

ОСАЖДЕНИЕ ПРОЗРАЧНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ ПОМОЩИ ПОЛЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ, СФОРМИРОВАННЫХ БИНАРНЫМИ ФАЗОВЫМИ ДОЭ

Порфирьев А.П.

Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

Предложена и исследована процедура расчёта фазовой функции дифракционных оптических элементов (ДОЭ), формирующих несколько полых световых пучков одновременно. Предложенная процедура основана на использовании суперпозиции пучков Бесселя. Представлены результаты эксперимента по захвату и осаждению микрочастиц полистирола с помощью таких пучков.

Ключевые слова: полые световые пучки, пучки Бесселя, суперпозиция пучков, бинарные дифракционные оптические элементы, оптическая схема, оптическая микроманипуляция.

Введение

Полые световые пучки представляют собой световые пучки с нулевой осевой интенсивностью вдоль оси распространения. Такие пучки, обладающие угловым моментом, могут быть использованы для решения задачи автоматической транспортировки прозрачных и непрозрачных частиц вдоль оптической оси. Для формирования одиночных полых пучков были использованы различные методы, такие, как оптическая голография [1], преобразование мод [2], методы нелинейной [3] и геометрической оптики [4], методы пространственной фильтрации [5], использование конических зеркал [6].

Нами был предложен метода расчёта фазовых бинарных ДОЭ, формирующих несколько полых световых пучков одновременно. Для этого нами рассматривается суперпозиция пучков Бесселя 0-го порядка со смещёнными осями распространения [7].

1. Метод расчёта

В [7] нами был описан способ расчёта комплексных распределений ДОЭ, формирующих заданную суперпозицию N пучков Бесселя 0-го порядка со смещёнными осями распространения

$$T(x, y) = \sum_{p=1}^N C_p \cdot \text{sgn}(J_0(\alpha_p \bar{r})) \times \exp[i(xu + yv)], \quad (1)$$

где u, v – пространственные частоты.

В общем случае фазовая составляющая комплексного распределения, вычисленная по формуле (1), имеет небинарный вид, но, при симметричном относительно оси расположении пучков с одинаковыми параметрами и коэффициентами C_p , фазовая функция принимает бинарный вид.

При использовании вещественных коэффициентов C_p можно получить набор световых ловушек типа световая «бутылка». Если же коэффициенты C_p – комплексные числа, то могут быть рассчитаны ДОЭ, формирующие массив полых световых пучков. Для получения фазовых бинарных элементов полученное по формуле (1) комплексное распределение подвергалось кодированию амплитуды [8], затем

фазовому кодированию [9]. Расчёт дифракционной эффективности описан в [8].

2. Расчёт элементов

Для формирования двух полых пучков мы использовали схему расположения суперпозиций соосных пучков Бесселя, представленную на рис. 1. В данном случае рассматривается суперпозиция 42 пучков Бесселя. Данная схема выбрана для формирования двух полых пучков кольцеобразной формы, поэтому центры пучков находятся на окружности. Пунктирной стрелкой обозначено направление линейного роста значений фазы коэффициентов C_k для соответствующих пучков. Такой выбор фаз коэффициентов позволил добиться того, чтобы формируемые полые световые пучки не «закрывались», образуя тем самым световую «бутылку», как описано в [7]. Фазы коэффициентов C_k возрастали от значения 0 радиан до $52/14\pi$. Модули коэффициентов C_k для всех пучков были равны 1.

В результате кодирования амплитуды была получена фазовая функция, представленная на рис. 2а. Число уровней фазы в данном случае составило 7. После кодирования фазы мы получили бинарный ДОЭ, фаза которого представлена на рис. 2б.

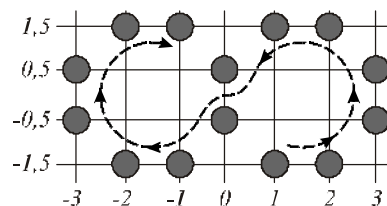


Рис. 1. Схема расположения пучков для формирования двух полых световых пучков

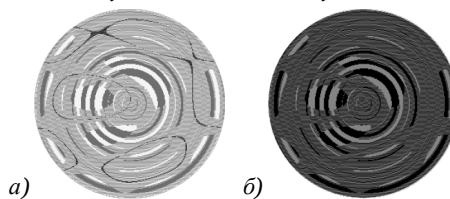


Рис. 2. Фазы ДОЭ, формирующего два полых световых пучка

Результаты моделирования прохождения плоской волны через рассчитанный ДОЭ представлены

на рис. 3. Радиус освещающего пучка равен 2 мм. Дифракционная эффективность формирования светового поля в виде «восьмёрки» равнялась 81%.

Аналогично могут быть рассчитаны фазовые функции элементов, формирующих большее число полых световых пучков, распространяющихся под малым углом друг к другу.

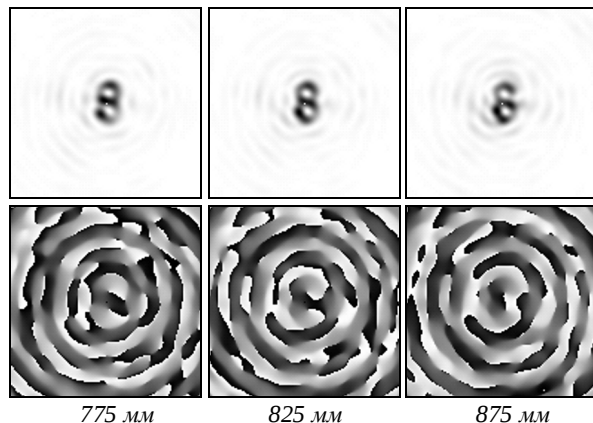


Рис. 3. Распределения интенсивности (негативные изображения) (верхний ряд) и фазы (нижний ряд), формируемые ДОЭ с фазовой функцией, представленной на рис. 2б

3. Эксперимент по захвату частиц полистирола

Для экспериментов по оптическому захвату и осаждению частиц полистирола диаметром 5 мкм была использована установка, оптическая схема которой представлена на рис. 4.

В оптической схеме введены обозначения L – твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и максимальной средней мощностью 2 Вт. M1, M2, M3 – поворотные зеркала, I – лампа осветителя, L1 – фокусирующий микрообъектив (8×), L2 – изображающий микрообъектив (20×), DOE – дифракционный оптический элемент, CCD – видеокамера (MSDE с разрешением 1280×1024.), V – кювета с микрообъектами.

На рис. 5 представлены стадии движения двух микрошаров в двух полых пучках одновременно с интервалом в 2 с. На рис. 6 представлены стадии движения трёх микрошаров в трёх полых пучках

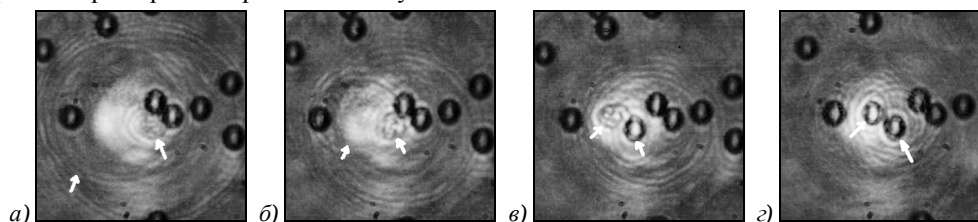


Рис. 5. Стадии движения двух полистироловых микрошаров, попавших в область двух сформированных полых пучков (белыми стрелочками отмечены края захватываемых частиц)

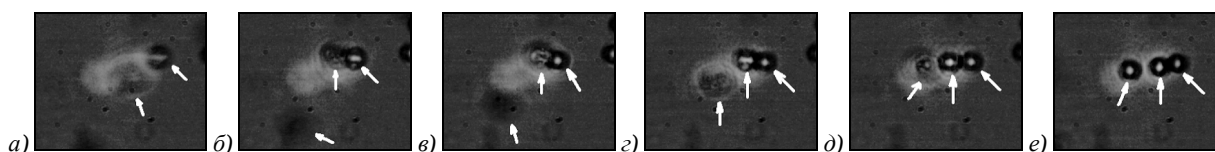


Рис. 6. Стадии движения трёх полистироловых микрошаров, попавших в область трёх сформированных полых пучков (белыми стрелочками отмечены края захватываемых частиц)

одновременно с интервалом времени 2 с (между кадрами на рис. 6д и рис. 6е интервал времени 4 с).

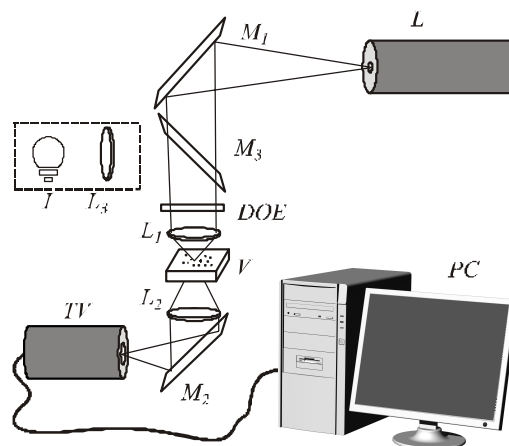


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента по захвату и осаждению частиц полистирола

Как видно из рис. 5 – 6, частицы, попав в область ловушки в плоскости, удалённой от плоскости наблюдения (в этой области изображение частиц размыто), начинают движение вдоль светового пучка и осаждаются на дно кюветы.

Заключение

Описан метод расчёта бинарных фазовых элементов для формирования массивов полых световых пучков, в основе которого лежит использование суперпозиция пучков Бесселя нулевого порядка. Рассмотрен расчёт элементов, формирующих набор из двух полых пучков. Представлены результаты эксперимента с изготовленными из кварца ДОЭ, демонстрирующие захват и осаждение нескольких частиц одновременно.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-4128.2012.9, грантов РФФИ №№ 10-07-00109, 10-07-00553, 11-07-13164 и 11-07-00153, а также Государственных контрактов № 02.740.11.0805, 07.514.11.4055, 07.514.11.4060 и № 14.740.11.0016.

Литература

1. **Lee, H.S.** Holographic nondiverging hollow beam / H.S. Lee, B.W. Stewart, K. Choi, H. Fenichel // *Phys. Rev.* – 1994. – Vol. 496, N 6. – P. 4922-4927.
2. **Wang, X.** Laser cavity for generation of variable-radius rings of light / X. Wang, M.G. Littman // *Optics Letters.* – 1993. – Vol. 18, N 10. – P. 767-768.
3. **Tikhonenko, V.** Excitation of vortex solitons in a Gaussian beam configuration / V. Tikhonenko, N.N. Akhmediev // *Opt. Commun.* – 1996. – Vol. 126, N 1-3. – P. 108-112.
4. **Herman, R.M.** Production and uses of diffractionless beams / R.M. Herman, T.A. Wiggins // *J. Opt. Soc. Am.* – 1991. – Vol. 8. – P. 932-942.
5. **Zhengjun, L.** Generation of hollow Gaussian beams by spatial filtering / L. Zhengjun, Z. Haifa, L. Jianlong, L. Jie, A.A. Muhammad, L. Shutian // *Optics Letters.* – 2007. – Vol. 32, N 15. – P. 2076-2078.
6. **Yin, J.P.** Generation of a dark hollow beam by a small hollow fiber / J.P. Yin, H.R. Noh, K.I. Lee, K.H. Kim, Y.Z. Wang, W. Jhe // *Opt. Commun.* – 1997. – Vol. 138, N 4-6. – P. 287-292.
7. **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.
8. **Котляр, В.В.** Кодирование дифракционных оптических элементов методом локального фазового скачка / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, А.С. Мелехин, В.А. Соифер // *Компьютерная оптика.* – 1999. – Вып. 19. – С. 54-64.
9. **Скиданов, Р.В.** Оптическая микроманипуляция с использованием бинарных фокуаторов / Р.В. Скиданов, А.П. Порфирьев // *Компьютерная оптика.* – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 214-218.

References

1. **Lee, H.S.** Holographic nondiverging hollow beam / H.S. Lee, B.W. Stewart, K. Choi, H. Fenichel // *Phys. Rev.* – 1994. – Vol. 496, N 6. – P. 4922-4927.
2. **Wang, X.** Laser cavity for generation of variable-radius rings of light / X. Wang, M.G. Littman // *Optics Letters.* – 1993. – Vol. 18, N 10. – P. 767-768.
3. **Tikhonenko, V.** Excitation of vortex solitons in a Gaussian beam configuration / V. Tikhonenko, N.N. Akhmediev // *Opt. Commun.* – 1996. – Vol. 126, N 1-3. – P. 108-112.
4. **Herman, R.M.** Production and uses of diffractionless beams / R.M. Herman, T.A. Wiggins // *J. Opt. Soc. Am.* – 1991. – Vol. 8. – P. 932-942.
5. **Zhengjun, L.** Generation of hollow Gaussian beams by spatial filtering / L. Zhengjun, Z. Haifa, L. Jianlong, L. Jie, A.A. Muhammad, L. Shutian // *Optics Letters.* – 2007. – Vol. 32, N 15. – P. 2076-2078.
6. **Yin, J.P.** Generation of a dark hollow beam by a small hollow fiber / J.P. Yin, H.R. Noh, K.I. Lee, K.H. Kim, Y.Z. Wang, W. Jhe // *Opt. Commun.* – 1997. – Vol. 138, N 4-6. – P. 287-292.
7. **Skidanov, R.V.** Generation of optical bottle beams array by superposition Bessel beams / R.V. Skidanov, A.P. Porfirev // *Computer Optics.* – 2012. – Vol. 36, N 1. – P. 80-90. – (In Russian).
8. **Kotlyar, V.V.** Encoding of diffractive optical elements by local phase jump method / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.S. Melekhin, V.A. Soifer // *Computer Optics.* – 1999. – Vol. 19. – P. 54-64. – (In Russian).
9. **Skidanov, R.V.** Optical micromanipulation with using binary focusator / R.V. Skidanov, A.P. Porfirev // *Computer Optics.* – 2010. – Vol. 34, N 2. – P. 214-218. – (In Russian).

HOLLOW OPTICAL BEAMS FORMED BY BINARY PHASE ELEMENT FOR PRECIPITATION OF TRANSPARENT MICROPARTICLES

A.P. Porfirev

Image Processing Systems Institute of the RAS,

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

We propose and analyze technique for generation hollow optical beams array by diffractive optical elements (DOE). This technique is based on superposition Bessel beams. Experimental results are presented of optical trapping and precipitation of polystyrene microparticles

Key words: hollow optical beams, Bessel beams, superposition beams, binary diffractive optical element, experimental setup, optical micromanipulation.

Сведения об авторе

Порфирьев Алексей Петрович, 1987 года рождения. Магистр прикладных математики и физики (2010), аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, стажёр-исследователь ИСОИ РАН. Область научных интересов – дифракционная оптика, оптическая микроманипуляция.

E-mail: lporfirev@rambler.ru.

Alexey Petrovich Porfirev (b. 1987). Master of applied mathematics and physics (2010), postgraduate student of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev, probationer-researcher of the Image Processing System Institute of RAS. Research interests: diffractive optics, optical micromanipulation.