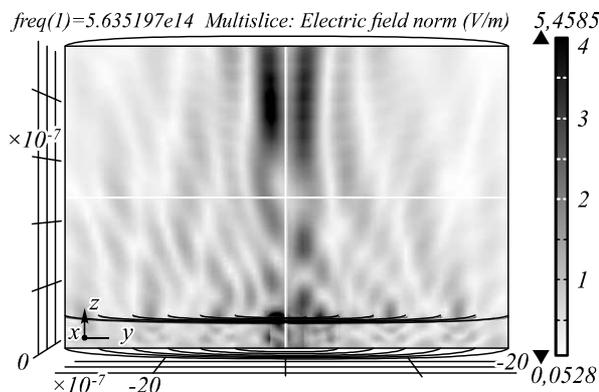


Рис. 3. Распределение амплитуды электрического поля в продольном сечении цилиндрической расчётной области

Из рис. 3 видно, что вблизи элемента с числовой апертурой $NA = 0,5$ формируется область интенсивности спиралевидной формы. Однако на удалении от элемента начинает формироваться кольцо с относительно равномерным распределением энергии по радиусу.

Поперечные сечения картин дифракции представлены в табл. 1 (первая и третья строки).

Как следует из приведённых поперечных картин, даже на расстоянии 0,2 мкм уже формируется яркое световое пятно, смещённое из центра. Оно сохраняется, вращаясь, вплоть до расстояния 1 мкм. После этого начинает формироваться световое кольцо. На расстоянии 2 мкм от элемента формируется почти симметричное кольцо (табл. 1, последняя строка), что со-

гласуется с результатами модели тонкого элемента, рассмотренными в предыдущем разделе.

Более наглядно трёхмерная картина дифракции в ближней зоне показана на рис. 4. Хорошо видно, что сначала пучок имеет спиралевидную форму, а потом формируется полая световая трубка, обладающая радиальной симметрией.

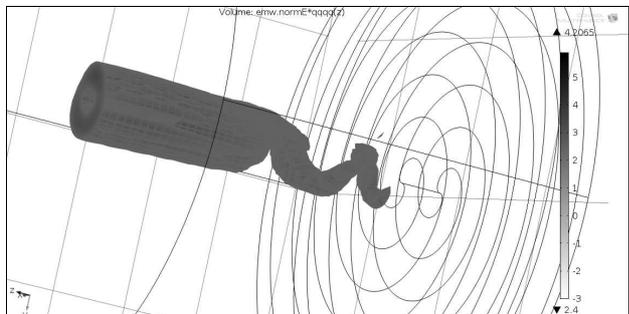


Рис. 4. Трёхмерная картина дифракции Гауссова пучка на бинарном вихревом аксиконе

3. Экспериментальные измерения

Для проведения натурных экспериментов бинарный вихревой аксикон с числовой апертурой 0,5 был изготовлен методом прямой записи электронным пучком на резисте. Процесс изготовления описан в [17]. На рис. 5 приведено изображение центральной части изготовленного вихревого аксикона, снятое с помощью сканирующего электронного микроскопа.

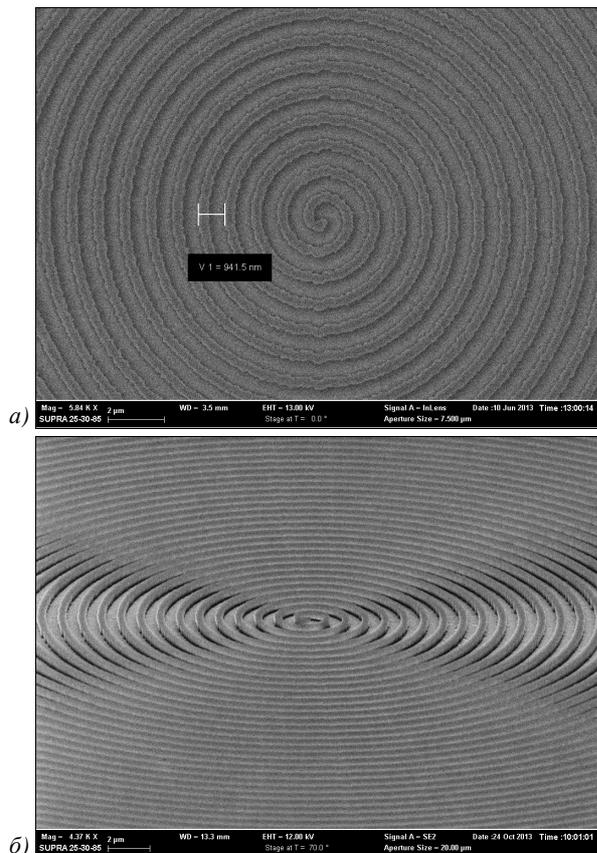


Рис. 5. Изображение аксикона, полученное с помощью растрового электронного микроскопа: вид сверху (а), вид сбоку (б)

Диаметр элемента – 500 мкм, период – 1 мкм, высота рельефа – 0,5 мкм. Погрешность изготовления составляет около 5 %. Неточное соответствие высоты рельефа требуемой задержке фазы снижает эффективность, однако качественная картина дифракции сохраняется.

Для экспериментальных измерений формируемого аксиконом распределения применялся ближнепольный микроскоп Integra Spectra. Данный микроскоп успешно использовался для регистрации интенсивности поперечных компонент электрического поля [17, 19, 20] в ближней зоне дифракции.

Использовавшийся микроскоп, кроме ближнепольных измерений, позволяет построить рельеф исследуемого оптического элемента. На рис. 6 показан рельеф вихревого аксикона, построенный с помощью ближнепольного микроскопа, который визуально совпадает с картиной, полученной с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 5). Стоит отметить, что в связи с влиянием геометрии кантилевера, который (согласно [19]) имеет угол при вершине 70°, на рис. 6 наблюдается сглаживание ступеней рельефа.

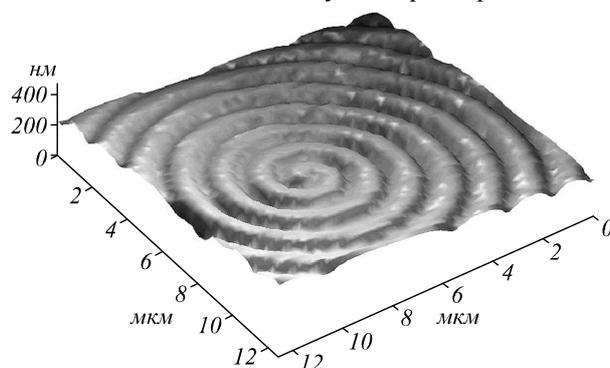


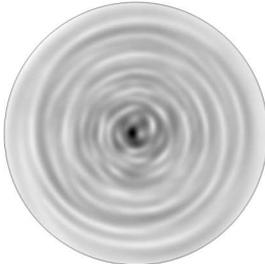
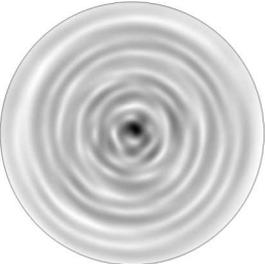
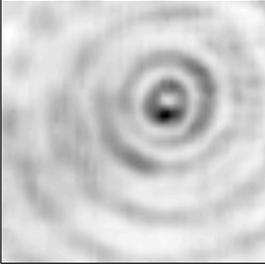
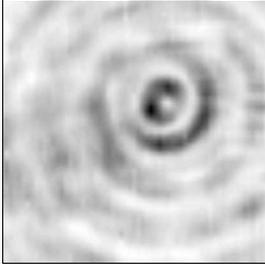
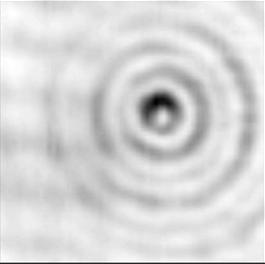
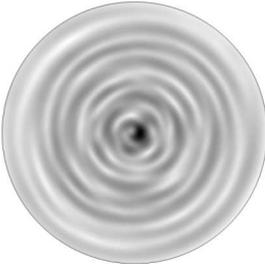
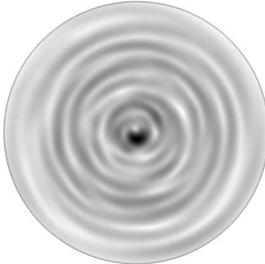
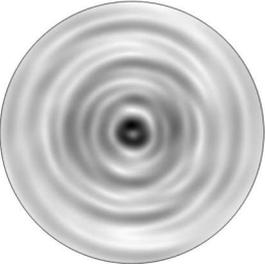
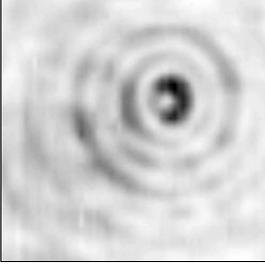
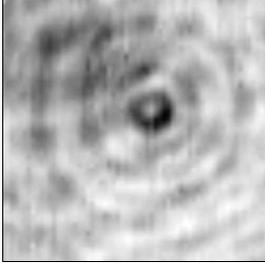
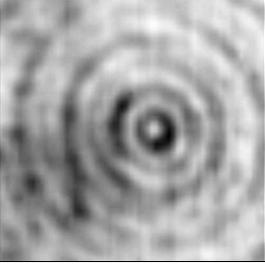
Рис. 6. Рельеф аксикона, построенный с помощью кантилевера ближнепольного микроскопа

Результаты экспериментального сканирования картин дифракции линейно-поляризованного Гауссова пучка с радиусом перетяжки 10 мкм на бинарном вихревом аксиконе показаны в табл. 1.

В табл. 1 приведены двумерные картины распределения интенсивности в плоскостях, параллельных подложке и отстоящих на различных расстояниях от подложки. В первой и третьей строках расположены картины, полученные при моделировании методом конечных элементов, а во второй и четвертой – соответствующие результаты эксперимента. Размер модельных картин – 8 мкм×8 мкм, а экспериментальных – 5 мкм×5 мкм.

Первые картины (модельная и экспериментальная) получены на расстоянии 0,2 мкм от плоскости элемента, последующие картины получены с шагом 0,2 мкм. На расстояниях до 1 мкм наблюдается хорошее качественное согласование экспериментальных и численных результатов. Моделирование показывает, что на расстоянии в 2 мкм от аксикона спиральное распределение заканчивается и начинается трубковидное. Экспериментальные измерения показывают, что спиральное распределение полностью не переходит в трубковидное даже на удалении в 2 мкм от элемента.

Таблица 1. Интенсивность в поперечных сечениях на различных расстояниях от аксикона

Расстояние от аксикона	0,2 мкм	0,4 мкм	0,6 мкм
Моделирование			
Эксперимент			
Расстояние от аксикона	0,8 мкм	1 мкм	2 мкм
Моделирование			
Эксперимент			

Из проведённых измерений можно видеть, что с удалением от элемента максимум интенсивности вращается вокруг оптической оси. Можно заключить, что фокальная область имеет спиралевидную форму – получается фотонная микроспираль.

Заключение

В работе исследовалась фокусировка Гауссова пучка бинарным фазовым вихревым аксиконом. Численное моделирование в пакете Comsol показало, что в фокальной области вблизи аксикона формируется спиралевидное распределение интенсивности, которое в работе названо фотонной спиралью. Экспериментальные измерения ближнего поля подтвердили результаты численного моделирования.

Таким образом, авторами проведены численные исследования с экспериментальной верификацией расчётных результатов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 13-07-00266 и 14-07-31079 мол_а.

Литература

1. **Сойфер, В.А.** Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порождённые дифракционной оптикой / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2004. – Т. 35, № 6. – С. 1368-1432.
2. **Khonina, S.N.** Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs,

- J. Simonen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 2004. – V. 51, Issue 14. – P. 2167-2184.
3. Дифракционная компьютерная оптика / Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
 4. **Andrews, D.L.** Structured light and its applications: an introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces. – Burlington, USA: Elsevier Inc., 2008. – 341 p.
 5. **Dienerowitz, M.** Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles / M. Dienerowitz, M. Mazilu, P.J. Reece, T.F. Krauss and K. Dholakia // *Optics Express*. – 2008. – V. 16, Issue 7. – P. 4991-4999.
 6. Дифракционная нанофотоника / А.В. Гаврилов, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, П.Н. Дьяченко, А.А. Ковалев, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, Д.В. Нестеренко, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина, Я.О. Шуюпова; под ред. В.А. Сойфера – М.: Физматлит, 2011. – 680 с.
 7. **Хонина, С.Н.** Простой способ эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 70-78.
 8. **Qiong-Ge, S.** Generalization and propagation of spiraling Bessel beams with a helical axicon / S. Qiong-Ge, Z. Ke-Ya, F. Guang-Yu, L. Zheng-Jun and L. Shu-Tian // *Chinese Physics B*. – 2012. – V. 21, Issue 1. – P. 014208 (10p).
 9. **Котляр, В.В.** Вращение световых много-модовых пучков Гаусса-Лагерра в свободном пространстве / В.В. Котляр, В.А. Сойфер, С.Н. Хонина // *Письма в ЖТФ*. – 1997. – Т. 23, № 17. – С. 1-6.
 10. **Paakkonen, P.** Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics / P. Paakkonen, J. Lautanen, M. Honkanen, M. Kuittinen, J. Turunen, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, A.T. Friberg // *Journal of Modern Optics*. – 1998. – V. 45, Issue 11. – P. 2355-2369.
 11. **Khonina, S.N.** Generating a couple of rotating nondiffracting beams using a binary-phase DOE / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lautanen, M. Honkanen, J. Turunen // *Optik*. – 1999. – V. 110, Issue 3. – P. 137-144.
 12. **Kotlyar, V.V.** Rotation of laser beams with zero of the orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov and V.A. Soifer // *Optics Communications*. – 2007. – V. 274. – P. 8-14.
 13. **Singh, B.K.** Conical light sword optical beam and its healing property / Brijesh Kumar Singh, Dalip Singh Mehta, Paramasivam Senthilkumara // *Optics Letters*. – 2014. – V. 39, Issue 7. – P. 2064-2067.
 14. **Beresna, M.** Twisting light with micro-spheres produced by ultrashort light pulses / Martynas Beresna, Mindaugas Gecevicius, Nadezhda M. Bulgakova, and Peter G. Kazansky // *Optics Express*. – 2011. – V. 19, Issue 20. – P. 18989.
 15. **Bock, M.** Few-cycle high-contrast vortex pulses / Martin Bock, Jurgen Jahns, Ruediger Grunwald // *Optics Letters*. – 2012. – V. 37, Issue 18. – P. 3804-3806.
 16. **Хонина, С.Н.** Экспериментальная демонстрация формирования продольной компоненты электрического поля на оптической оси с помощью высокоапертурных бинарных аксиономов при линейной и круговой поляризации освещающего пучка / С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, С.В. Алфёров, Д.А. Савельев // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 1 – С. 76-87.
 17. **Хонина, С.Н.** Экспериментальное исследование дифракции линейно поляризованного гауссова пучка на бинарных микроаксиомах с периодом, близким к длине волны / С.Н. Хонина, Д.В. Нестеренко, А.А. Морозов, Р.В. Скиданов, И.А. Пустовой // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 11-21.
 18. **Хонина, С.Н.** Расчёт дифракции линейно-поляризованного ограниченного пучка с постоянной интенсивностью на высокоапертурных бинарных микроаксиомах в ближней зоне / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, С.Г. Волоотовский, А.А. Ковалёв // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 443-460.
 19. **Стафеев, С.С.** Особенности измерения субволнового фокусного пятна ближнепольным микроскопом / С.С. Стафеев, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 332-340.
 20. **Jia, B.** Direct observation of a pure focused evanescent field of a high numerical aperture objective lens by scanning near-field optical microscopy / B. Jia, X. Gan and M. Gu // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 86. – P. 131110.

References

1. **Soifer, V.A.** Optical microparticle manipulation: advances and new possibilities created by diffractive optics / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina // *Physics of Particles and Nuclei*. – 2004. – V. 35, Issue 6. – P. 733-766.
2. **Khonina, S.N.** Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 2004. – V. 51, Issue 14. – P. 2167-2184.
3. Computer Design of Diffractive Optics / D.L. Golovashkin, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov; ed. V.A. Soifer – Cambridge Inter. Scien. Pub. Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. – 896 p.
4. **Andrews, D.L.** Structured light and its applications: an introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces. – Burlington, USA: Elsevier Inc., 2008. – 341 p.
5. **Dienerowitz, M.** Optical vortex trap for resonant confinement of metal nanoparticles / M. Dienerowitz, M. Mazilu, P.J. Reece, T.F. Krauss and K. Dholakia // *Optics Express*. – 2008. – V. 16, Issue 7. – P. 4991-4999.
6. Diffractive nanophotonics / A.V. Gavrilo, D.L. Golovashkin, L.L. Doskolovich, P.N. Dyachenko, A.A. Kovalev, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, D.V. Nesterenko, V.S. Pavelyev, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, S.N. Khonina, Ya.O. Shuyupova; ed. V.A. Soifer - Moscow, "Phyematlit" Publisher, 2011. – 680 p. – (In Russian).
7. **Khonina, S.N.** Simple way for effective formation of different non-diffractive laser beams // *Computer Optics*. – 2009. – V. 33, No. 1. – P. 70-78. – (In Russian).
8. **Qiong-Ge, S.** Generalization and propagation of spiraling Bessel beams with a helical axicon / S. Qiong-Ge, Z. Ke-Ya, F. Guang-Yu, L. Zheng-Jun and L. Shu-Tian // *Chinese Physics B*. – 2012. – V. 21, Issue 1. – P. 014208 (10p).
9. **Kotlyar, V.V.** Rotation of Gauss-Laguerre multimodal light beams in free space / V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, S.N. Khonina // *Technical Physics Letters*. – 1997. – V. 23, Issue 9. – P. 657-658.
10. **Paakkonen, P.** Rotating optical fields: experimental demonstration with diffractive optics / P. Paakkonen, J. Lautanen, M. Honkanen, M. Kuittinen, J. Turunen, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, A.T. Friberg // *Journal of Modern Optics*. – 1998. – V. 45, Issue 11. – P. 2355-2369.
11. **Khonina, S.N.** Generating a couple of rotating nondiffracting beams using a binary-phase DOE / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lautanen, M. Honkanen, J. Turunen // *Optik*. – 1999. – V. 110, Issue 3. – P. 137-144.
12. **Kotlyar, V.V.** Rotation of laser beams with zero of the orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov and V.A. Soifer // *Optics Communications*. – 2007. – V. 274. – P. 8-14.
13. **Singh, B.K.** Conical light sword optical beam and its healing property / Brijesh Kumar Singh, Dalip Singh Mehta, Paramasivam Senthilkumara // *Optics Letters*. – 2014. – V. 39, Issue 7. – P. 2064-2067.
14. **Beresna, M.** Twisting light with micro-spheres produced by ultrashort light pulses / Martynas Beresna, Mindaugas Gecevicius, Nadezhda M. Bulgakova, and Peter G. Kazansky // *Optics Express*. – 2011. – V. 19, Issue 20. – P. 18989.

15. **Bock, M.** Few-cycle high-contrast vortex pulses / Martin Bock, Jurgen Jahns, Ruediger Grunwald // *Optics Letters*. – 2012. – V. 37, Issue 18. – P. 3804-3806.
16. **Khonina, S.N.** Experimental demonstration of generation of longitudinal component of the electric field on the optical axis by high-aperture binary axicon for linear and circular polarization of the incident beam / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, D.A. Savelyev // *Computer Optics*. – 2013. – V. 37(1). – P. 76-87.
17. **Khonina, S.N.** Narrowing of a light spot at diffraction of linearly-polarized beam on binary asymmetric axicons / S.N. Khonina, D.V. Nesterenko, A.A. Morozov, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2012. – V. 21(1). – P. 17-26.
18. **Khonina, S.N.** Calculation of diffraction of the linearly-polarized limited beam with uniform intensity on high-aperture binary micro-axicons in a near zone / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.G. Volotovskiy, A.A. Kovalev // *Computer Optics*. – 2010. – V. 34(4). – P. 443-460. – (In Russian).
19. **Stafeev, S.S.** Special aspects of subwavelength focal spot measurement using near-field optical microscope / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar // *Computer Optics*. – 2013. – V. 37(3). – P. 332-340.
20. **Jia, B.** Direct observation of a pure focused evanescent field of a high numerical aperture objective lens by scanning near-field optical microscopy / B. Jia, X. Gan and M. Gu // *Applied Physics Letters* – 2005. – V. 86. – P. 131110.

FORMATION OF SPIRAL INTENSITY BY BINARY VORTICAL AXICON

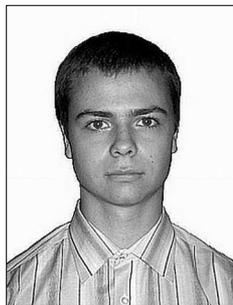
S. A. Degtyarev, S. N. Khonina, V. V. Podlipnov
*Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
 Samara State Aerospace University*

Abstract

We fabricated a spiral field-intensity distribution in a near-field when a laser beam was focused by a binary phase spiral axicon. It is shown by means of 3D-simulation in Comsol and life experiments with the near-field microscope NT-MDT Integra Spectra. Derived experimental measurements have been verified by the numerical simulations.

Key words: focusing, photon spiral, binary phase spiral axicon, finite element method, Comsol software, near-field microscope NT-MDT Integra Spectra.

Сведения об авторах



Дегтярев Сергей Александрович, аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)», стажёр-исследователь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная и сингулярная оптика.

E-mail: sealek@gmail.com.

Sergei Alexandrovich Degtyarev, post-graduate student, trainee-researcher of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Research interests: diffractive and singular optics.

Сведения об авторе **Хонина Светлана Николаевна** см. стр. 180 этого номера.



Подлипов Владимир Владимирович, инженер федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)», инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности.

E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Vladimir Vladimirovich Podlipnov engineer of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS). Research interests: structure-parametrical optimization of etching processes in microelectronics, diffractive optics, processing and control surfaces.

Поступила в редакцию 31 марта 2014 г.