

## ГЕНЕРАЦИЯ ВНЕОСЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК НА ОСНОВЕ ПУЧКОВ СО СТЕПЕННОЙ ФАЗОВОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ ОТ РАДИУСА

© 2023 О.А. Дюкарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,  
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 14.11.2023

В работе рассматриваются лазерные пучки со степенной фазовой зависимостью от радиуса, позволяющие формировать оптические ловушки для захвата частиц и молекул при использовании совокупности рассеивающих и собирающих аксиконов, которые дополняются фокусирующей линзой, а также фазовым элементом с отклоняющим волновым фронтом в случае внеосевого формирования ловушки. Показана возможность формирования внеосевых оптических ловушек разного размера с возможностью изменения их положения и использования их комбинаций.  
*Ключевые слова:* оптические ловушки, преобразование Френеля, пучки со степенной фазовой зависимостью от радиуса.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-135-138

EDN: BSZSGO

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов оптической микроманипуляции [1 - 3], используемых в широком спектре задач, которые связаны с захватом и переносом частиц, молекул и атомов [4 - 6], является перспективным направлением развития лазерной физики и прикладной оптики. Основным подходом для захвата частиц является создание оптических ловушек [7 - 9]. При использовании обычных световых ловушек, когда частица притягивается в область максимальной интенсивности, нагрев частицы может привести к ее разрушению.

Альтернативой является захват частицы в зоне с минимальной интенсивностью, в «световой бутылке» [10 - 12]. Такие ловушки представляют собой область нулевой интенсивности, окруженную областью более высокой интенсивности, которая представляет собой световой барьер.

Одним из способов формирования областей с минимальной интенсивностью является использование лазерных пучков с винтовой фазовой сингулярностью [13 - 15], причем градиент фазы позволяет вращать захваченные частицы. Однако такие ловушки фактически являются двумерными, т.к. теневая область ограничивается только поперечным световым барьером. При использовании «световых бутылок» обеспечивается трехмерный захват поглощающих и менее плотных чем окружающая среда частиц [16, 17].

### МОДЕЛИРОВАНИЕ

Распределение амплитуды пучков в параксиальной области описывается преобразованием Френеля:

$$F(u, v, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp\left(\frac{ik}{2z}((x-u)^2 + (y-v)^2)\right) dx dy, \quad \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} \ll z. \quad (1)$$

Если комплексная функция пропускания входного пучка может быть представлена в виде  $f(r, \varphi) = A(r)e^{im\varphi}$ , где  $m$  – целое число, то выражение (1), представленное в полярных координатах, упрощается до однократного интеграла и может быть представлено в виде:

$$F_m(\rho, \theta, z) = \frac{i^m k}{z} \exp(ikz) \exp(im\theta) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) \cdot \int_0^{\infty} A(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) J_m\left(\frac{kr\rho}{z}\right) r dr, \quad (2)$$

где  $J_m(x)$  – функция Бесселя порядка  $m$ .

В случае, когда входная функция обладает осевой симметрией ( $m = 0$ ), формируемое поле не зависит от угла, а для вычисления распределения на оптической оси полагается  $\rho = 0$ .

Классическая параболическая линза с комплексной функцией пропускания

$$f(r) = \exp\left(\frac{ikr^2}{2f}\right), \quad (3)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число для лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 0,000532$  мм,  $f = 1000$  мм – фокусное расстояние, позволяет получить максимум интенсивности на оптической оси в плоскости фокуса  $z = f$ .

Добавление аксиконов [18, 19] позволяет изменять положение фокуса вдоль оптической оси. Таким образом, использование рассеивающего аксикона  $\exp(ikar)$  обеспечивает максимум интенсивности на оси после фокуса линзы, а собирающего  $\exp(-ikar)$  – обеспечивает максимум интенсивности на оси до фокуса линзы. Здесь  $\alpha$  принимает значения больше 0.

При равных значениях  $\alpha$  смещение, порождаемое рассеивающим аксиконом больше, чем смещение, порождаемое собирающим аксиконом, поскольку добавляется влияние собирающей компоненты линзы, и разность этих смещений увеличивается по мере увеличения параметра  $\alpha$  [20]. При этом при использовании рассеивающего аксикона энергия в точке максимума падает по мере удаления от начальной точки фокуса, поскольку увеличивается длина по полуспаду, и энергия распределяется на большую площадь.

На рисунке 1 показано распределение интенсивности на оси классической линзы (сплошная линия), а также линзы с использованием рассеивающих аксиконов с различными параметрами  $\alpha$ .

Использование совокупности аксиконов (или бинарного аксикона [21, 22]) позволяет формировать сразу два локальных максимума на оптической оси, до и после фокуса линзы [23]. Между максимумами находится кольцевое распределение интенсивности, при этом энергия на оптической оси нулевая. Таким образом, частицы, заключенные в области низкой интенсивности, окруженной световым барьером (т.е. в оптической бутылке), могут быть удержаны и перемещены.

Возможно как использование совокупности аксиконов, описываемое выражением  $\cos(kar)$ , зависящие от одного параметра, так и совокупности, где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  различны (например,  $\alpha_1 = -0,000266$  и  $\alpha_2 = 0,000798$ ). В первом случае локальный максимум, образованный фокусирующим аксиконом всегда больше локального

максимума, образованного рассеивающим аксиконом из-за влияния линзы.

$$f(r) = c_0 \exp\left(\frac{ikr^2}{2f}\right) \cos(kar). \quad (4)$$

Разница между распространением интенсивности на оси при использовании линзы и при использовании комбинации из линзы и аксиконов представлена на рисунке 2.

С увеличением параметра  $\alpha$  расстояние между максимумами интенсивности увеличивается. Первый фокус смещается к входной плоскости, второй отдалется от нее. Более короткий фокус соответствует более сильной фокусировке. Важно отметить, что не для всех значений  $\alpha$  энергия в точке фокуса нулевая.

Варьирование параметра  $\alpha$  позволяет варьировать размер оптической ловушки. Тем не менее, чем длиннее ловушка, тем меньше энергии приходится на ее стенки, поэтому существует предел, связанный с энергией захваченной частицы.

Оптические ловушки, формируемые с помощью пучков, описываемых выражением (4), расположены на оптической оси. Для возможности захвата частицы вне оси можно использовать оптический клин или фазовую добавку с отклоняющим волновым фронтом [24, 25], в этом случае входная функция пропускания описывается выражением:

$$f(r) = \exp\left(\frac{ikr^2}{2f}\right) \cos(kar) \sum_{j=0}^N c_j \exp(ik\beta_j y). \quad (5)$$

Поскольку функция (5) является симметричной только относительно оси  $x$ , для моделирования распространения оптического пучка используется преобразование (1).

Параметр  $\beta$  влияет на отклонение от оптической оси. Если  $\beta > 0$ , фокус смещается в положительном направлении оси  $y$ , иначе – в отрицательном.

На рисунке 3 показана возможность создания сразу двух оптических ловушек, одна из которых может захватывать частицу над оптической осью, другая – под ней. В этом случае смещение относительно оптической оси одинаковое, поскольку равные по модулю  $\beta_1$  и  $\beta_2$  образуют симметрично расположенные ловушки.

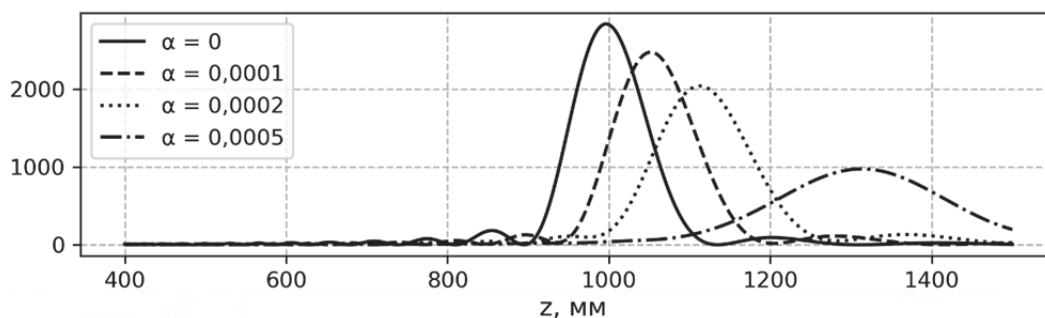


Рис. 1. Влияние параметра рассеивающего аксикона на распространение интенсивности на оптической оси

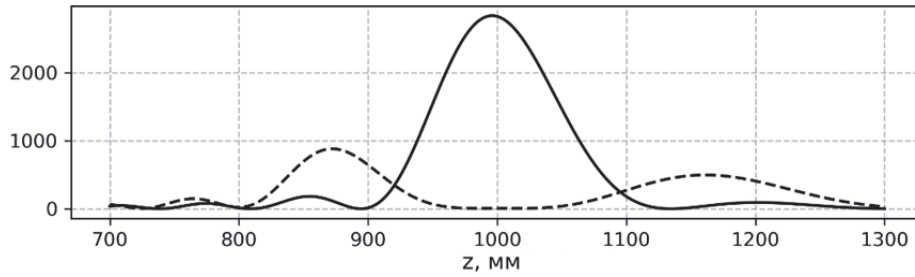


Рис. 2. Распределение интенсивности на оптической оси при использовании линзы (сплошная линия) и при использовании линзы и совокупности аксиконов (пунктирная линия),  $\alpha = \pi/k$

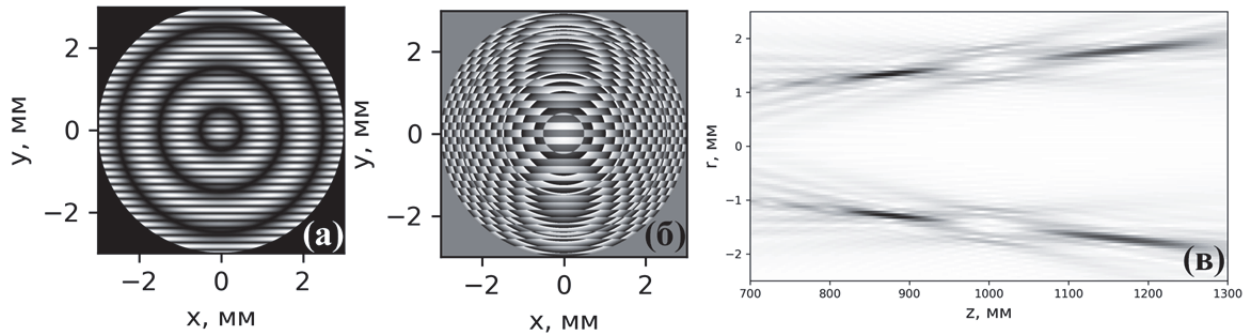


Рис. 3. Амплитуда (а) и фаза (б) оптического элемента, а также амплитуда (негатив) сформированного распределения оптических ловушек (в),  $|\beta_1| = |\beta_2| = 0,0015$

Тем не менее поскольку положение и размер ловушек зависят от положения фокуса линзы, коэффициента аксиконов и смещения, то мы можем генерировать ловушки, не связанные друг с другом общими характеристиками, как это показано на рисунке 4. Для этого комплексная функция пропускания (4) заменяется на следующую:

$$f(r) = \sum_{j=0}^N c_0 \exp\left(\frac{ikr^2}{2f_j}\right) \cos(k\alpha_j r) \exp(ik\beta_j y). \quad (6)$$

Как можно видеть из рисунка 4, первая ловушка расположена ближе к оптической оси и наклонена к ней под меньшим углом. Центры каждой ловушки расположены в точках фокуса соответствующих линз. Сохраняется нулевая интенсивность внутри ловушек и кольцевое распределение вокруг.

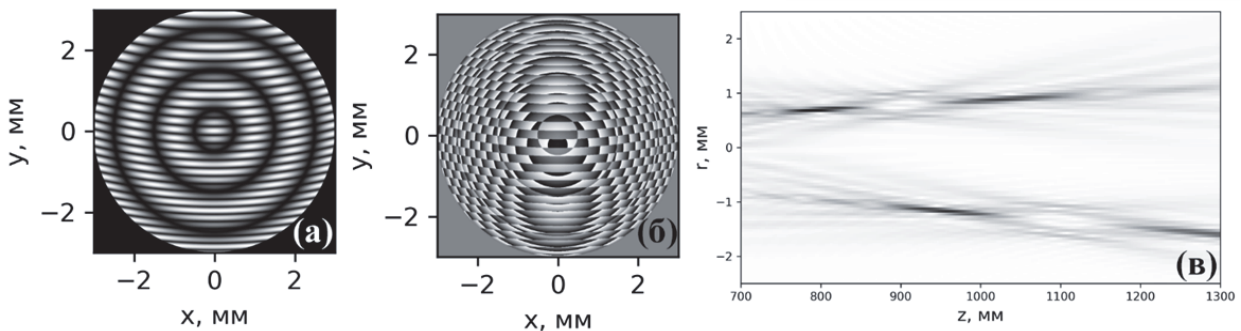


Рис. 4. Амплитуда (а) и фаза (б) оптического элемента, а также амплитуда (негатив) сформированного распределения оптических ловушек (в) при  $f_1 = 900, f_2 = 1100, \beta_1 = 0,001, \beta_2 = -0,0015, \alpha_1 = \alpha_2 = \pi/k$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены свойства распространения пучков со степенной фазовой зависимостью от радиуса. Показано, что при дополнении фокусирующих линз рассеивающими и собирающими аксиконами возможно создавать оптические ловушки, которые могут найти применение во многих отраслях науки.

Возможно как создание оптических ловушек на оптической оси, так и внеосевых ловушек с помощью фазовых добавок с отклоняющим волновым фронтом. Для контроля положения ловушек в пространстве используются как разные фокусные расстояния линз, соответствующие конкретным ловушкам, так и различные параметры смещения, позволяющие генерировать ловушки под разными углами к оптической оси.

Размер ловушки может варьироваться посредством изменения параметра аксиконов, тем не менее, стоит в первую очередь отталкиваться от энергии частиц, поскольку при увеличении размера ловушки энергия в ее стенках уменьшается.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ashkin, A.* Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers / A. Ashkin // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1997. – Vol. 94. – P. 4853–4860.
2. Optical trapping with structured light: a review / Y. Yang, Y.-X. Ren, M. Chen [at al.] // Advanced Photonics. – 2021. – Vol. 3(3). – P. 034001.
3. *Sokolenko, B.V.* Optical tweezers and manipulators. Modern concepts and future prospect / B.V. Sokolenko, N.V. Lyakhovich, O.S. Sidorenkova // Phys. Usp. – 2022. – Vol. 192(8). – P. 867–892.
4. Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: Fundamentals, advances and prospects / D. Gao, W. Ding, M. Nieto-Vesperinas [at al.] // Light: Sci. & Appl. – 2017. – Vol. 6. – P. e17039.
5. *Minamimoto, H.* Toward room-temperature optical manipulation of small molecules / H. Minamimoto, N. Oyamada, K. Murakoshi // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2023. – Vol. 55. – P. 100582.
6. Magneto-Optical Traps for Cold Atomic Gravimetry: Research Status and Development Trends / R. Xu, A. Li, D. Li [at al.] // Appl. Sci. – 2023. – Vol. 13. – P. 6076.
7. Three-dimensional laser trapping on the base of binary radial diffractive optical element / R. Skidanov, S. Khonina, A. Porfirev [at al.] // Journal of Modern Optics. – 2015. – Vol. 62(14). – P. 1183–1186.
8. *Zhong, M.-C.* Opto-thermal oscillation and trapping of light absorbing particles / M.-C. Zhong, A.-Y. Liu, F. Ji // Opt. Express. – 2019. – Vol. 27. – P. 29730–29737.
9. Multi-plane photophoretic trapping of airborne particles with a multi-linear optical trap / A.P. Porfirev, S.A. Fomchenkov, D.P. Porfiriev [at al.] // Optik. – 2022. – Vol. 7. – P. 271.
10. *Alpmann, C.* Holographic optical bottle beams / C. Alpmann, M. Esseling, P. Rose [at al.] // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 100. – P. 111101.
11. *Porfirev, A.P.* Generation of an array of optical bottle beams using a superposition of Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // Appl. Opt. – 2013. – Vol. 52. – P. 6230–6238.
12. Generation of Multiple Vector Optical Bottle Beams / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, S.G. Volotovskiy [at al.] // Photonics. – 2021. – Vol. 8. – P. 218.
13. *Khonina, S.N.* Enlightening darkness to diffraction limit and beyond: comparison and optimization of different polarizations for dark spot generation / S.N. Khonina, I. Golub // J. Opt. Soc. Am. A. – 2012. – Vol. 29(7). – P. 1470–1474.
14. *Savelyev, D.A.* Characteristics of sharp focusing of vortex Laguerre-Gaussian beams / D.A. Savelyev, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39(5). – P. 654–662.
15. *Li, H.* Switchable optical trapping based on vortex-pair beams generated by a polarization-multiplexed dielectric metasurface / H. Li, J. Wen, S. Gao [at al.] // Nanoscale. – 2023. – Vol. 15. – P. 17364–17372.
16. *Sasaki, K.* Optical trapping of a metal particle and a water droplet by a scanning laser beam / K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa [at al.] // Appl. Phys. Lett. – 1992. – Vol. 60. – P. 807–809.
17. *Gahagan, K.T.* Simultaneous trapping of low-index and high-index microparticles observed with an optical-vortex trap / K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander // J. Opt. Soc. Am. B. – 1999. – Vol. 16(4). – P. 533–537.
18. *Schafer, F.P.* On some properties of axicons / F.P. Schafer // Appl. Phys. B. – 1986. – Vol. 39. – P. 1–8.
19. *Khonina, S.N.* Modern Types of Axicons: New Functions and Applications / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, P.A. Khorin, M.A. Butt // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – P. 6690.
20. *Khonina, S.N.* Dynamic focal shift and extending depth of focus based on the masking of the illuminating beam and using an adjustable axicon / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, A.P. Porfirev // Journal of the Optical Society of America A. – 2019. – Vol. 36(6). – P. 1039–1047.
21. *Fedotowsky, A.* Far-field diffraction patterns of circular gratings / A. Fedotowsky, K. Lehovc // Appl. Opt. – 1974. – Vol. 13(11). – P. 2638–2642.
22. *Amidror, I.* The Fourier spectrum of circular sine and cosine gratings with arbitrary radial phases / I. Amidror // Opt. Commun. – 1998. – Vol. 149. – P. 127–134.
23. *Khonina, S.N.* 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // Applied Physics B. – 2018. – Vol. 124. – P. 191–193.
24. Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.P. Porfirev // Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 50(7). – P. 629–635.
25. *Frolov, A.O.* Changing the trajectory of Airy beam sets with spatial carriers / A.O. Frolov, A.V. Ustinov, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2022. – Vol. 46(5). – P. 724–732.

### GENERATION OF OFF-AXIS OPTICAL TRAPS BASED ON BEAMS WITH A POWER-LAW PHASE DEPENDENCE ON THE RADIUS

© 2023 O.A. Dyukareva

Samara National Research University, Samara, Russia

The paper considers laser beams with a power-law phase dependence on the radius, which make it possible to form optical traps for capturing particles and molecules using a set of scattering and collecting axicons, which are complemented by a focusing lens, as well as a phase element with a deflecting wavefront in the case of off-axis trap formation. The possibility of forming off-axis optical traps of different sizes with the possibility of changing their position and using their combinations is shown.

**Keywords:** optical traps, Fresnel transform, beams with a power-law phase dependence on the radius.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-135-138

EDN: BSZSGO

*Olga Dyukareva, Postgraduate Student.*  
E-mail: dukarevaola@gmail.com