

ПРОСТОЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЫХ НЕДИФРАГИРУЮЩИХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ В ВИДЕ КОНТУРА ПРАВИЛЬНОГО МНОГОУГОЛЬНИКА

Порфирьев А.П., Скиданов Р.В.

Институт систем обработки изображений РАН,

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

Аннотация

В работе предложен метод формирования полых световых пучков, распределение интенсивности которых в поперечном сечении имеет форму простейших геометрических фигур. В основе метода лежит использование интерференции двух соосных пучков Бесселя. Данные пучки обладают бездифракционными свойствами и могут быть использованы в качестве световых ловушек для контролируемого манипулирования несферическими микрообъектами.

Ключевые слова: бездифракционные световые пучки, пучки Бесселя, интерференция пучков Бесселя, полые световые пучки, дислокации волнового фронта.

Введение

В настоящее время полые световые пучки нашли широкое применение в области оптического манипулирования как в жидкости [1, 2], так и в воздухе [3, 4]. Использование полых вихревых пучков позволило реализовать «giant optical manipulation» [5] и осуществлять контролируемое перемещение захваченных частиц на расстояния до 1 метра. Принцип действия такого манипулятора основывается на том, что полый характер вихревого пучка позволяет захватить микрообъект в области минимума интенсивности на оси пучка, в то время как осевая компонента тепловой фотофоретической силы толкает частицу вдоль оси [6, 7]. Авторы использовали вихревой пучок с топологическим зарядом $l=1$, сформированный лазером ($\lambda=532$ нм) с помощью амплитудной голограммы в форме «вилки». К сожалению, при манипулировании несферическими объектами с помощью таких пучков, имеющих в поперечном сечении кольцеобразную форму, возникает множество трудностей с контролируемым манипулированием, в частности, может происходить их вращение [8]. Также, если говорить о манипуляции непрозрачными несферическими объектами, возникает опасность их разрушения за счёт слишком большой доли поглощаемой энергии. Решением этих проблем является согласование формы границ полого пучка с формой микрообъекта.

В данной работе мы предлагаем метод формирования полых световых пучков, распределение интенсивности которых в поперечном сечении имеет форму простейших геометрических фигур, что должно позволить осуществлять контролируемое перемещение объектов несферической формы без вращения и с минимизацией риска теплового разрушения. В основе метода лежит варьирование параметров интерферирующих соосных пучков Бесселя. К настоящему времени свойства пучков Бесселя и их суперпозиций хорошо исследованы [9–11], благодаря чему они нашли широкое применение в области оптического манипулирования [12, 13]. В работе [14] был предложен итеративный алгоритм расчёта функции пропускания элементов для формирования бездифракционных лазерных пучков, основанный на использовании разложения эталонного

изображения по ограниченному набору функций Бесселя. При этом ошибка формирования зависит от числа функций в наборе. В [15] было показано, что использование суперпозиций небольшого числа (2–4) пучков Бесселя различных порядков позволяет сформировать сложные симметричные распределения интенсивности, которые могут быть использованы для захвата микрообъектов сложной формы. К сожалению, из-за геометрии рассчитанных элементов такие световые распределения формируются в основном только в дальней зоне дифракции.

В настоящей работе рассматриваются элементы, формирующие суперпозицию двух соосных пучков Бесселя. При этом поперечный профиль формируемых недифрагирующих световых полей определяется как разностью порядков пучков, так и их относительными амплитудами.

1. Интерференция двух соосных пучков Бесселя

Идеальный пучок Бесселя n -го порядка описывается следующей комплексной амплитудой:

$$E(r, \phi, z) = A_0 \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \exp(in\phi), \quad (1)$$

где J_n – функция Бесселя n -го порядка, k_z и k_r – продольная и радиальная компоненты волнового вектора, $k = \sqrt{k_z^2 + k_r^2} = 2\pi/\lambda$, (r, ϕ, z) – цилиндрические координаты.

Рассмотрим интерференцию двух соосных пучков Бесселя с одинаковыми радиальными компонентами волнового вектора k_r при $z=0$. Пусть данные пучки будут разных порядков n и m соответственно. Тогда можно записать, что

$$E(r, \phi, z) = A_{0n} \exp(ik_z z) J_n(k_r r) \exp(in\phi) + A_{0m} \exp(ik_z z) J_m(k_r r) \exp(im\phi). \quad (2)$$

Для интенсивности такого составного пучка получим

$$\begin{aligned} I(r, \phi) &= \\ &= |A_{0n} J_n(k_r r) \exp(in\phi) + A_{0m} J_m(k_r r) \exp(im\phi)|^2 = \\ &= A_{0n}^2 J_n^2(k_r r) + A_{0m}^2 J_m^2(k_r r) + \\ &+ 2A_{0n} A_{0m} J_n(k_r r) J_m(k_r r) \cos[(n-m)\phi]. \end{aligned} \quad (3)$$

Первые два члена суммы описывают интенсивность каждого из пучков в отдельности, третий член позволяет осуществлять модуляцию формируемых распределений за счёт изменения разницы $(n - m)$.

Рассмотрим случаи интерференции пучков Бесселя различного порядка $(n > m)$. В этом случае, как видно из (3), формируемый профиль интенсивности определяется не только разностью порядков пучков, но и вещественными коэффициентами A_{0n} и A_{0m} , которые определяют весовой вклад амплитуды каждого из пучков в общее распределение.

Пусть коэффициенты A_{0n} и A_{0m} принимают различные значения. Будем считать, что коэффициенты нормированы на максимальное значение, тогда $A_{0n} = 1$, а $A_{0m} = \alpha$ ($0 \leq \alpha < 1$). При уменьшении значения α вклад соответствующего слагаемого в общее распределение интенсивности будет уменьшаться. При определённых значениях α , например при $\alpha = 0,2$, слагаемым при коэффициенте A_{0m}^2 в (3) можно пренебречь. Тогда суммарная интенсивность будет определяться только суммой

$$I(r, \phi) = A_{0n}^2 J_n^2(k_r r) + 2A_{0n} A_{0m} J_n(k_r r) J_m(k_r r) \cos[(n - m)\phi]. \quad (4)$$

Первое слагаемое описывает набор колец со спадающей интенсивностью (рис. 1). При изменении угла ϕ от 0 до 2π косинус поменяет свой знак $2(n - m)$ раз и, соответственно, будет иметь $2(n - m)$ точек экстремума. Это приводит к тому, что для диапазона углов от $\pi/2 + 2\pi p / (n - m)$ до $3\pi/2 + 2\pi p / (n - m)$ $p = 0, 1, \dots, (n - m - 1)$ будет происходить суммирование компонент, а для углов ϕ в диапазоне от $-\pi/2 + 2\pi p / (n - m)$ до $\pi/2 + 2\pi p / (n - m)$ – вычитание. В зависимости от знака произведения $J_n(k_r r) J_m(k_r r)$ это приведёт к усилению или ослаблению интенсивности светового поля, определяемого слагаемым $A_{0n}^2 J_n^2(k_r r)$ в соответствующих областях и к изменению кольцевого профиля пучка. Таким образом, будут происходить периодичные по углу ϕ модуляции кольцевого профиля пучка с периодом $2\pi / (n - m)$.

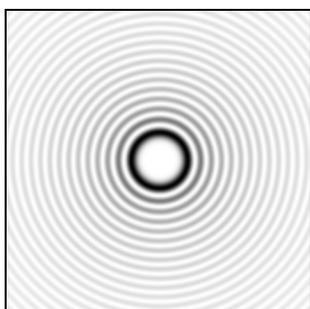


Рис. 1. Распределение интенсивности (негатив), определённое слагаемым $A_{0n}^2 J_n^2(k_r r)$ ($n \neq 0$)

Рассмотрим случай интерференции двух соосных пучков Бесселя со следующими параметрами: $n = 8$,

$m = 3$; $k_r = 51996 \text{ м}^{-1}$; $\alpha = 0,2$. В этом случае модуляция кольцевого распределения интенсивности, определяемого слагаемым $A_{0n}^2 J_n^2(k_r r)$ по углу ϕ , происходит с периодом $2\pi/5$. На рис. 2 представлено итоговое распределение интенсивности, вычисленное согласно (4). Как видно, в данном случае получается изображение не кольца, а правильного пятиугольника. Распределение фазы для данного случая представлено на рис. 2б. На данных изображениях чёрными точками отмечены также винтовые дислокации (ВД) волнового фронта, находящиеся в точках пересечения линий смены знака действительной и мнимой частей амплитуды поля, описываемой выражением (2). Таким образом, видно, что в данном случае образуется пять винтовых дислокаций, расположенных внутри контура пятиугольника. Наличие этих дислокаций и приводит к модулированию кольцевого профиля пучка. На рис. 3 представлены распределения, формируемые на различных расстояниях z . Видно, что при распространении поперечный профиль пучка сохраняется, происходит только поворот фазового распределения, что с учётом цикличности фазовой функции означает полное сохранение амплитудно-фазового распределения в пучке.

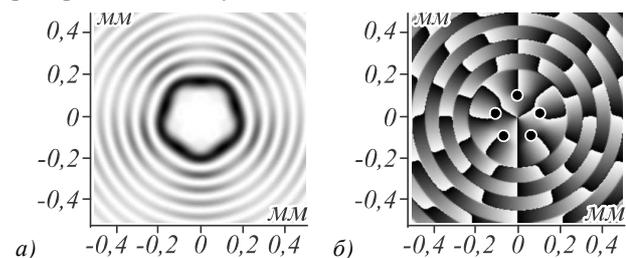


Рис. 2. Распределение интенсивности и фазы в световом пучке, сформированном суперпозицией пучков Бесселя 8-го и 3-го порядков: интенсивность (негатив) (а), фаза (б).

Чёрными точками на распределении фазы отмечены винтовые дислокации волнового фронта

При изменении значений n и m при сохранении разницы $(n - m)$ будет происходить увеличение поперечных размеров формируемых распределений. Так как разница $(n - m)$ сохраняется, то число ВД остаётся одним и тем же. При увеличении абсолютных значений n и m это приводит к тому, что расстояние между соседними ВД увеличивается. В результате модулированию подвергается всё меньшая часть кольцевой структуры пучка. Так, на рис. 4 представлено распределение светового поля, получающегося при следующих параметрах: $n = 15$; $m = 10$; $k_r = 51996 \text{ м}^{-1}$; $\alpha = 0,2$. Видно, что в данном случае появляются перепады интенсивности при движении по контуру, которые не удаётся устранить простым изменением значения α .

Изменяя разницу порядков $(n - m)$, можно добиться формирования световых пучков, поперечный профиль интенсивности которых будет иметь форму других правильных многоугольников. На рис. 5–6 представлены распределения световых полей для полых пучков в виде треугольника и восьмиугольника.

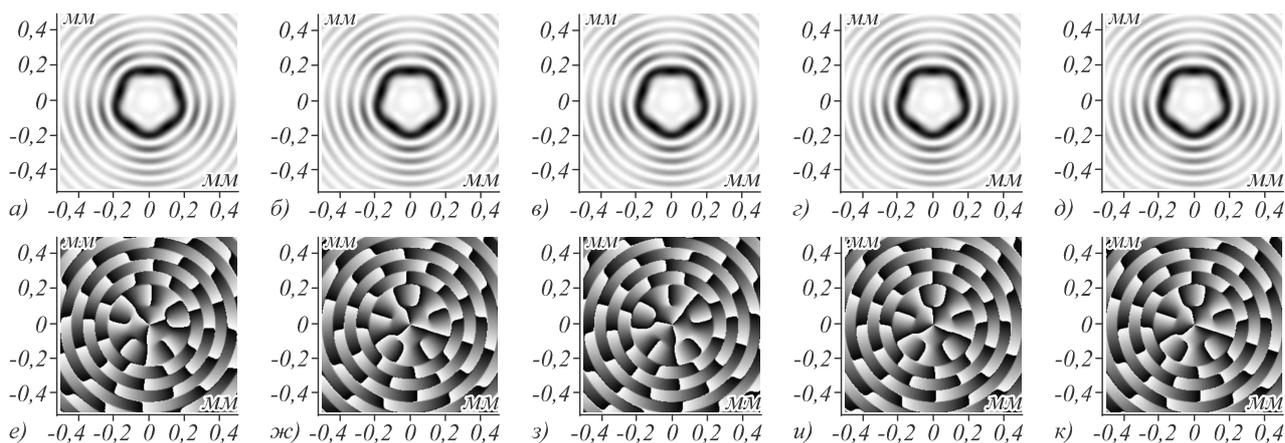


Рис. 3. Распределение интенсивности и фазы при распространении светового поля, сформированного суперпозицией пучков Бесселя 8-го и 3-го порядков: $z = 100$ мм (а), (е); (б), (ж) $z = 300$ мм (б), (ж); $z = 500$ мм (в), (з); $z = 700$ мм (г), (и); $z = 1000$ мм (д), (к). Первый ряд – интенсивность (негатив), второй ряд – фаза (б)

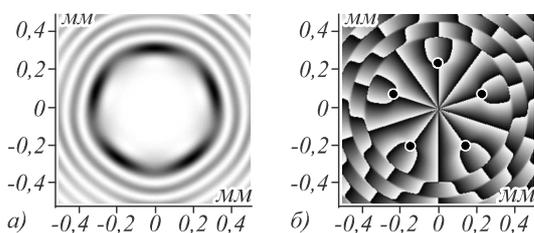


Рис. 4. Распределение интенсивности и фазы в световом пучке, сформированном суперпозицией пучков Бесселя 15-го и 10-го порядков: интенсивность (негатив) (а), фаза (б). Чёрными точками на распределении фазы отмечены винтовые дислокации волнового фронта

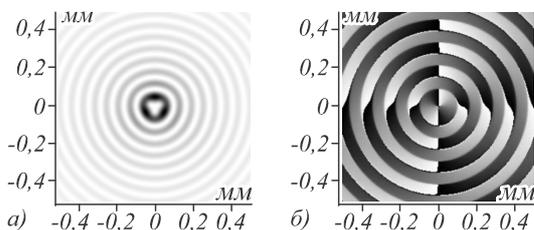


Рис. 5. Распределение интенсивности и фазы в световом пучке, сформированном суперпозицией пучков Бесселя 2-го и -1-го порядков: интенсивность (негатив) (а), фаза (б)

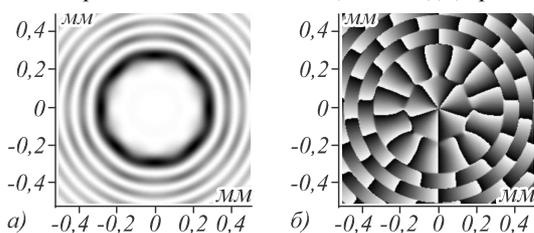


Рис. 6. Распределение интенсивности и фазы в световом пучке, сформированном суперпозицией пучков Бесселя 13-го и 5-го порядков: интенсивность (негатив) (а), фаза (б)

2. Расчёт элементов, формирующих суперпозиции пучков Бесселя

Для формирования светового пучка Бесселя может быть использован дифракционный оптический элемент (ДОЭ), фазовая функция пропускания которого имеет следующий вид [16]:

$$\tau(r, \phi) = \text{sgn}(J_n(k_r r)) \times \exp(in\phi). \quad (5)$$

Данный элемент формирует световое поле, амплитуда которого пропорциональна функции Бесселя $J_n(k_r r) \exp(in\phi)$. Для оценки расстояния, на котором формируемый одиночный пучок сохраняет свои бездифракционные свойства, можно воспользоваться следующим выражением:

$$z_{\max} = Rk_z/k_r. \quad (6)$$

В работах [17, 18] рассматривались дифракционные оптические элементы для формирования суперпозиций N пучков Бесселя с функцией пропускания вида:

$$\tau(r, \phi) = \sum_{p=1}^N C_p \text{sgn}(J_{n_p}(k_r r)) \times \exp(in_p \phi), \quad (7)$$

где C_p – комплексные коэффициенты.

Для расчёта комплексной функции пропускания элемента, формирующего суперпозицию двух соосных пучков Бесселя, мы воспользовались следующей формулой:

$$\tau(r, \phi) = C_1 \text{sgn}(J_n(k_r r)) \times \exp(in\phi) + C_2 \text{sgn}(J_m(k_r r)) \times \exp(im\phi). \quad (8)$$

Для перехода к фазовой функции пропускания можно воспользоваться одним из методов кодирования амплитуды [18, 19]. Но такое кодирование приводит к уменьшению эффективности формирования полей. Простое игнорирование амплитудной составляющей в (8) и рассмотрение только фазовой функции пропускания позволило нам добиться эффективного и качественного формирования световых полей, описываемых формулой (2). Стоит отметить, что в этом случае коэффициенты C_1 и C_2 в (8) в общем случае не совпадают с коэффициентами A_{0n} и A_{0m} в (3). Это вызвано тем, что при простом игнорировании амплитудной составляющей в (8) происходит перераспределение энергии светового поля, идущей на формирование каждого из пучков в (3).

На рис. 7 показана рассчитанная согласно (8) фазовая функция ДОЭ с параметрами: $n_1 = 10$; $n_2 = 5$; $C_1 = 1$; $C_2 = 0,6$; $k_{r1} = k_{r2} = 51996 \text{ м}^{-1}$; $R = 3 \text{ мм}$. Формируемые распределения интенсивности, рассчитанные с помощью преобразования Френеля, показаны на рис. 8.

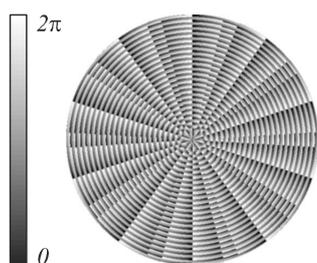


Рис. 7. Фаза ДОЭ, формирующего суперпозицию пучков Бесселя 8-го и 3-го порядков

3. Экспериментальное формирование пучков

Экспериментально рассчитанные суперпозиции световых пучков Бесселя формировались с помощью пространственного модулятора света (ПМС) (PLUTO Spatial Light Modulator, 1920×1080). Используемая оптическая схема представлена на рис. 9. Световой пучок лазера ($\lambda = 532$ нм) расширялся системой линз L_1 и L_2 с фокусными расстояниями $f_1 = 35$ мм и $f_2 = 150$ мм, образующими коллиматор. Затем пучок направлялся на дисплей ПМС.

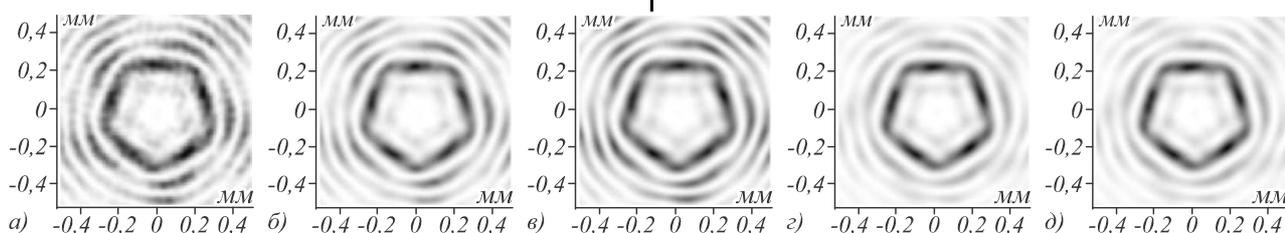


Рис. 8. Распределения интенсивности (негатив), сформированные элементом на рисунке : $z = 300$ мм (а), $z = 400$ мм (б), $z = 500$ мм (в), $z = 600$ мм (г), $z = 700$ мм (д)

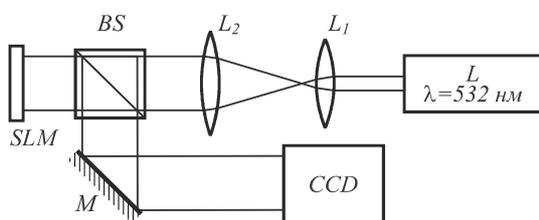


Рис. 9. Оптическая схема эксперимента: L – лазер, L_1, L_2 – линзы с фокусными расстояниями $f_1 = 35$ мм и $f_2 = 150$ мм; BS – делитель пучка, SLM – пространственный модулятор света; M – зеркало, CCD – камера

Распределения интенсивности, формируемые отражённым от ПМС световым пучком, фиксировались камерой VSTT-252 с размером пикселя 7 мкм.

В экспериментах радиус освещающего пучка составил 3 мм. На рис. 10 показаны сформированные распределения интенсивности на различных расстояниях. Из оценки (6) следует, что $z_{max} \approx 680$ мм, что совпадает с результатами эксперимента.

Как видно из рис. 10, наблюдается качественное соответствие распределений интенсивности, полученных в ходе вычислительного и натурального экспериментов.

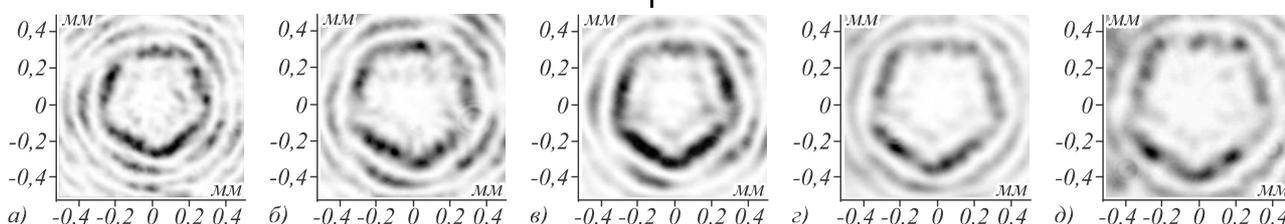


Рис. 10. Распределение интенсивности (негатив) в световом пучке, состоящем из пучков Бесселя 8-го и 3-го порядков, экспериментально сформированном с помощью пространственного модулятора света PLUTO SLM, на расстояниях: $z = 300$ мм (а); $z = 400$ мм (б); $z = 500$ мм (в); $z = 600$ мм (г); $z = 700$ мм (д)

Заключение

В работе предложен простой метод формирования полых световых пучков, поперечное сечение которых имеет форму правильного многоугольника, для задачи оптического захвата микрообъектов соответствующей формы. В основе метода лежит использование суперпозиции двух соосных пучков Бесселя. Поперечное сечение формируемого распределения интенсивности определяется не только разностью порядков рассматриваемых пучков, но и отношением их амплитуд.

Экспериментально с помощью ПМС сформированы полые световые пучки в виде правильных многоугольников и продемонстрировано, что они сохраняют свою структуру при распространении на ограниченном отрезке. Таким образом, удалось сформировать недифраги-

рующие световые пучки заданной формы. Такие световые пучки могут быть использованы для захвата и перемещения микрообъектов. Экспериментально с помощью пространственного модулятора света PLUTO SLM доказана возможность формирования таких пучков.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-07-97038 р_поволжье_а и Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Скиданов, Р.В. Формирование массива полых пучков для осаждения и позиционирования микрочастиц / Р.В. Скиданов, А.П. Порфирьев // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 387-394.

2. **Cojoc, D.** Laser trapping and micro-manipulation using optical vortices / D. Cojoc, V. Garbin, E. Ferrari, L. Businaro, F. Romanato, E. Di Fabrizio // *Microelectronic Engineering*. – 2005. – V. 78-79. – P. 125-131.
3. **Eckerskorn, N.** Hollow Bessel-like beam as an optical guide for a stream of microscopic particles / N. Eckerskorn, L. Li, R.A. Kirian, J. Kupper, D.P. DePonte, W. Krolikowski, W.M. Lee, H.N. Chapman, A.V. Rode // *Optics Express*. – 2013. – V. 21(25). – P. 30492-30499.
4. **Rode, A.V.** Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, W.Z. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Applied Physics A*. – 2010. – V. 100. – P. 327-331.
5. **Shvedov, V.G.** Giant optical manipulation / V.G. Shvedov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, A.S. Desyatnikov, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Physical Review Letters*. – 2010. – V. 105. – P. 118103.
6. **Desyatnikov, A.S.** Optical guiding of absorbing nanoclusters in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2009. – V. 17(7). – P. 5743-5757.
7. **Desyatnikov, A.S.** Photophoretic manipulation of absorbing aerosol particles with vortex beams: theory versus experiment / A.S. Desyatnikov, V.G. Shvedov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2009. – V. 17(10). – P. 8201-8211.
8. **Omori, R.** Rotation of optically trapped particles in air / R. Omori, K. Shima, A. Suzuki // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 1999. – V. 38. – P. 743-745.
9. **McGloin, D.** Photophoretic manipulation of absorbing aerosol particles with vortex beams: theory versus experiment / D. McGloin, K. Dholakia // *Contemporary Physics*. – 2005. – V. 46(1). – P. 15-28.
10. **Forbes, A.** Generating superpositions of higher-order Bessel beams / R. Vasilyeu, A. Dudley, N. Khilo, A. Forbes // *Optics Express*. – 2009. – V. 17(26). – P. 23389-23395.
11. **Kotlyar, V.V.** Rotation of laser beams with zero of the orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Optics Communications*. – 2007. – V. 274(1). – P. 8-14.
12. **Arlt, J.** Optical micromanipulation using a Bessel light beam / J. Arlt, V. Garcés-Chavez, W. Sibbett, K. Dholakia // *Optics Communications*. – 2001. – V. 197(4-6). – P. 239-245.
13. **Wu, F.** Generation of three-dimensional optical bottle beams via focused non-diffracting Bessel beam using an axicon / T. Du, T. Wang, F. Wu // *Optics Communications*. – 2014. – V. 317. – P. 24-28.
14. **Kotlyar, V.V.** Calculation of phase formers of non-diffracting images and a set of concentric rings / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Optik*. – 1996. – V. 102(2). – P. 45-50.
15. **Скиданов, Р.В.** Дифракционные оптические элементы для формирования комбинаций вихревых пучков в задаче манипулирования микрообъектами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 65-71.
16. **Fedotowsky, A.** Optimal filter design for annular imaging / A. Fedotowsky, K. Lehovc // *Applied Optics*. – 1974. – V. 13(12). – P. 2919-2923.
17. **Скиданов, Р.В.** Формирование массива световых «бутылок», основанное на использовании суперпозиции пучков Бесселя / Р.В. Скиданов, А.П. Порфирьев // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 80-90.
18. **Porfirev, A.P.** Generation of an array of optical bottle beams using a superposition of Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52(25). – P. 6230-6238.
19. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Paivanranta, J. Turunen // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – V. 11(6). – P. 065702.
20. **Montes-Usategui, M.** Adding functionalities to precomputed holograms with random mask multiplexing in holographic optical tweezers / M. Montes-Usategui, J. Mas, M.S. Roth, E. Martin-Badosa // *Applied Optics*. – 2011. – V. 50(10). – P. 1417-1424.

References

1. **Skidanov, R.V.** Formation of the massif of hollow beams for sedimentation and positioning of microparticles / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Computer Optics*. – 2012. – V. 36(3). – P. 387-394.
2. **Cojoc, D.** Laser trapping and micro-manipulation using optical vortices / D. Cojoc, V. Garbin, E. Ferrari, L. Businaro, F. Romanato, E. Di Fabrizio // *Microelectronic Engineering*. – 2005. – V. 78-79. – P. 125-131.
3. **Eckerskorn, N.** Hollow Bessel-like beam as an optical guide for a stream of microscopic particles / N. Eckerskorn, L. Li, R.A. Kirian, J. Kupper, D.P. DePonte, W. Krolikowski, W.M. Lee, H.N. Chapman, A.V. Rode // *Optics Express*. – 2013. – V. 21(25). – P. 30492-30499.
4. **Rode, A.V.** Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, W.Z. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Applied Physics A*. – 2010. – V. 100. – P. 327-331.
5. **Shvedov, V.G.** Giant optical manipulation / V.G. Shvedov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, A.S. Desyatnikov, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Physical Review Letters*. – 2010. – V. 105. – P. 118103.
6. **Desyatnikov, A.S.** Optical guiding of absorbing nanoclusters in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2009. – V. 17(7). – P. 5743-5757.
7. **Desyatnikov, A.S.** Photophoretic manipulation of absorbing aerosol particles with vortex beams: theory versus experiment / A.S. Desyatnikov, V.G. Shvedov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2009. – V. 17(10). – P. 8201-8211.
8. **Omori, R.** Rotation of optically trapped particles in air / R. Omori, K. Shima, A. Suzuki // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 1999. – V. 38. – P. 743-745.
9. **McGloin, D.** Photophoretic manipulation of absorbing aerosol particles with vortex beams: theory versus experiment / D. McGloin, K. Dholakia // *Contemporary Physics*. – 2005. – V. 46(1). – P. 15-28.
10. **Forbes, A.** Generating superpositions of higher-order Bessel beams / R. Vasilyeu, A. Dudley, N. Khilo, A. Forbes // *Optics Express*. – 2009. – V. 17(26). – P. 23389-23395.
11. **Kotlyar, V.V.** Rotation of laser beams with zero of the orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // *Optics Communications*. – 2007. – V. 274(1). – P. 8-14.
12. **Arlt, J.** Optical micromanipulation using a Bessel light beam / J. Arlt, V. Garcés-Chavez, W. Sibbett, K. Dholakia // *Optics Communications*. – 2001. – V. 197(4-6). – P. 239-245.
13. **Wu, F.** Generation of three-dimensional optical bottle beams via focused non-diffracting Bessel beam using an axicon / T. Du, T. Wang, F. Wu // *Optics Communications*. – 2014. – V. 317. – P. 24-28.
14. **Kotlyar, V.V.** Calculation of phase formers of non-diffracting images and a set of concentric rings / V.V. Kotlyar,

- S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Optik*. – 1996. – V. 102(2). – P. 45-50.
15. **Skidanov, R.V.** Diffractive optical elements for the formation of combinations of vortex beams in the problem manipulation of microobjects / R.V. Skidanov, S.V. Ganchevskaya // *Computer Optics*. – 2014. – V. 38(1). – P. 65-71.
16. **Fedotowsky, A.** Optimal filter design for annular imaging / A. Fedotowsky, K. Lehovc // *Applied Optics*. – 1974. – V. 13(12). – P. 2919-2923.
17. **Skidanov, R.V.** Generation of optical bottle beams array by superposition Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Computer Optics*. – 2012. – V. 36(1). – P. 80-90.
18. **Porfirev, A.P.** Generation of an array of optical bottle beams using a superposition of Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Applied Optics*. – 2013. – V. 52(25). – P. 6230-6238.
19. **Khonina, S.N.** Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Paivanranta, J. Turunen // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – V. 11(6). – P. 065702.
20. **Montes-Usategui, M.** Adding functionalities to precomputed holograms with random mask multiplexing in holographic optical tweezers / M. Montes-Usategui, J. Mas, M.S. Roth, E. Martin-Badosa // *Applied Optics*. – 2011. – V. 50(10). – P. 1417-1424.

A SIMPLE METHOD OF THE FORMATION NONDIFFRACTING HOLLOW OPTICAL BEAMS WITH INTENSITY DISTRIBUTION IN FORM OF A REGULAR POLYGON CONTOUR

A.P. Porfirev, R.V. Skidanov

Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University

Abstract

We propose a new method of shaping nondiffracting hollow optical beams (HOB's), the intensity distribution of the cross-section of which have the shape of the simple geometrical figures. This method is based on interference of two coaxial Bessel beams. These beams can be used as optical traps for controlled manipulation of non-spherical microobjects.

Key words: nondiffracting optical beams, Bessel beams, interference of Bessel beams, hollow optical beams, optical wavefront dislocations.

Сведения об авторах



Порфирьев Алексей Петрович, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (СГАУ) по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук (2013 год). Ассистент кафедры технической кибернетики СГАУ, научный сотрудник лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН). Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическое манипулирование.

E-mail: porfirev.alexey@smr.ru.

Alexey Petrovich Porfirev (b. 1987) graduated (2010) from Samara State Aerospace University (SSAU), majoring in Applied Physics and Mathematics. Candidate in Physics and Mathematics (2013). Currently he is an assistant professor in Technical Cybernetics Department of SSAU and a researcher in Micro- and Nanotechnologies Laboratory of the Image Processing Systems Institute of the RAS (IPSI RAS). His current research interests include diffractive optics and optical manipulation.



Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает заведующим лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 90 статей, 5 монографий.

E-mail: romans@smr.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973). Graduated with honours (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the head of micro- and nanotechnologies laboratory of the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 90 scientific papers, 5 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Поступила в редакцию 28 марта 2014 г.