

# ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЗАХВАТА И КОНТРОЛИРУЕМОГО ПОВОРОТА МИКРООБЪЕКТОВ

Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>, С.В. Ганчевская<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН

Рассмотрен метод формирования световых ловушек для контролируемого вращения микрообъектов с помощью вихревых аксиконов. Представлены результаты эксперимента по захвату и разнонаправленному вращению полистироловых микрочастиц диаметром 5 мкм.

Вихревые световые пучки используются при передаче информации [1], в системах оптического контроля [2], в оптическом микроманипулировании [3, 4]. При этом наличие орбитального углового момента предопределило использование оптических вихревых пучков, прежде всего, для вращения микрообъектов. Большинство используемых вихревых пучков имеют чётко выраженную кольцевую структуру. Но существуют световые пучки, имеющие более сложную структуру [5, 6], в виде замкнутых световых линий. В качестве практического использования таких световых пучков чаще всего рассматривается оптический привод для микромеханических систем [7–11], но существует множество других практических задач в области микроманипуляции, в которых используются вихревые пучки [12, 13]. При этом орбитальный угловой момент может появляться даже при сложении пучков, которые изначально не обладают им. Так, в [14] описывается суперпозиция световых пучков Эрмита–Гаусса с орбитальным угловым моментом. В [15] описывается создание суперпозиции вихревых пучков для вращения микрочастиц и бактерий с использованием динамического модулятора света.

Суперпозиция вихревых пучков в общем случае имеет сложную структуру распределения интенсивности [16, 17] (в общем случае некольцевую). В [18, 19] описывается метод формирования суперпозиции вихревых пучков, имеющих некольцевую структуру, и теоретически и экспериментально обосновывается возможность использования таких вихревых полей в задаче оптического вращения микрообъектов.

## 1. Формирование суперпозиции вихревых световых полей вихревыми аксиконами

Дифракционный винтовой аксикон описывается функцией комплексного пропускания следующего вида:

$$\tau(r, \phi) = \exp(i2\pi\nu r) \exp(in\phi), \quad (1)$$

где  $r, \phi$  – полярные координаты в плоскости ДОЭ,  $\nu$  – пространственная частота линий аксикона,  $n$  – номер винтовой составляющей. При прохождении света через такой аксикон формируется пучок Бесселя  $n$ -го порядка  $J_n(\square r)$ , где  $\square = k \cos(\nu\lambda)$  ( $k$  – волновое число).

Известна работа [20], в которой предлагается генерировать пучки Бесселя с помощью ДОЭ с функцией пропускания

$$\tau(r, \phi) = \operatorname{sgn}(J_n(\alpha r)) \exp(in\phi). \quad (2)$$

Винтовой ДОЭ с пропусканием (1) эффективно формирует световое поле, амплитуда которого пропорциональна функции Бесселя  $J_n(\square r) \exp(in\phi)$ , вблизи оптической оси на отрезке  $0 < z < Rk / \square$ , где  $R$  – радиус аксикона.

Если рассмотреть структуру ДОЭ с функцией пропускания (2) с точки зрения геометрии расположения зон, то можно сказать, что ДОЭ представляет собой набор кольцевых зон примерно равной ширины, в которых фазовая функция повернута на полярный угол  $\phi_0 = \pi/n$ , если знак функции  $J_n(\square r)$  отрицательный.

Рассмотрим дифракционный оптический элемент с функцией пропускания

$$\tau(r, \phi) = \frac{1}{2} [\exp(im_1\phi) + \exp(im_2\phi)] + \frac{1}{2} [\exp(im_2\phi) - \exp(im_1\phi)] \operatorname{sgn}[\cos(2\pi\nu r + n\phi)], \quad (3)$$

где  $m_1, m_2$  – номера дополнительных вихревых составляющих,  $r, \varphi$  – полярные координаты,  $\nu$  – пространственная несущая частота,  $n$  – топологический заряд бинарного дифракционного аксикона, который является основой структуры этого ДОЭ. С точки зрения геометрии ДОЭ с такой функцией пропускания выглядит как дифракционный бинарный аксикон, у которого в выступах записана вихревая составляющая  $m_1$ , а во впадинах – вихревая составляющая  $m_2$ , при этом расположение этих зон таково, что в ближней зоне также может формироваться световое поле с топологическим зарядом  $n$ . Будем в дальнейшем называть топологический заряд  $n$  топологическим зарядом структуры. Кроме этого, если в соседних зонах одинаковый топологический заряд, то для структурного разделения таких зон можно добавить к фазе во всей зоне некоторую постоянную величину. Выглядеть это будет как поворот вихревой фазы на некоторый угол. Будем говорить, например, о смещении фазы на полпериода, если этот угол равен  $\pi$ . Формируемые таким ДОЭ световые поля отличаются большим разнообразием распределений интенсивности и фазы, что позволяет говорить о возможности их использования в оптической микроманипуляции для очень широкого диапазона задач.

Одна из таких задач – вращение микрообъектов. В этом случае ДОЭ формируются суперпозицией вихревых пучков с разностью топологических зарядов равную 4. На рисунке 1 представлен случай для  $n=6, m_1=2, m_2=6$ .

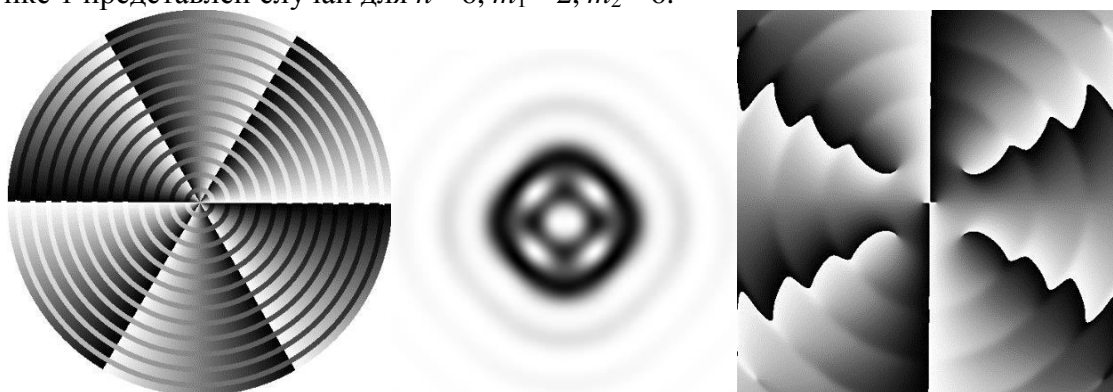


Рисунок 1 – Фазовая функция ДОЭ (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза пучка (в)

Был проведён эксперимент, в ходе которого в одном из дифракционных порядков такого ДОЭ был сформирован вихревой пучок с топологическими зарядами 6, 2, 6. Затем этот пучок был сфокусирован на микрочастицах полистирола диаметром 5мкм, расположенных внутри капли дистиллированной воды на поверхности стеклянной подложки. В результате натурального эксперимента инициируется поворот группы частиц. В зависимости от того, как фокусируется пучок, частицы попадают в области с разными топологическими зарядами.

Рассмотрим световую ловушку, которая формируется суперпозицией вихревых пучков с топологическими зарядами  $n=0, m_1=7, m_2=-5, m_3=7, m_4=7$ . На рисунке 2 представлены фазовая функция ДОЭ, распределение интенсивности и фаза пучка.

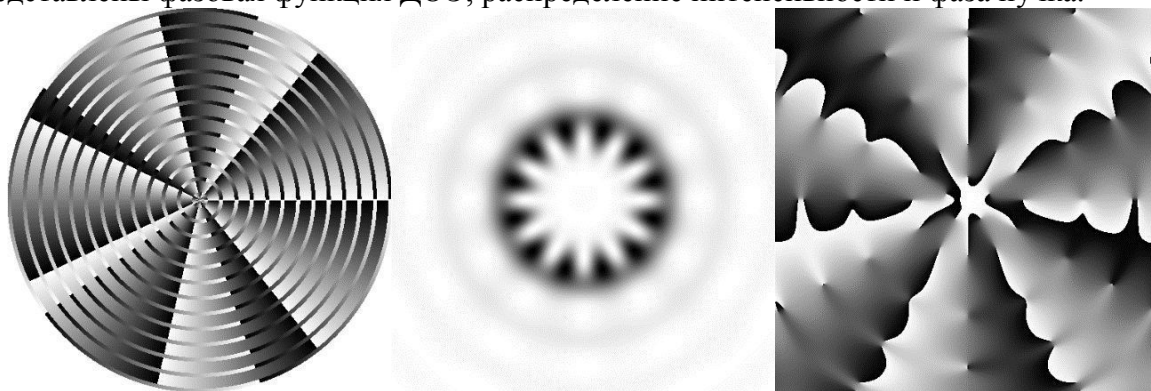


Рисунок 2 – Фазовая функция ДОЭ (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза пучка (в)

Несмотря на сложную форму пучка, движение частиц происходит по внешнему и кольцу. Однако у такой световой ловушки много способов использования – вращение не только микрочастиц и бактерий, но и более сложных объектов, например, микротурбин.

## 2. Эксперименты по вращению агломераций микрочастиц в сложных вихревых пучках

Для проверки возможности вращения микробъектов в сложных вихревых пучках был проведён ряд экспериментов. На рисунке 3 представлена схема экспериментальной установки. пучок был сфокусирован на микрочастицах полистирола диаметром 5мкм, расположенных внутри капли дистиллированной воды на поверхности стеклянной подложки. Для эксперимента был использован лазер с максимальной средней мощностью 2 Вт. Для перемещения платформы с установленной на ней кюветой использовалась система из двух шаговых двигателей, которая позволяла перемещать платформу с шагом 0,5мкм.

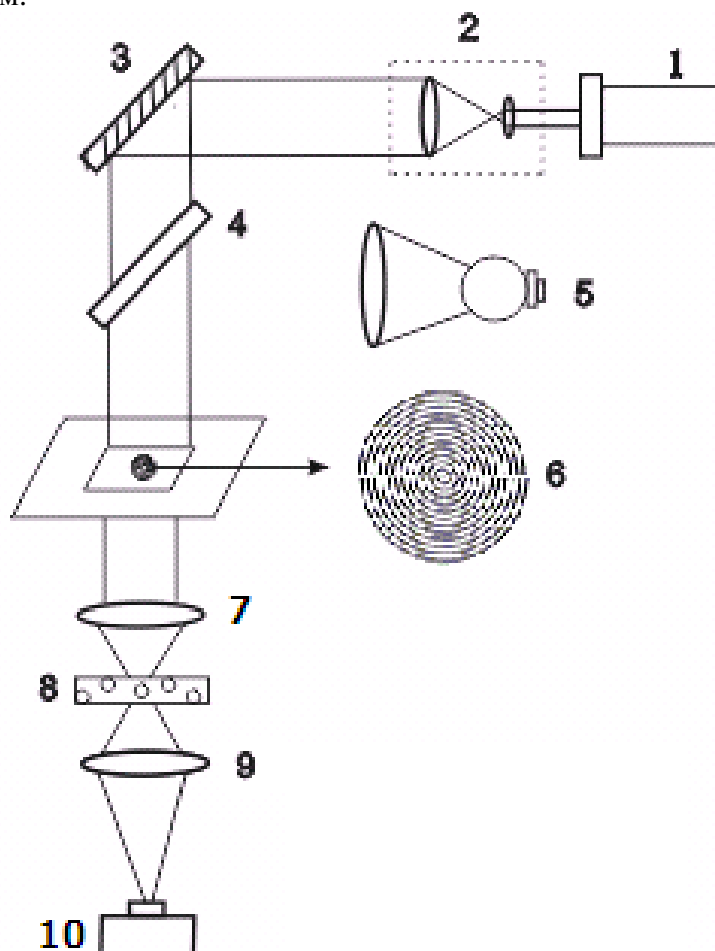


Рисунок 3 – Оптическая схема эксперимента по захвату полистироловых микробъектов в пучке. В оптической схеме введены обозначения: 1 – лазер с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью 2 Вт; 2 - коллиматор; 3, 4 – поворотные зеркала; 5 – подсветка; 6 – аксикон; 7 – фокусирующий микробъектив (16×); 8 – подложка с микрочастицами; 9 – изображающий микробъектив (32×); 10 – CCD-камера

На рисунке 4 представлены различные стадии процесса перемещения полистироловых частиц в пучке, представленном на рисунке 1б. При разной фокусировке микрочастицы полистирола попадают в области, соответствующие разному знаку орбитального углового момента пучка и поворачиваются на фиксированный угол до попадания в ближайший максимум.

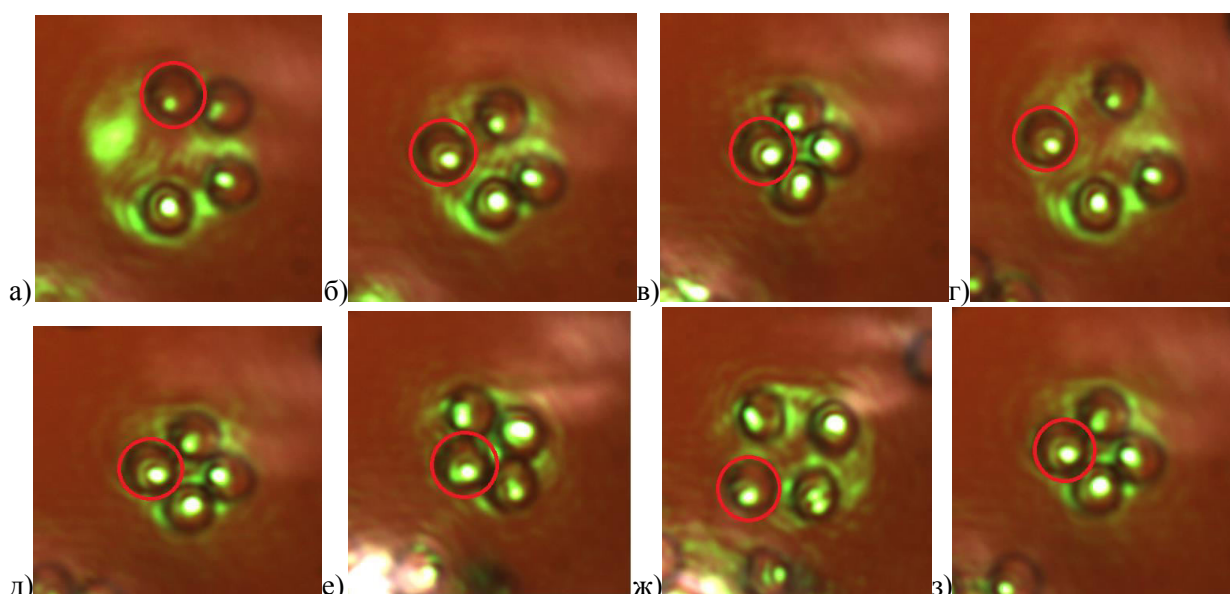


Рисунок 4 – Стадии поворота полистироловой микрочастицы, снятые с интервалом 2 с

В результате натурального эксперимента был осуществлен захват частиц полистирола и инициирован поворот группы частиц за счет фокусировки и разфокусировки светового пучка. В зависимости от того, как был сфокусирован пучок, частицы попадали в области с разными топологическими зарядами.

На рисунке 5 представлены различные стадии процесса перемещения полистироловых частиц по кольцу, снятые с интервалом 2 с.

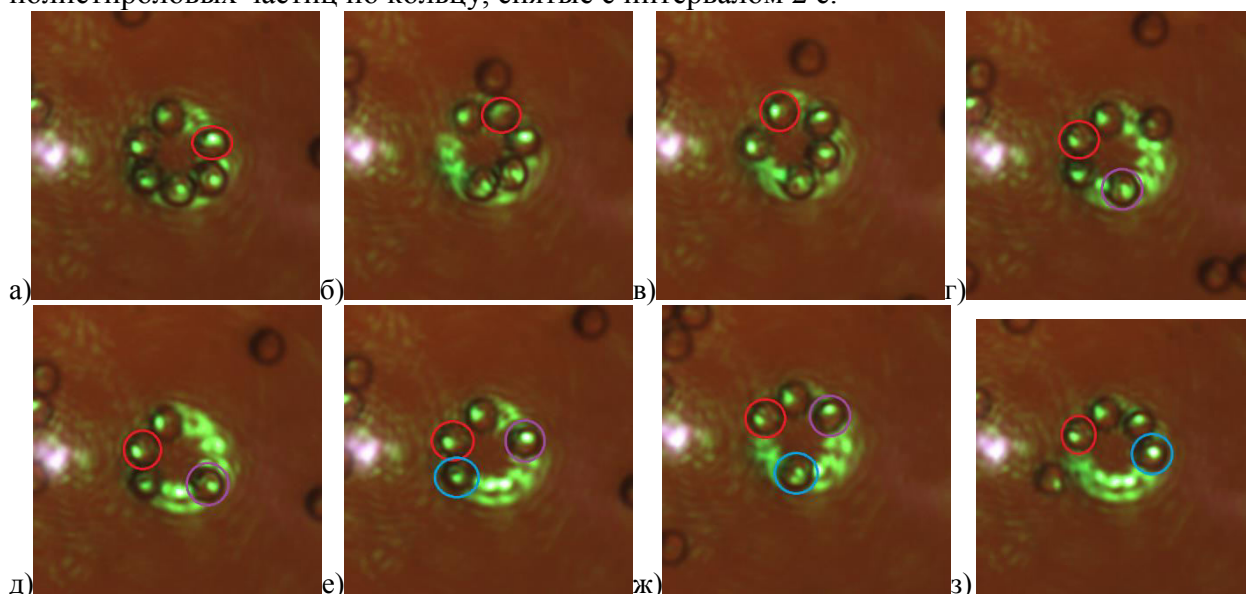


Рисунок 5 – Стадии процесса микроманипуляции полистироловой микрочастицы, снятые с интервалом 2 с

Как видно из рисунков 4, 5, наблюдается поворот группы микрочастиц в пучках, обладающих существенно некольцевой структурой. При этом на рисунке 4 поворот осуществляется в разные стороны, в зависимости от фокусировки.

#### **Заключение**

Описаны световые пучки, на основе суперпозиции вихревых световых пучков с разными топологическими зарядами. Представлены результаты экспериментов, доказывающие возможность контролируемого поворота группы микрочастиц в таких световых пучках. Показано, что при наличии в суперпозиции вихревых пучков с разным знаком топологического заряда возможен разнонаправленный поворот группы микрочастиц в зависимости от фокусировки.

## Литература

1. Bai, N. Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier / N. Bai, Ezra Ip, Y. Hang, E. Mateo, F. Yaman, M. Li, S. Bickham, S. Ten, J. Liñares, C. Montero, V. Moreno, X. Prieto, V. Tse, K. Chung, A.P.T. Lau, H. Tam, C. Lu, Y. Luo, G. Peng, G. Li, T. Wang // *Optic Express*. – 2012. – V. 20(3). – P. 2668-2680.
2. Котляр, В.В. Бесконтактное прецизионное измерение линейных смещений с использованием ДОО, формирующих моды Бесселя / В.В. Котляр, Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2001. – № 21. – С. 102-104.
3. Скиданов, Р.В. Экспериментальное исследование движения диэлектрических шариков в световых пучках с угловыми гармониками высоких порядков / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Соифер // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31, № 1. – С. 14-21.
4. Kotlyar, V.V. Diffraction of a finite-radius plane wave and a gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev, V.A. Soifer // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2007. – V. 24(7). – P. 1955-1964.
5. Abramochkin, E.G. Microobject manipulations using laser beams with nonzero orbital angular momentum / E. Abramochkin, S. Kotova, A. Korobtsov, N. Losevsky, A. Mayorova, M. Rakhmatulin and V. Volostnikov // *Laser Phys*. – 2006. – V. 16. – P. 842-848.
6. Abramochkin, E.G. Spiral light beams / E.G. Abramochkin and V.G. Volostnikov // *Phys. Usp*. – 2004. – V. 47. – P. 1177.
7. Ladavac, K. Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays / K. Ladavac and D. Grier // *Optics Express*. – 2004. – V. 12. – P. 1144-1149.
8. Lin, X.-F. A light-driven turbine-like micro-rotor and study on its light-to-mechanical power conversion efficiency Sun / Xiao-Feng Lin, Guo-Qing Hu, Qi-Dai Chen, Li-Gang Niu, Qi-Song Li, Andreas Ostendorf, and Hong-Bo // *Applied Physics Letters*. – 2012. – V. 101(11). – P. 113901.
9. Ukita, H. Rotation rate of a three-wing rotor illuminated by upward-directed focused beam in optical tweezers / Hiroo Ukita [et al.] // *Optical Review*. – 2008. – V. 15. – P. 97-104.
10. Chaumet, P.C. Coupled dipole method to compute optical torque: Application to a micropropeller / P.C. Chaumet [et al.] // *J. Appl. Phys*. – 2007. – V. 101. – P. 0231106.
11. Maruo, S. Force-controllable, optically driven micromachines fabricated by single-step two-photon microstereolithography / S. Maruo [et al.] // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2003. – V. 12. – P. 533-539.
12. Burrow, G.M. Multi-Beam Interference Advances and Applications: Nano-Electronics, Photonic Crystals, Metamaterials, Subwavelength Structures, Optical Trapping, and Biomedical Structures / G.M. Burrow, T.K. Gaylord // *Micromachines*. – 2011. – V. 2. – P. 221-257.
13. McGloin, D. 40 years of optical manipulation / D. McGloin and J.P. Reid // *Opt. Photonics News*. – 2010. – V. 21(3). – P. 20-26.
14. Котляр, В.В. Орбитальный угловой момент суперпозиции двух обобщённых лазерных пучков Эрмита–Гаусса / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 2. – С. 180-185.
15. Zhang, P. Generation and nonlinear self-trapping of optical propelling beams / P. Zhang, S. Huang, Y. Hu, D. Hernandez and Z. Chen // *Opt. Lett*. – 2010. – V. 35(18). – P. 3129-3131.
16. Khonina, S.N. Generation of rotating gauss-laguerre modes with binary-phase diffractive optics // S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 1999. – V. 46(2). – P. 227-238.
17. Kotlyar, V.V. Elliptic laguerre-gaussian beams / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.A. Almazov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Turunen // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2006. – V. 23(1). – P. 43-56.
18. Морозов, А.А. Сложные вихревые пучки для вращения микромеханических элементов / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 68-75.
19. Морозов, А.А. Вращение микротурбин в сложных вихревых пучках / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2013. Т. 37, № 2. С. 203-207.