

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ БЕДИФРАКЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ НА ОСНОВЕ ДИАФРАГМИРОВАНИЯ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦЕВОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА

© 2009 С.Н. Хонина¹, Р.В. Скиданов¹, А.А. Морозов²

¹ Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

² Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступили в редакцию 08.05.2009

Экспериментально реализован энергетически эффективный способ формирования различных бездифракционных лазерных пучков, основанный на диафрагмировании вихревого кольцевого пространственного спектра, созданного фазовым дифракционным оптическим элементом или пространственным модулятором света. Рассмотрены эксперименты по формированию таких пучков.

Ключевые слова: бездифракционные лазерные пучки, решения уравнения Гельмгольца, пространственный спектр, спиральная фазовая пластинка, дифракционный аксикон.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на множество работ, посвященных формированию бездифракционных пучков, эта тема остается актуальной в виду большого количества и разнообразия практических приложений таких пучков. Привлекательность использования бездифракционных пучков в различных задачах определяется их особыми свойствами: сохранение амплитудного-фазового распределения при распространении; концентрация энергии в центральной части; быстрое восстановление пучка после прохождения им препятствия, соизмеримого со световым пятном максимальной энергии.

Хотя бездифракционные пучки имеют бесконечную протяженность и энергию и при физической реализации возможно формирование только пространственно ограниченной аппроксимации, такой ограниченно-бездифракционный пучок очень близок к идеальному и обладает всеми перечисленными выше свойствами на некотором отрезке распространения, размер которого пропорционален размеру ограничивающей апертуры.

Самыми известными среди бездифракционных пучков являются моды Бесселя – решение уравнения Гельмгольца в цилиндрических координатах [1, 2]. Также более недавно в оптическом сообществе были рассмотрены пучки Матье для эллиптической системы координат [3] и па-

раболические – в параболической системе координат [4]. Так как все эти решения физически реализуемы только в “локализованном” варианте, т.е. ограниченные апертурой или гауссовым распределением (последний вариант очень удобен как для аналитических выкладок, так и для реализации), то были введены обобщающие пучки Гельмгольца-Гаусса [5, 6].

Повышенный интерес к разработке новых по сравнению с бесселевым решений волнового уравнения связан с огромным успехом бездифракционных пучков в различных приложениях.

Значительное увеличение расстояния компактной концентрации пучка (увеличение глубины, протяженности фокуса) у Бесселевых пучков по сравнению с Гауссовыми используется:

- при выравнивании и измерении прямолинейности на очень больших расстояниях [7], при этом бездифракционные пучки демонстрируют гораздо меньшую чувствительность к атмосферной турбулентности, чем другие типы пучков [8];

- при формировании изображений протяженных или движущихся объектов, что особенно актуально в медицине [9-11], а также для неразрушающего исследования материалов [12] и устройств [13]. Возможно измерение скорости движущегося предмета на основе эффекта Доплера: т.к. пучок инвариантно протяженный, то измерения параметров движущегося предмета не будут меняться из-за изменения распределения ультразвукового пучка [14];

- в метрологии для сканирующих [15] и интерференционных [16, 17] оптических систем;

- при формировании потока гамма-лучей, который зависит от расстояния взаимодействия фотонного и электронного пучков [18];

Сочетание первого и третьего свойств было успешно использовано для одновременного зах-

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

E-mail: khonina@smr.ru.

Скиданов Роман Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: romans@smr.ru.

Морозов Андрей Андреевич, лаборант.

вата и манипулирования несколькими микро-объектами, разделенными небольшим расстоянием вдоль оси распространения пучка [19, 20]. Также бездифракционные пучки перспективны для создания оптического потенциала при направлении движения атомов [21, 22] и различных операций в биофотонике [23, 24].

Формирование бездифракционных пучков исторически часто начиналось со спектра, который, как правило, имеет очень компактный вид: т.к. бездифракционные пучки имеют бесконечную поперечную протяженность, то их спектр стремится к дельта-функции. Примерами могут служить плоские и бесселевы моды: именно с помощью кольцевой щели в спектральной плоскости был физически реализован в схеме Durnin'a бесселевый пучок нулевого порядка [25].

Такая схема является малоэффективной, т.к. через узкую кольцевую щель в экране проходит лишь незначительная часть энергии падающего пучка. Формирование бесселевых пучков с помощью аксиконов [26] или дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [27, 28] энергетически значительно выгоднее. Известны также схемы генерации бесселевых пучков с помощью интерферометров [29] и резонаторов [30], но такие установки более сложны в исполнении.

ДОЭ по сравнению с рефракционными оптическими элементами больше подвержены хроматическим aberrациям, но имеют принципиальное преимущество при формировании монохроматических полей любой сложности. Кроме аксикона, для генерации пучков с углубленным фокусом рассматривались еще логарифмические аксиконы [31] и аксилинзы [32], но их изготовление сопровождается проблемами, возникающими при производстве любых нестандартных элементов рефракционной оптики.

Изготовление ДОЭ, имеющих даже самый замысловатый микрорельеф, в настоящее время существенно упростилось (особенно если этот рельеф бинарный), однако для формирования каждого отдельного типа бездифракционного пучка нужен отдельный элемент. Кроме того, производство многоградационных ДОЭ все еще несовершенно. Поэтому часто для синтеза рассчитанного на компьютере микрорельефа используют пространственные модуляторы света (ПМС). Известны работы, в которых различные типы ограниченно-бездифракционных пучков формировались с помощью модуляторов света [33, 34].

В статье [35] был предложен простой способ энергетически эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков с помощью частичного диафрагмирования кольцевого пространственного спектра, полученного от одного фазового ДОЭ или ПМС.

В данной работе представлены результаты экспериментальной апробации предложенной оптической схемы.

1. ЭФФЕКТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОГО СПЕКТРА

В статье [35] был предложен простой способ эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков. Предложенная схема существенно отличается от схемы, предложенной Durnin'ом для формирования бесселевого пучка нулевого порядка [1], которая предполагала использование узкой кольцевой щели в непрозрачном экране и не имела азимутальной зависимости:

$$F(k_r) = \begin{cases} A, & |k_r - k_c| < \sigma \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (1)$$

где k_r - радиальная координата в области пространственного спектра, k_c и σ - радиус и ширина кольцевой апертуры. Такой способ является энергетически затратным, так как большая часть освещающего излучения задерживается непрозрачным экраном. Кроме того, чтобы произвести бесселевый пучок высшего порядка в работе [36] аксикон освещался пучком Лагерра-Гаусса, имеющим винтовую фазовую составляющую. С использованием кольцевой щели формировались и другие типы бездифракционных пучков [37].

В данной работе формировалось вихревое кольцевое распределение (σ - ширина кольца):

$$F(k_r, \theta) = \sigma(k_r - k_c) \exp(im\theta), \quad (2)$$

с помощью фазового ДОЭ, представляющего собой энергетически эффективный винтовой дифракционный аксикон или спиральную фазовую пластинку (СФП), как показано на рис. 1.

Пространственный спектр таких элементов концентрируется в кольцевой области: для дифракционных аксиконов достаточно узкой, для СФП – более широкой [38, 39].

При небольшой ширине спектрального кольца σ формируемое поле можно считать бездифракционным на ограниченном отрезке:

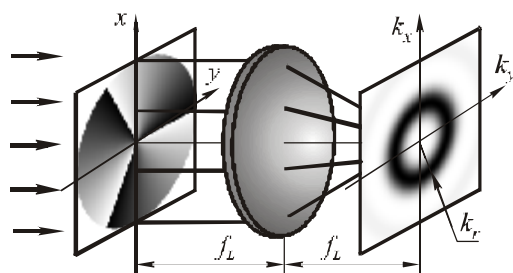


Рис. 1. Эффективное формирование кольцевого распределения с помощью ДОЭ

$$z < \varepsilon \frac{k}{k_c \sigma}, \quad (3)$$

где $\varepsilon \ll 2\pi$, а $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число. То есть, ограниченный пучок будет тем дальше сохранять бездифракционные свойства, чем тоньше спектральное кольцо и меньше его радиус.

На рис. 2 показано соответствие кольцевых спектров различным порядкам СФП $\exp(im\varphi)$, где φ - полярный угол, m – целое число. Видно, что с увеличением порядка оптического вихря увеличивается радиус кольца [39]:

$$k_c^m \approx \gamma_{m-1,1} f_L / R, \quad (4)$$

где $\gamma_{m-1,1}$ - первый корень функции Бесселя ($m-1$)-го порядка: $J_{m-1}(\gamma_{m-1,1}) = 0$, но при этом толщина кольца остается неизменной (при одинаковом радиусе ограничивающей апертуры R и фокусном расстоянии f_L), т.е. при использовании СФП высоких порядков в соответствии с выражением (3) будут формироваться поля обладающие бездифракционными свойствами на меньшем отрезке оптической оси. Также на рис. 2 видно, что при увеличении номера винтовой сингулярности m кроме основного центрального кольца появляются дополнительные периферийные кольца.

Более узкое спектральное кольцо можно сформировать с помощью дифракционного аксикона $\exp(i\alpha r / R + im\varphi)$, где α - параметр аксикона, R - радиус дифракционного элемента. На рис. 3 показано соответствие кольцевых спектров различным порядкам винтовой составляющей. Как следует из [38] для одинаковых значе-

ниях α , R и фокуса линзы f_L радиус спектрального кольца не должен меняться:

$$k_c \approx \alpha R f_L, \quad (19)$$

но из рис. 3 видно, что при увеличении порядка оптического вихря появляются дополнительные периферийные кольца и основное кольцо уширяется. Таким образом, в этом случае также увеличение порядка винтовой составляющей будет негативно сказываться на сохранении бездифракционных свойств формируемых пучков, хотя в меньшей степени, чем для СФП.

3. ДИАФРГАМИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОГО СПЕКТРА С ЦЕЛЬЮ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОГРАНИЧЕННЫХ БЕЗДИФРАКЦИОННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Если имеется кольцевая амплитудная структура с вихревой составляющей вида (2) то простым ее диафрагмированием можно формировать различные бездифракционные распределения.

Эффективно сформировав с помощью фазового ДОЭ (или несколько более энергетически затратно с помощью ПМС) кольцевую структуру (в случае СФП присутствует вихревая фаза соответствующего порядка $m \neq 0$) и, выполняя над ним различного типа диафрагмирование, можно с помощью второй сферической линзы производить различные квази-бездифракционные пучки. Для экспериментального формирования таких пучков была использована оптиче-

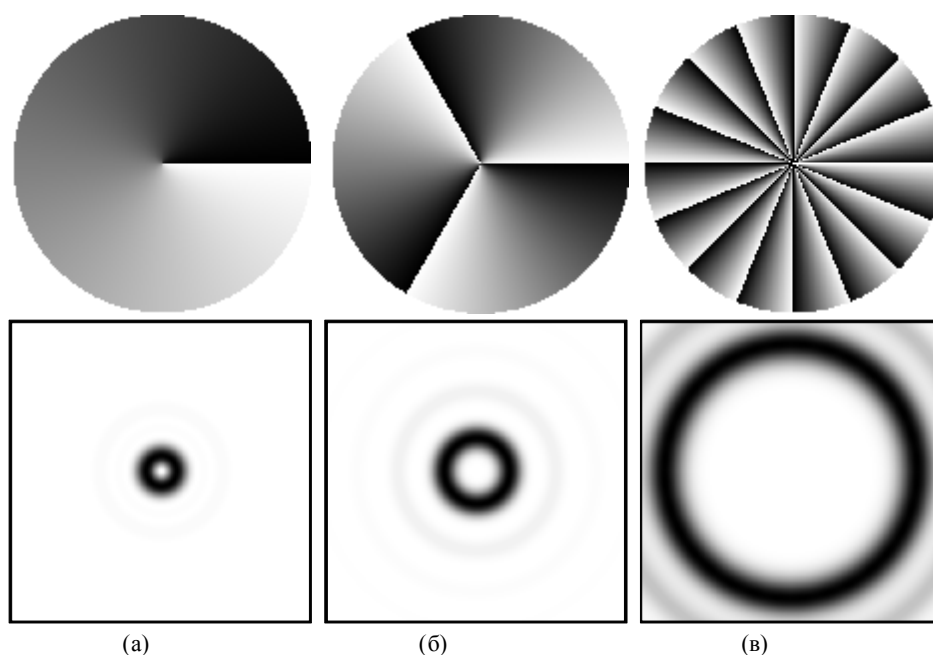


Рис. 2. Соответствие кольцевых спектров различным порядкам СФП $\exp(im\varphi)$: $m=1$ (а), $m=-3$ (б), $m=16$ (в): в верхней строке показаны фазы СФП, в нижней – соответствующие пространственные спектры.

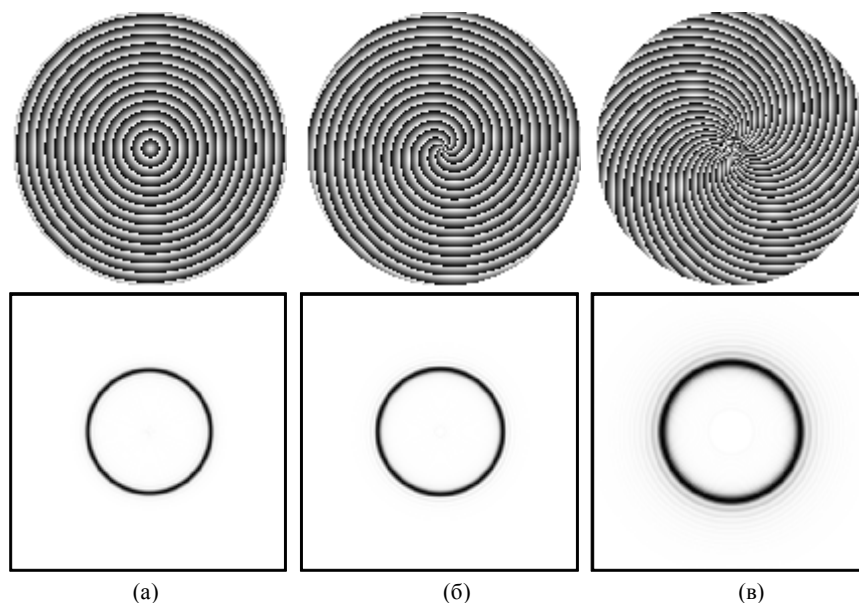


Рис. 3. Соответствие кольцевых спектров различным порядкам дифракционных аксиконов $\exp(i\alpha r / R + im\varphi)$: $m=0$ (а), $m=7$ (б), $m=31$ (в). В верх

кая схема, представленная на рис. 4.

В этой схеме используется твердотельный лазер с длиной волны 532 нм L , затем пучок фокусируется микробиоъективом L_1 на точечную диафрагму D_1 , затем линза L_2 формирует параллельный пучок. Затем дифракционный оптический элемент DOE, который формирует вихревой световой пучок. Линза L_3 фокусирует сформированный световой пучок в область диафрагмы D_2 . Линза L_4 окончательно формирует бездифракционный пучок, который регистрируется CCD камерой.

Такая схема энергетически значительно выгоднее, чем кольцевое диафрагмирование освещающе-

го равномерного или гауссового пучка. В качестве ДОЭ было использовано несколько элементов, формирующих различные вихревые пучки.

На рис. 5 приведен вид используемых в эксперименте диафрагм.

Кроме диафрагм приведенных на рис. 5 спектр вихревого пучка отсекался наполовину обычной плоской пластиной.

В первом эксперименте был использован дифракционный аксикон 5-го порядка [40]. После установки диафрагм представленных на рис.5 были получены устойчивые распределения интенсивности, которые сохранялись на протяжении достаточно длинного отрезка распространения (рис.6).

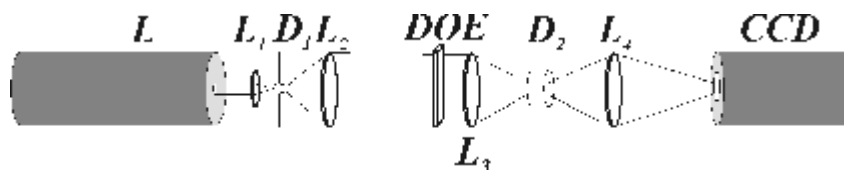


Рис. 4. Экспериментальная оптическая схема для формирования различных бездифракционных пучков

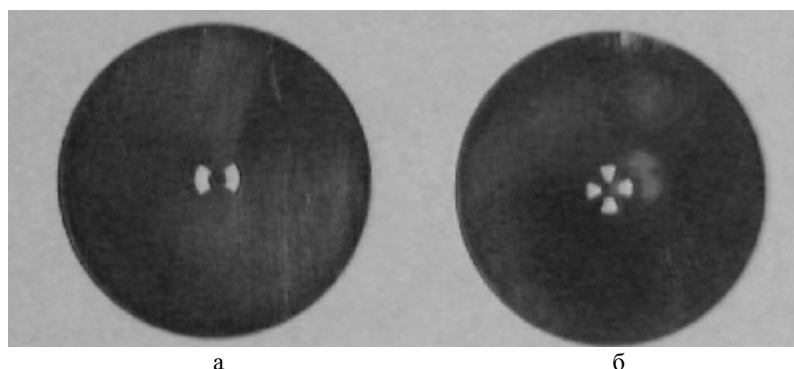


Рис. 5. Диафрагмы использованные в экспериментах.

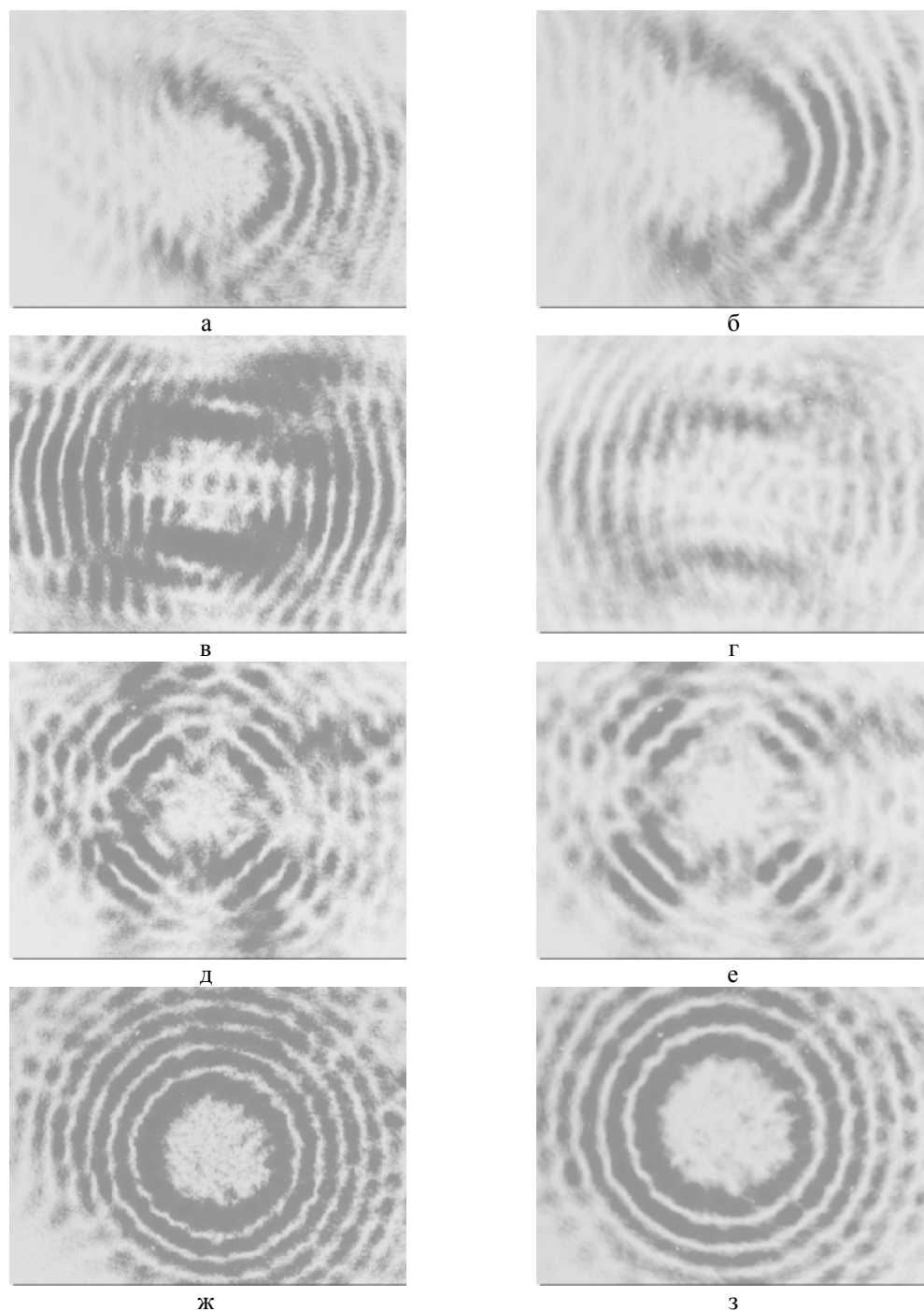


Рис. 6. Распределения интенсивности после диафрагмирования спектра, созданного дифракционным аксиконом 5-го порядка, на расстояниях 500мм и 580мм: (а, б) обрезается половина спектра; (в, г) используется диафрагма, представленная на рис. 5а; (д, е) используется диафрагма, представленная на рис. 5б; (ж, з) пучок без диафрагмирования спектра на тех же расстояниях.

Как видно из рис. 6, сформированные пучки сохраняют распределение интенсивности на достаточно большом отрезке, с точностью до масштаба. Учитывая, что исходный пучок Бесселя также масштабируется это не стоит принимать во внимание (этот эффект вызван использованием линзы при формировании пучков).

К сожалению, чем меньше порядок винтовой сингулярности и меньше радиус спектрального

кольца, тем сложнее манипулировать с диафрагмированием, т.к. накладывает очень жесткие ограничения на оптическую схему. Более удобным для этой задачи был бы вихревой световой пучок большего порядка и кольца большего радиуса. При этом в соответствии с формулой (3) расстояние сохранения бездифракционных свойств пучка будет уменьшаться, но этот негативный момент можно компенсировать подбором линз L_3 и L_4 .

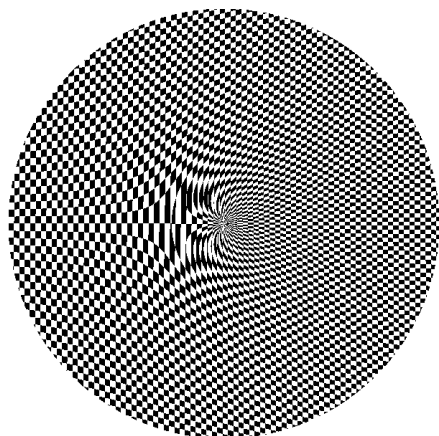


Рис. 7. ДОЭ, формирующий вихревые световые пучки 30-го и 31-го порядков

Далее в экспериментах был использован ДОЭ, формирующий вихревые световые пучки 30-го и 31-го порядков. Внешний вид данного элемента представлен на рис. 7.

Как видно из рис. 7 в центральной части этого ДОЭ присутствует область в которой рельеф приобретает стохастический характер и с ростом порядка формируемых пучков размер этой области будет расти. Так что дальнейшее увеличение порядка потребует лучшего разрешения при изготовлении. Для технологии, которая была использована при изготовлении 30, 31 порядки являются практически пределом возможностей.

Для диафрагмирования вихревого светового пучка были использованы диафрагмы, представленные на рис. 5. На рис. 8 представлены распре-

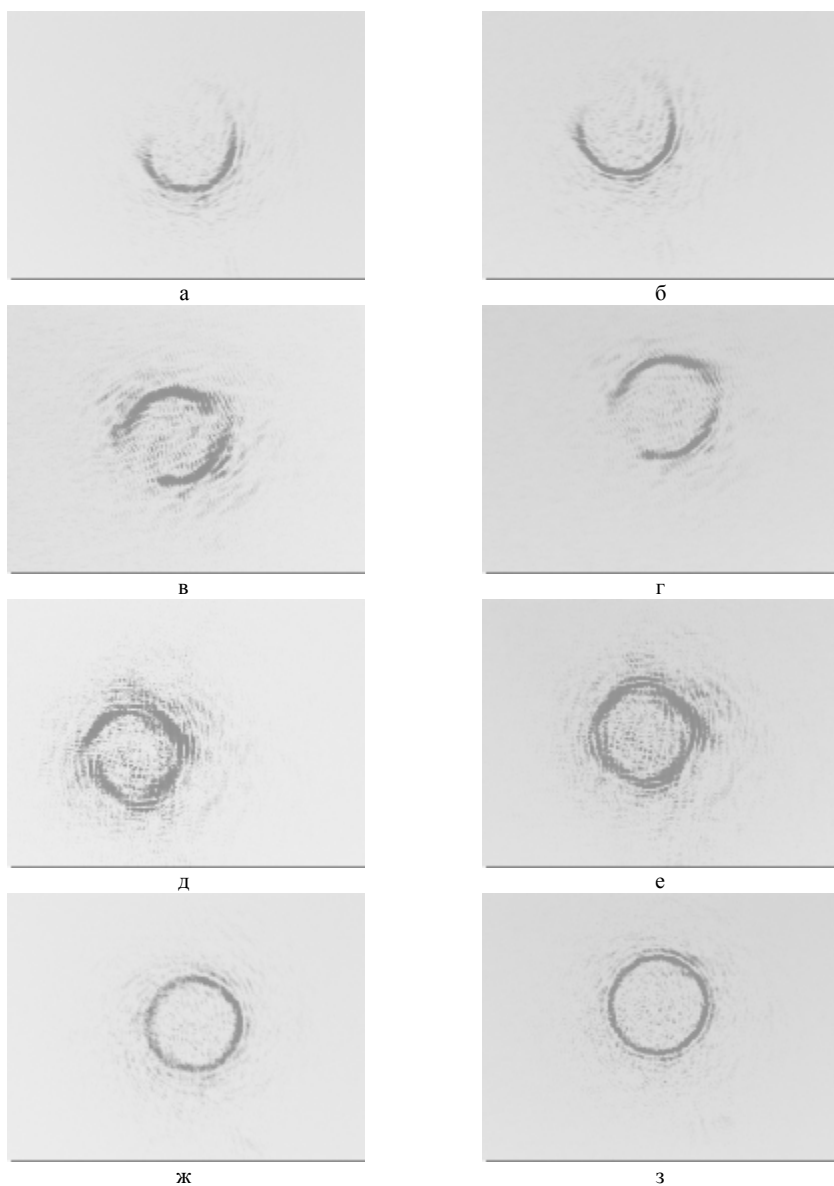


Рис. 8. Распределения интенсивности после диафрагмирования спектра вихревого пучка 30-го порядка на расстояниях 500мм и 580мм: (а, б) обрезается половина спектра; (в, г) используется диафрагма, представленная на рис. 5а; (д, е) используется диафрагма, представленная на рис. 5б; (ж, з) пучок без диафрагмирования спектра на тех же расстояниях

деления интенсивности, сформированные при диафрагмировании вихревого пучка 30-го порядка. Для формирования пучка была использована линза с фокусным расстоянием 400 мм. На рис. 8 ж,з распределение интенсивности в исходном пучке. CCD камера перемещалась вдоль оси пространства за фокальной плоскостью.

Как видно из рис. 8 распределение интенсивности сохраняется на довольно длинном отрезке, т.е. получены бездифракционные пучки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально реализован энергетически эффективный способ формирования различных бездифракционных лазерных пучков, имеющих кольцевой пространственный спектр. Эффективность способа состоит в концентрации основной части спектральной энергии в кольце за счет использования таких фазовых дифракционных оптических элементов как спиральная фазовая пластинка или винтовой дифракционный аксикон. Для формирования таких пучков были использованы дифракционный аксикон 5-го порядка и бинарный ДОЭ, формирующий простые вихревые пучки 30-го и 31-го порядков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы “Фундаментальные исследования и высшее образование” (грант CRDF PG08-014-1), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9) и гранта РФФИ 08-07-99007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *J. Durnin, J. J. Miceli, and J. H. Eberly*, Diffraction-free beams, *Phys. Rev. Lett.* V. 58, n. 15, 1499-1501 (1987)
2. *R. W. Ziolkowski, I. M. Besieris, and A. M. Shaarawi*, Aperture realizations of exact solutions to homogeneous-wave equations, *J. Opt. Soc. Am. A* v.10, n.1, 75-87 (1993)
3. *J. C. Gutierrez-Vega, M. D. Iturbe-Castillo, and S. Chavez-Cerda*, Alternative formulation for invariant optical fields: Mathieu beams, *Opt. Lett.* V.25, n.20, 1493-1495 (2000)
4. *M.A. Bandres, J.C. Gutierrez-Vega, and S. Chavez-Cerda*, Parabolic nondiffracting optical wave fields, *Opt. Lett.* 29(1), 44-46 (2004)
5. *J.C. Gutierrez-Vega and M.A. Bandres*, Helmholtz-Gauss waves, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 22, No. 2, 289-298 (2005)
6. *C. Luyez-Mariscal, M. A. Bandres, J. C. Gutierrez-Vega*, Observation of the experimental propagation properties of Helmholtz-Gauss beams, *Optical Engineering* 45(6), 068001-1 - 068001-8 (2006)
7. *K. Wang, L. Zeng, and Ch. Yin*, Influence of the incident wave-front on intensity distribution of the nondiffracting beam used in large-scale measurement, *Opt. Commun.* 216, 99-103 (2003).
8. *T. Aruga, S.W. Li, S. Yoshidako, M. Takabe, and R.M. Li*, Nondiffracting narrow light beam with small atmospheric turbulence-influenced propagation, *Appl. Opt.* 38(15) 3152-3156 (1999).
9. *Jian-yu Lu and J. F. Greenleaf*, Diffraction-limited beams and their applications for ultrasonic imaging and tissue characterization, *Proc. SPIE*, vol. 1733, pp. 92-119 (1992).
10. *R.A. Leitgeb, M. Villiger, A.H. Bachmann, L. Steinmann, and T. Lasser*, Extended focus depth for Fourier domain optical coherence microscopy, *Opt. Lett.*, Vol. 31, No. 16, 2450-2452 (2006).
11. *Kye-Sung Lee and Jannick P. Rolland*, Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range, *Opt. Lett.*, Vol. 33, No. 15, 1696-1698 (2008).
12. *Jian-yu Lu, J. F. Greenleaf*, “Producing deep depth of field and depth-independent resolution in NDE with limited diffraction beams,” *Ultrason. Imag.*, vol. 15, no. 2, pp. 134-149 (1993).
13. *José J. Lunazzi, Daniel S. F. Magalhães*, Photographing by means of a diffractive axicon, *XXIX ENFMC - Annals of Optics*, pp. 1-4 (2006).
14. *Jian-Yu Lu, Xiao-Liang Xu, Hehong Zou, and James F. Greenleaf*, Application of Bessel Beam for Doppler Velocity Estimation, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 42, no. 4, 649-662 (1995)
15. *R. Arimoto, C. Saloma, T. Tanaka, and S. Kawata*, Imaging properties of axicon in a scanning optical system, *Appl. Opt.* 31 (31) 6653-6657 (1992).
16. *Mathieu Fortin, Michel Pichü and Ermanno F. Borra*, Optical tests with Bessel beam interferometry, *Optics Express* Vol. 12, No. 24, 5887-5895 (2004)
17. *Stephan Reichelt, Hans Tiziani, and Hans Zappe*, Self-calibration of wavefront testing interferometers by use of diffractive elements, *Proc. of SPIE*, vol. 6292, pp. 629205.1-629205.10 (2006)
18. *Dazhi Li, Kazuo Imasaki, Masanori Aoki, Shuji Miyamoto, Sho Amano and Takayasu Mochizuki*, Application of Nondiffracting Laser Beam to Laser Compton Scattering, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 40, No. 8, p. 579-582 (2003).
19. *V. Garcés-Chavez, D. McGloin, H. Melville, W. Sibbett, and K. Dholakia*, Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam, *Nature*, v. 419, 145-147 (2002)
20. *Martin Hegner*, The light fantastic, *Nature*, v. 419, 125-126 (2002)
21. *J. Arlt, T. Hitomi, and K. Dholakia*, Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams. *Appl. Phys. B* v. 71, 549-554 (2000)
22. *Jochen Arlt and Kishan Dholakia, Josh Soneson and Ewan M. Wright*, Optical dipole traps and atomic waveguides based on Bessel light beams, *Physical Review A*, v 63, 063602-(1-8) (2001)
23. *X. Tsampoula, V. Garcés-Chávez, M. Comrie, D. J. Stevenson, B. Agate, C. T. A. Brown, F. Gunn-Moore, and K. Dholakia*, Femtosecond cellular transfection using a nondiffracting light beam, *Applied Physics Letters*, v. 91, 053902-(1-3) (2007)
24. *T. Cizmar, V. Kollarov, X. Tsampoula, F. Gunn-Moore, W. Sibbett, Z. Bouchal, and K. Dholakia*, Generation of multiple Bessel beams for a biophotonics workstation, *Optics Express*, Vol. 16, No. 18, 14024-14035 (2008)
25. *J. Durnin*, Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory, *J. Opt. Soc. Am. A*, v. 4, n.4, 651-654 (1987)
26. *J. H. McLeod*, The axicon: a new type of optical element, *J. Opt. Soc. Am.* 44, 592-597 (1954)

27. A. Vasara, J. Turunen, and A. T. Friberg, "Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms," *J. Opt. Soc. Am. A* 6, 1748-1754 (1989);
28. S.N. Khonina, V. V. Kotlyar, M. V. Shinkaryev, V. A. Soifer, and G. V. Uspleniev, The phase rotor filter, *J. Mod. Opt.* 39, 1147-1154 (1992).
29. Carlos Lopez-Mariscal, Julio C. Gutierrez-Vega, and Sabino Chavez-Cerda, Production of high-order Bessel beams with a Mach-Zehnder interferometer, *Applied Optics*, Vol. 43, No. 26, 5060-5063 (2004)
30. Raúl I. Hernández-Aranda, Sabino Chávez-Cerda, Julio C. Gutiérrez-Vega, Theory of the unstable Bessel resonator, *J. Opt. Soc. Am. A* Vol. 22, No. 9, 1909-1917 (2005)
31. Jacek Sochacki and Zbigniew Jaroszewicz, Leszek Rafal Staroiski, Andrzej Kolodziejczyk, Annular-aperture logarithmic axicon, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 10, No. 8, 1765-1768 (1993)
32. Bi-Zhen Dong, Juan Liu, Ben-Yuan Gu, Guo-Zhen Yang, Jian Wang, Rigorous electromagnetic analysis of a microcylindrical axilens with long focal depth and high transverse resolution, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 18, No. 7, 1465-1470 (2001)
33. Narupon Chattrapiban, Elizabeth A. Rogers, David Cofield, Wendell T. Hill, III, Rajarshi Roy, Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator, *Optics Letters*, Vol. 28, No. 22, 2183-2185 (2003)
34. Jeffrey A. Davis, Mark J. Mitry, Miguel A. Bandres, and Don M. Cottrell, Observation of accelerating parabolic beams, *Optics Express*, Vol. 16, No. 17, 12866-12871 (2008)
35. Хонина С.Н. Простой способ эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков, *Компьютерная оптика*, 33(1), 70-78 (2009)
36. J. Arlt, K. Dholakia, Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon, *Optics Communications*, v. 177, 297-301 (2000).
37. Carlos Lopez-Mariscal, Miguel A. Bandres, and Julio C. Gutierrez-Vega, Observation of parabolic nondiffracting optical fields, *Optics Express*, Vol. 13, No. 7, 2364-2369 (2005)
38. Victor V. Kotlyar, Alexey A. Kovalev, Svetlana N. Khonina, Roman V. Skidanov, Victor A. Soifer, Henna Elfstrom, Noora Tossavainen, and Jari Turunen, Diffraction of conic and Gaussian beams by a spiral phase plate, *Applied Optics*, Vol. 45, No. 12, 2656-2665 (2006)
39. V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A. A. Kovalev, and V. A. Soifer, H. Elfstrom and J. Turunen, Diffraction of a plane, finite-radius wave by a spiral phase plate, *Optics Letters*, Vol. 31, No. 11, 1597-1599 (2006)
40. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Skidanov R.V., Soifer V.A., Jefimovs K., Simonen J., Turunen J., Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements, *Journal of Modern optics*, 51(14), 2167-2184 (2004)

EXPERIMENTAL GENERATION VARIOUS NONDIFFRACTIVE LASER BEAMS BY MASKING THE VORTICAL RING SPATIAL SPECTRUM

© 2009 S.N. Khonina¹, R.V. Skidanov¹, A.A. Morozov²

¹ Image Processing Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Samara

² Samara State Aerospace University

Energetically effective way for generation various nondiffractive laser beams, based on masking the vortical ring spatial spectrum created by a phase diffractive optical element or a spatial light modulator is experimentally realized. Experiments on generation of such beams are considered.

Keywords: nondiffractive laser beams, solutions of Helmgolz equation, spatial spectrum, spiral phase plate, diffractive axicon.

Svetlana Khonina, Doctor of Physics and Mathematics, Leading Research Fellow. E-mail: khonina@smr.ru.
Roman Skidanov, Doctor of Physics and Mathematics, Senior Fellow. E-mail: romans@smr.ru.
Andrey Morozov, laboratory assistant.