

# Распространение пучков со степенной зависимостью от радиуса

О.А. Дюкарева

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

dukarevaola@gmail.com

**Аннотация**—В данной работе рассмотрены изменения свойств пучков со степенной зависимостью от радиуса при различной апертурной аподизации. Показана возможность формирования нескольких оптических ловушек на оптической оси, а также вариаций размера ловушек за счет интерференционных эффектов.

**Ключевые слова**— преобразование Френеля-Ханкеля, самофокусирующиеся пучки, оптические ловушки.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические ловушки [1-3] широко применяются для захвата, манипулирования и исследования молекул, атомов и биологических клеток. Для обычных световых ловушек, когда микрочастица притягивается в область максимальной интенсивности, разрушительное действие нагрева на захваченные объекты является одной из основных проблем. Альтернативой является захват в области с минимальной интенсивностью, в так называемые «световые бутылки» (“light bottle”) [4-7], представляющие собой область нулевой интенсивности, окруженную областью высокой интенсивности, которые являются световыми барьерами.

Одним из способов формирования областей с минимальной интенсивностью является использование лазерных пучков с винтовой фазовой сингулярностью [8-10], причем градиент фазы позволяет вращать захваченные частицы. Однако, такие ловушки фактически являются двумерными, т.к. теневая область ограничивается только поперечным световым барьером. При использовании же «световых бутылок» обеспечивается 3D-захват поглощающих и менее плотных, чем окружающая среда частиц [11]. Отметим, что многокольцевые и многоконтурные пучки могут использоваться для одновременного захвата микрочастиц различного типа [12].

Множество работ посвящено построению ловушки на основе пучков Эйри, так как они обладают свойством резкой самофокусировки [13-14]. Для создания оптических ловушек логично использовать пучки с большими градиентами интенсивности и фазы, используя дифракционные оптические элементы или оптические модуляторы света [15].

В данной работе рассматриваются пучки со степенной зависимостью от радиуса и дополнительной апертурой аподизацией, что обеспечивает вариацию свойств самофокусирующихся пучков и возможность создавать оптические ловушки разных размеров и форм.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В этой работе рассматриваются оптические пучки вида:

$$f(r) = c_0 \exp(ik\alpha_1(r - r_0)^n) \cos(\alpha_2(r - r_0)), \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число для лазерного излучения с длиной волны  $\lambda$ ,  $\alpha_1$  – положительное действительное число меньше единицы.

Множитель  $\cos(\alpha_2(r - r_0))$  представляет собой совокупность рассеивающего аксикона  $\exp(i\alpha_2(r - r_0))$  (обеспечивает максимум интенсивности на оси после фокуса линзы) и собирающего аксикона  $\exp(-i\alpha_2(r - r_0))$  (обеспечивает максимум интенсивности на оси до фокуса линзы).

Для моделирования парааксиального распространения пучка в пространстве используется преобразование Френеля:

$$F(\rho, \theta) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f(r, \varphi) * \exp\left(\frac{ik}{2z}(r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos(\theta - \varphi))\right) r dr d\varphi. \quad (2)$$

Так как функция (1) может быть представлена в виде  $f(r, \varphi) = A(r)e^{im\varphi}$ , где  $m$  – целое число, то выражение (2) упрощается до однократного интеграла. Входная функция обладает осевой симметрией ( $m = 0$ ), следовательно формируемое поле не будет зависеть от угла, и уравнение (2) может быть представлено в виде:

$$F_0(\rho, z) = \frac{ik}{z} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) * \int_a^b A(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) J_0\left(\frac{kr\rho}{z}\right) r dr, \quad (3)$$

где  $J_0(x)$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Для вычисления распределения интенсивности на оптической оси используется формула:

$$F_0(z) = \frac{ik}{z} e^{ikz} \int_a^b f(r) e^{\frac{ikr^2}{2z}} r dr. \quad (4)$$

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования распространения пучка (1) использовалась линза с радиусом  $r = 3$  мм. Длина волны  $\lambda = 0,0005$  мм. Параметр  $\alpha_2$  выбирался таким образом, чтобы  $\alpha_2 = -k\alpha_1$ .

Параметр  $r_0$  позволяет создать из собирающей линзы оптический элемент, внешняя часть которого будет работать на фокусировку, в то время как внутренняя, имеющая радиус  $r_0$ , будет работать на рассеивание.

При моделировании распространения вдоль оптической оси можно наблюдать симметричный, плавно увеличивающийся максимум для случая  $n = 2$ , в то время как при  $n = 3$  интенсивность резко возрастает с практически нулевой. Это свойство может быть полезно для создания бутылок с ярко выраженными «пробками».

Варьирование параметра  $\alpha_2$  для пучков с  $n = 2$  позволяет варьировать объем оптической ловушки,

однако этим можно пользоваться до определенного момента, так как из-за наличия у входной функции рассеивающих частиц стенки «бутылки» становятся тоньше, пока она не исчезает (рис. 1).

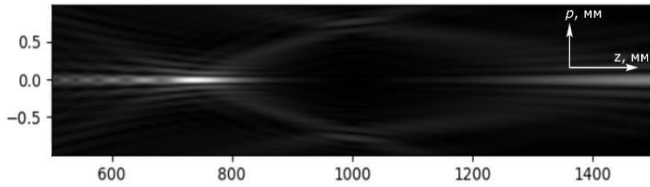


Рис. 1. Продольная картина интенсивности для  $n = 2$

Для пучков с  $n = 3$  увеличение  $\alpha_2$  влечет увеличение количества максимумов интенсивности, следовательно, количества оптических ловушек, которые они образуют (рис. 2). Из-за свойства резко возрастающей интенсивности мы видим более тонкую фокусировку.

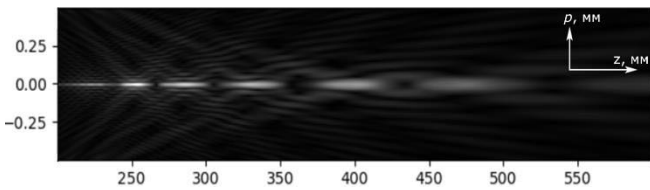


Рис. 2. Продольная картина интенсивности для  $n = 3$

Рассмотрим функцию (1) со следующими параметрами:

$$A(r) = \begin{cases} A(r), r \geq r_0, \\ 1, r < r_0, \end{cases} \text{ или } A(r) = \begin{cases} A(r), r \geq r_0, \\ 0, r < r_0. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь  $A(r)$  – амплитуда функции (1).

Имея фокусирующую линзу, мы увеличиваем радиус апертуры в центральной части, которая имеет рассеивающую структуру, таким образом изначальный фокус смещается и удлиняется. На рис. 3 можно наблюдать все три случая функции (1). Во втором случае получаем область низкой интенсивности, в третьем – более интенсивную фокусировку около входной плоскости.

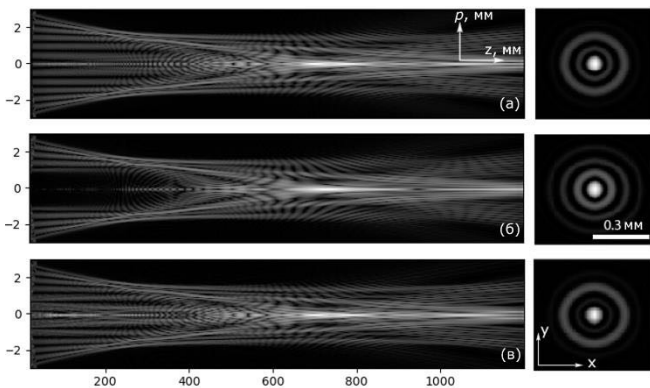


Рис. 3. Продольные и поперечные (в точке фокуса) картины интенсивности при  $n = 3$  для трех случаев: (а) – амплитуда входного пучка не меняется; (б) – амплитуда функции в области  $r < 1$  становится равной 0; (в) – амплитуда функции в области  $r < 1$  становится равной 1

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проиллюстрированы свойства линз с квадратичной и кубической зависимостями от радиуса с различной апертурой в центральной части. Показано, что использование функций с кубической зависимостью от радиуса позволяет создавать оптические ловушки с более выраженными краями. Изменение параметра  $\alpha_2$  бинарного аксикона позволяет контролировать объем оптической ловушки для случая квадратичной зависимости, а также количество ловушек для функций с кубической зависимостью от радиуса. Использование апертуры в центральной части линзы позволяет создавать между входной плоскостью и фокусом область низкой интенсивности, а также увеличивать интенсивность фокусировки у входной плоскости, в зависимости от значения амплитуды.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Otte, E. Optical trapping gets structure: Structured light for advanced optical manipulation / E. Otte, C. Denz // *Appl. Phys. Rev.* – 2020. – Vol. 7. – P. 041308.
- [2] Yang, Y. Optical trapping with structured light: a review / Y. Yang, Y. Ren, M. Chen, Y. Arita, C. Rosales-Guzmán // *Advanced Photonics.* – 2021. – Vol. 3(3). – P. 034001.
- [3] 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.
- [4] Otte, E. Optical trapping gets structure: Structured light for advanced optical manipulation / E. Otte, C. Denz // *Appl. Phys. Rev.* – 2020. – Vol. 7. – P. 041308.
- [5] Arlt, J. Generation of beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt // *Opt. Lett.* – 2000. – Vol. 25(4). – P. 191-193.
- [6] Yelin, D. Generating an adjustable three-dimensional dark focus / D. Yelin, B. E. Bouma, G. J. Tearney // *Opt. Lett.* – 2004. – Vol. 29(7). – P. 661-663.
- [7] Khonina, S.N. Generation of Multiple Vector Optical Bottle Beams / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, S.G. Volotovskiy, A.V. Ustinov, S.A. Fomchenkov, V.S. Pavelyev, S. Schröter, M. Duparré // *Photonics (MDPI).* – 2021. – Vol. 8. – P. 218.
- [8] Paterson, L. Controlled Rotation of Optically Trapped Microscopic Particles / L. Paterson // *Science.* – 2001. – Vol. 292. – P. 912-914.
- [9] Bhattacharya, M. Using a Laguerre-Gaussian Beam to Trap and Cool the Rotational Motion of a Mirror / M. Bhattacharya, P. Meystre // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – Vol. 99. – P. 153603.
- [10] Simpson, S.H. Rotation of Absorbing Spheres in Laguerre-Gaussian Beams / S.H. Simpson, S. Hanna // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2009. – Vol. 26. – P. 173-183.
- [11] Skidanov, R. Three-dimensional laser trapping on the base of binary radial diffractive optical element / R. Skidanov, S. Khonina, A. Porfirev, V. Pavelyev, D. Kachalov // *Journal of Modern Optics.* – 2015. – Vol. 62(14). – P. 1183-1186.
- [12] Khonina, S.N. Generation of multi-contour plane curves using vortex beams / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Optik - International Journal for Light and Electron Optics.* – 2021. – Vol. 229. – P. 166299.
- [13] Jiang, Y. Abruptly autofocusing property of circular Airy vortex beams with different launch angles / Y. Jiang, S. Zhao, W. Yu, X. Zhu // *Journal of the Optical Society of America A.* – 2018. – Vol. 6(5). – P. 890-894.
- [14] Yan, X. Free-space propagation of autofocusing Airy vortex beams with controllable intensity gradients / X. Yan, L. Guo, M. Cheng, S. Chai // *Chin. Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 17. – P. 040101.
- [15] Wu, Y. Abruptly autofocusing polycyclic tornado ring Airy beam / Y. Wu, C. Xu, Z. Lin, H. Qiu, X. Fu, K. Chen, D. Deng // *New J. Phys.* – 2020. – Vol. 22. – P. 093045.