

ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВА ПОЛЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ

Порфирьев А.П., Скиданов Р.В.

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

Аннотация

Описан метод расчёта дифракционных оптических элементов для формирования систем полых световых пучков. Представлены эксперименты по осаждению из водной взвеси микрочастиц массивами полых пучков для процесса их позиционирования.

Ключевые слова: полые световые пучки, пучки Бесселя, бинарные дифракционные оптические элементы, осаждение микрочастиц, прозрачные микрочастицы.

Введение

Простейший оптический пинцет, состоящий из лазерного луча, остро сфокусированного с помощью микрообъектива с высокой числовой апертурой в плоскости объекта [1], позволяет захватывать и перемещать объекты как в поперечном, так и в продольном направлении вдоль оптической оси. Однако если необходимо решить задачу позиционирования большого количества микрочастиц, то перемещение частиц по одной является долгим и технически сложным процессом. Так, если указанный процесс осуществляется в кювете, содержащей взвесь микрочастиц, то на дне кюветы концентрация микрочастиц относительно невелика, тогда как в придонном слое их количество на порядок больше. Для использования в процессе создания структур на дне кюветы этих микрочастиц необходимо формировать пучки, сохраняющие структуру при распространении в свободном пространстве [2]. Такими пучками являются пучки Бесселя. При этом все пучки Бесселя, кроме пучка Бесселя нулевого порядка, являются полыми.

Полые световые пучки представляют собой световые пучки с нулевой осевой интенсивностью вдоль оси распространения. Благодаря конфигурации полового светового пучка он является универсальной световой ловушкой как для прозрачных, так и для непрозрачных микрочастиц. Для формирования одиночных полых пучков были использованы различные методы, такие как оптическая голография [3], преобразование мод [4], методы нелинейной [5–6] и геометрической оптики [7], методы пространственной фильтрации [8], фазовая фильтрация [9], использование полых волокон [10], использование конических зеркал [11] и линз [12]. В [13] приводится сравнительный анализ полых световых пучков, сформированных с помощью бинарного и многоуровневого пространственных модуляторов света, и авторы отмечают возможность использования бинарного модулятора света для динамической манипуляции «холодными» атомами. В работах [14–16] рассматриваются полые световые пучки, сформированные с помощью рассчитанных на компьютере голограмм.

Полые световые пучки также использовались для сортировки прозрачных микрочастиц [17]. Идея использовать структурированный пучок для

построения структур из микрочастиц рассматривается в работе [18].

В настоящей работе решается задача формирования массива полых световых трубок, которые можно было бы использовать для одновременной транспортировки нескольких частиц вдоль оси распространения пучка. Для этого предлагается использовать метод расчёта бинарной фазовой функции дифракционного оптического элемента, основанный на рассмотрении суперпозиции пучков Бесселя 0-го порядка со смещёнными осями распространения. Данный метод позволяет рассчитывать массивы соприкасающихся полых световых пучков, т.е. захваченные в них частицы должны двигаться по траекториям, расположенным в непосредственной близости друг от друга.

1. Метод расчёта и расчёт ДОЭ для формирования массива световых полых пучков

Как известно, пучки Бесселя и их суперпозиции способны сохранять свою поперечную структуру при распространении на большом расстоянии вдоль оптической оси [19–21].

Метод расчёта полых световых пучков для оптического захвата подробно описан в [22]. Единственное отличие в том, что в [22] формировались световые «бутылки», т.е. световые ловушки, замкнутые по всем трём координатам, при расчёте же световых трубок этой необходимости нет.

Фазовая функция элемента, формирующего суперпозицию N одномодовых пучков Бесселя с пространственно разделёнными осями распространения, будет иметь вид:

$$T(x, y) = \sum_{k=1}^N C_k \cdot \operatorname{sgn} \left(J_{n_k} \left(\alpha_{m_k} \left(\vec{r}_k - \vec{r}_{k0} \right) \right) \right) \times \exp(i n_k \phi) \exp \left[i \left(x u_x + y v_y \right) \right], \quad (1)$$

где x, y – декартовы координаты в плоскости ДОЭ, u_x, v_y – координаты центра пучка Бесселя в плоскости, находящейся на расстоянии z_0 от входной плоскости, C_k – комплексные коэффициенты.

В качестве конкретной задачи рассмотрим расчёт фазового элемента, формирующего два соприкасающихся параллельных полых пучка.

Для этого рассмотрим суперпозицию трёх соосных пучков Бесселя 0-го порядка, с номерами корней функций Бесселя $m_1=8, m_2=9, m_3=10$, соответственно. Длина волны излучения $\lambda=532$ нм, радиус

ДОЭ $R=3$ мм, расстояние $z_0=800$ мм. Как видно из рис. 1, заданная суперпозиция пучков образует осевую линию, на которую приходится до 94% световой энергии пучка.

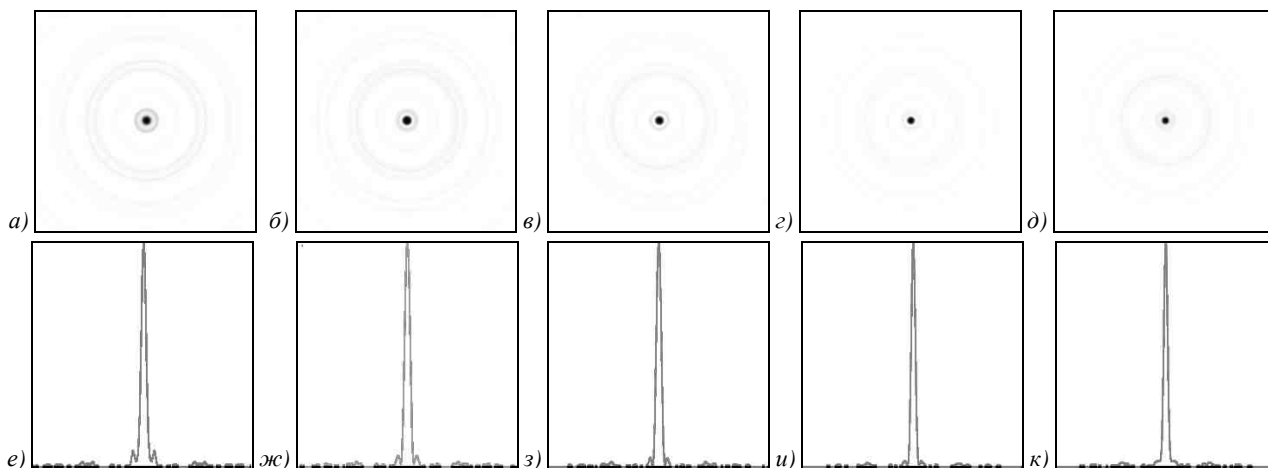


Рис. 1. Распределения интенсивности (верхний ряд, негативные изображения) и соответствующие им сечения (нижний ряд) для суперпозиции трёх пучков Бесселя 0-го порядка на различных расстояниях от плоскости ДОЭ (775 мм, 800 мм, 825 мм, 850 мм, 875 мм, соответственно)

В уравнении (3) квадрат модуля комплексного коэффициента C_k задаёт интенсивность светового пучка в плоскости, находящейся на расстоянии z_0 от плоскости элемента, а его фаза – фазовый сдвиг пучка. Поэтому если располагать представленные на рис. 2 пучки вдоль произвольной замкнутой кривой и каждому из них поставить в соответствие специальным образом выбранный коэффициент C_k , то можно добиться формирования кривой с заданным амплитудно-фазовым распределением, которая при распространении вдоль оси будет сохранять свой профиль.

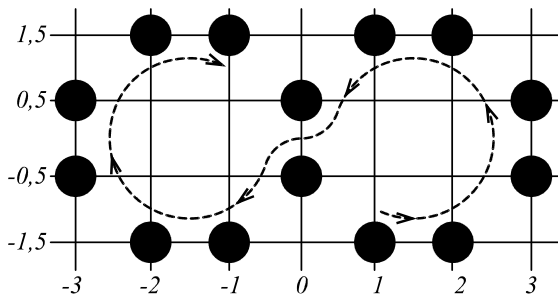


Рис. 2. Схема расположения пучков для формирования двух полых световых пучков

Для формирования двух полых пучков используем следующую схему расположения рассчитанных выше суперпозиций соосных пучков Бесселя, представленную на рис. 3. Отметим, что в данном случае рассматривается суперпозиция 42 пучков Бесселя, которые фактически разбиты на 14 пучков, каждый из которых, в свою очередь, является суперпозицией упомянутых выше трёх соосных пучков Бесселя 0-го порядка. Пунктирной стрелкой обозначено направление линейного роста значений фазы коэффициентов C_k для соответствующих пучков. Таким образом, фазы коэффициентов C_k возрастали от значения 0 радиан для пучков с координатами (1, -1,5) до значения

$52/14\pi$ для пучков с координатами (-1, 1,5). Модули коэффициентов C_k для всех пучков были равны 1.

Элемент, формирующий заданную суперпозицию пучков, имеет амплитудно-фазовое распределение. При его кодировании значение амплитуды, выше которой операция кодирования не применялась, равнялось 0,2. Полученная в результате фазовая функция представлена на рис. 3а. Число уровней фазы в данном случае составило 7. После дискретизации получается бинарный ДОЭ, фаза которого представлена на рис. 3б.

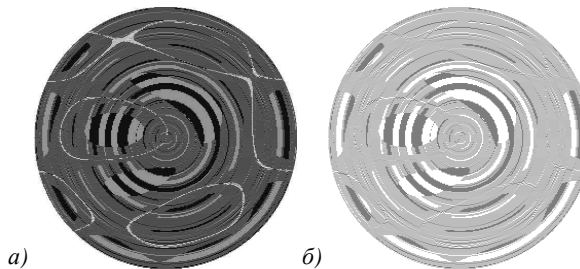


Рис. 3. Фазы ДОЭ, формирующего два полых световых пучка: фаза многоуровневого ДОЭ (а), фаза бинарного ДОЭ (б)

Результаты моделирования прохождения плоской волны через рассчитанный ДОЭ представлены на рис. 4. Радиус освещающей ДОЭ плоской волны равен 2 мм. Для вычисления комплексного распределения светового поля на расстоянии z от ДОЭ использовалось преобразование Френеля, реализованное на базе алгоритма быстрого преобразования Фурье. Дифракционная эффективность формирования светового поля в виде «восьмёрки», получающегося в результате рассмотрения сечения двух полых пучков, составила 81%.

В результате моделирования получены распределения интенсивности, представленные на рис. 4.

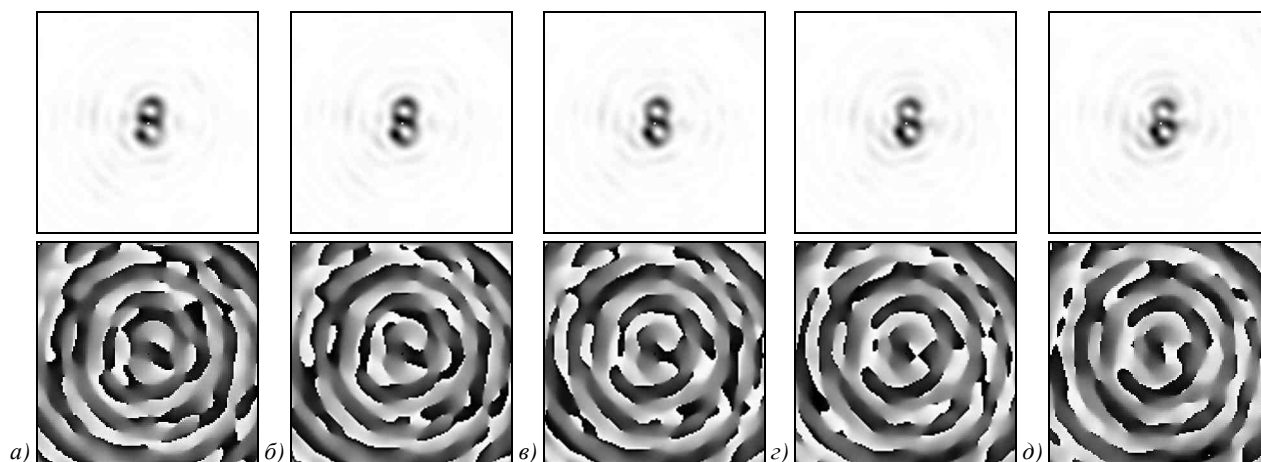


Рис. 4. Распределения интенсивности (верхний ряд) (негативное изображение) и фазы (нижний ряд), формируемые ДОО с фазовой функцией, представленной на рис. 3б, на различных расстояниях от ДОО: 775 мм (а), 800 мм (б), 825 мм (в), 850 мм (г), 875 мм (д)

Аналогично могут быть рассчитаны фазовые функции элементов, формирующих большее число параллельных полых световых пучков. В этих случаях рассчитанные по формуле (1) фазовые распределения могут оказаться многоуровневыми. Это будет происходить тогда, когда коэффициенты C_k пучков, располагающихся в симметричных относительно начала координат порядках, не будут комплексно-сопряжёнными. Для случаев формирования любого чётного количества полых пучков можно рассчитать фазовую функцию бинарного вида, но, как показало моделирование прохождения плоской волны через такие ДОО, это не всегда даёт лучший результат в отношении качества формируемых полых пучков. Поэтому при расчёте оценивалось только качество формируемых пучков (равномерность линии и ошибка формирования). В зависимости от того, когда получается лучший с точки зрения качества формирования световых пучков результат, для приведения фазы ДОО к бинарному виду использовалась одна из упомянутых выше процедур.

Таким образом, для фазы, формирующей три полых пучка, сначала выполнялось кодирование

амплитуды с уровнем кодирования 0,2, а затем процедура кодирования фазы с частотой несущей 10000 лин/м. Соответствующая фаза представлена на рис. 5. Радиус ДОО $R=2$ мм.

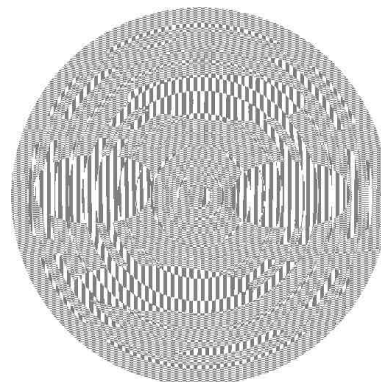


Рис. 5. Фаза ДОО, формирующего три полых световых пучка

Результаты моделирования прохождения через такой ДОО плоской волны радиусом 2 мм представлены на рис. 6. Это один из двух формируемых порядков.

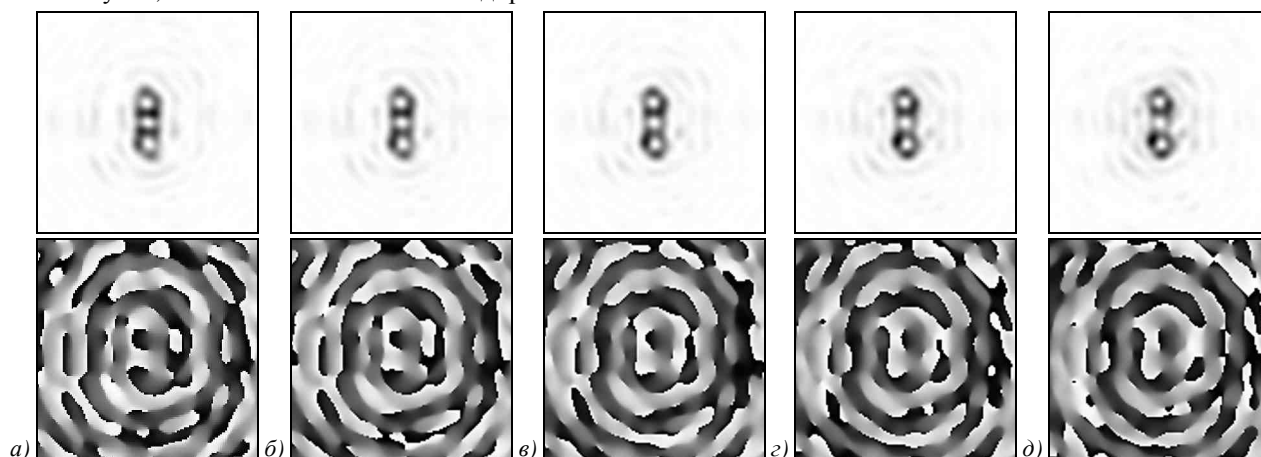


Рис. 6. Распределения интенсивности (верхний ряд) (негативное изображение) и фазы (нижний ряд), формируемые ДОО с фазовой функцией, представленной на рис. 5, на различных расстояниях от ДОО: 775 мм (а), 800 мм (б), 825 мм (в), 850 мм (г), 875 мм (д)

Для случая формирования четырёх полых пучков, как было указано выше, подходящим выбором коэффициентов C_k можно добиться, чтобы рассчитанная комплексная амплитуда имела бинарный вид фазового распределения (рис. 7).

Но в этом случае световые пучки, формируемые даже амплитудно-фазовым ДОЭ без всякого кодирования, будут низкого качества (рис. 8).

Для более равномерного формирования полых пучков коэффициенты C_k были подобраны иначе, в результате чего фаза оказалась многоуровневой (рис. 9а), и после её дискретизации и кодирования (уровень кодирования 0,2) была получена бинарная фаза (рис. 9б), которая на различных расстояниях от плоскости ДОЭ формирует распределения светового поля. Эти распределения представлены на рис. 10. Видно, что в этом случае результат получился лучше, чем с амплитудно-фазовым ДОЭ, представленным на рис. 8. Радиус рассчитанного ДОЭ также, как и для случая формирования трёх пучков равен, $R=2$ мм.

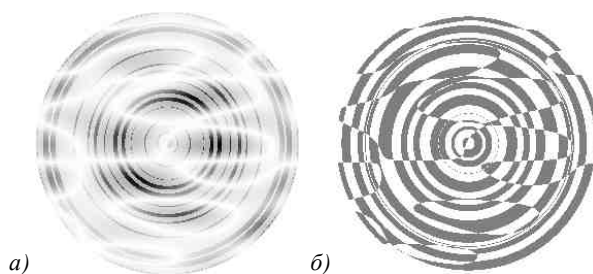


Рис. 7. Амплитуда (а) и фаза (б) ДОЭ, формирующего четыре световых полых пучка

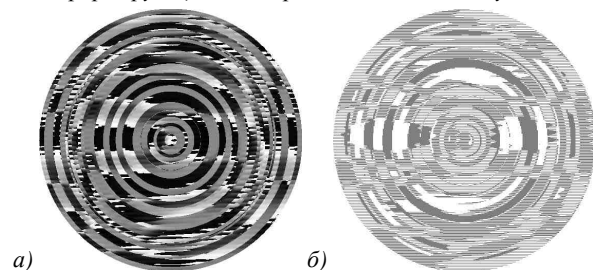


Рис. 9. Фазы ДОЭ, формирующего четыре световых полых пучка: фаза многоуровневового ДОЭ (а), фаза бинарного ДОЭ (б)

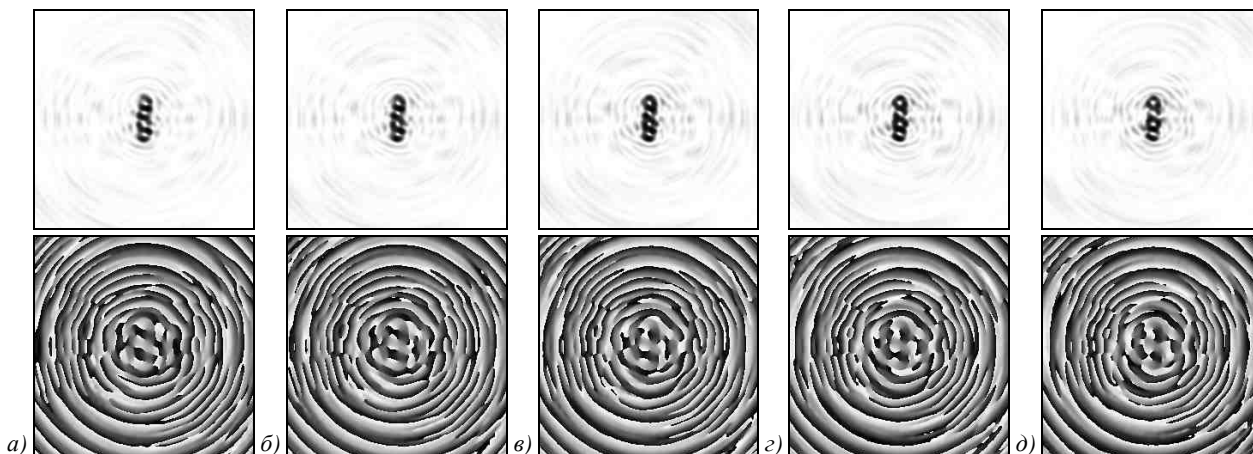


Рис. 8. Распределения интенсивности (верхний ряд) (негативное изображение) и фазы (нижний ряд), формируемые амплитудно-фазовым ДОЭ, представленным на рис. 7, на различных расстояниях от ДОЭ: 775 мм (а), 800 мм (б), 825 мм (в), 850 мм (г), 875 мм (д)

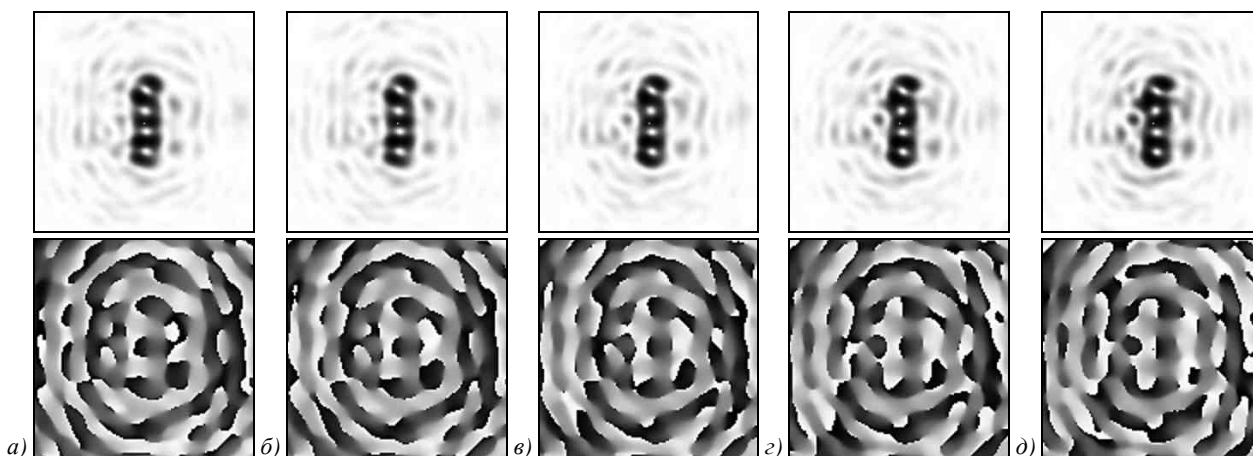


Рис. 10. Распределения интенсивности (верхний ряд) (негативное изображение) и фазы (нижний ряд), формируемые фазовым ДОЭ, представленным на рис. 9б, на различных расстояниях от ДОЭ: 775 мм (а), 800 мм (б), 825 мм (в), 850 мм (г), 875 мм (д)

К сожалению, дифракционная эффективность, как и качество формирования полых пучков, падает при увеличении их числа. Так, для трёх пучков эффективность равна 66% (если рассматривать оба порядка), а для четырёх – уже 46%. Также на представленных выше изображениях распределений интенсивности видно, что структура формируемых пучков для случая четырёх пучков хуже, чем для трёх или двух. Таким образом, рассмотренный подход позволяет получить хорошие результаты только при формировании относительно небольшого числа полых световых трубок.

2. Эксперимент по формированию нескольких полых световых пучков

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 11. Нами был использован твердотельный лазер с длиной волны излучения 532 нм и расходимостью пучка 1,2 мрад. Две линзы, образующие коллиматор, были использованы для расширения пучка. Апертура обрезала пучок до нужного диаметра. Камера использовалась для съёмки формируемых распределений интенсивности на различных расстояниях вдоль оси распространения пучка.

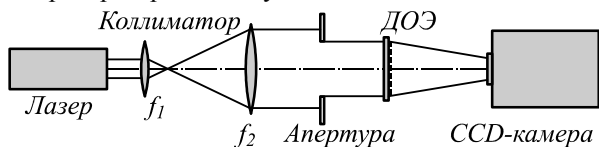


Рис. 11. Оптическая схема эксперимента

На рис. 12–14 приведены результаты эксперимента с элементами, фазовые функции которых представлены на рис. 3б, 5, 9б. Соответствующие результаты моделирования показаны на рис. 6, 8, 10.

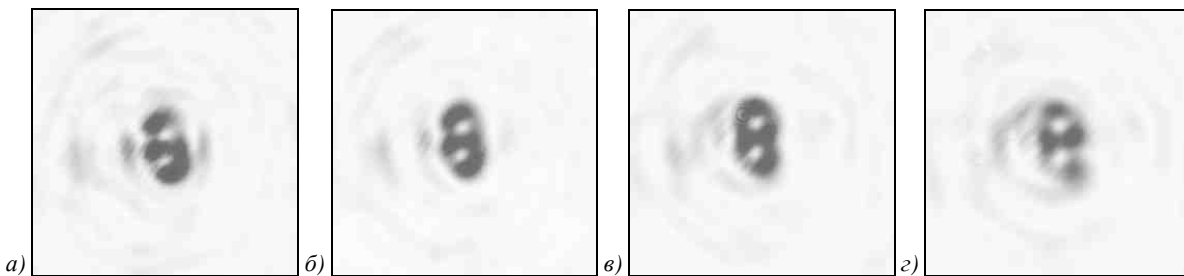


Рис. 12. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего два полых световых пучка: 675 мм (а), 725 мм (б), 775 мм (в), 825 мм (г) (негативное изображение)

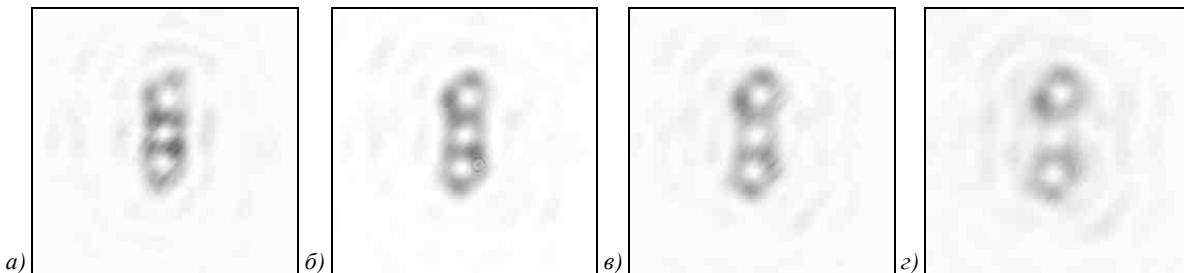


Рис. 13. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего три полых световых пучка: 675 мм (а), 725 мм (б), 775 мм (в), 825 мм (г) (негативное изображение)

Небольшие сдвиги в расстояниях, на которых формируются ловушки, вызваны как исходной расходимостью лазерного пучка, так и расходимостью пучка, возникшей из-за неточной коллимации.

3. Эксперимент по оптическому захвату и осаждению микрочастиц на дно кюветы

Полые световые пучки выглядят как некие световые трубки только в том случае, если рассматривать их свободное распространение после ДОЭ. При фокусировке эти пучки становятся своеобразными световыми воронками, которыми очень удобно осаждать микрочастицы из суспензии на дно подложки (рис. 15).

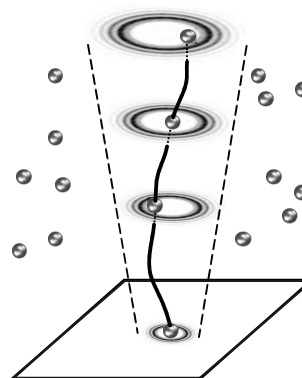


Рис. 15. Процесс осаждения микрочастиц из водной суспензии на оптическую подложку

Использование нескольких рядом расположенных полых пучков позволяет одновременно с осаждением располагать микрочастицы в нужном порядке.

Для проведения эксперимента была использована оптическая схема, приведённая на рис. 16.

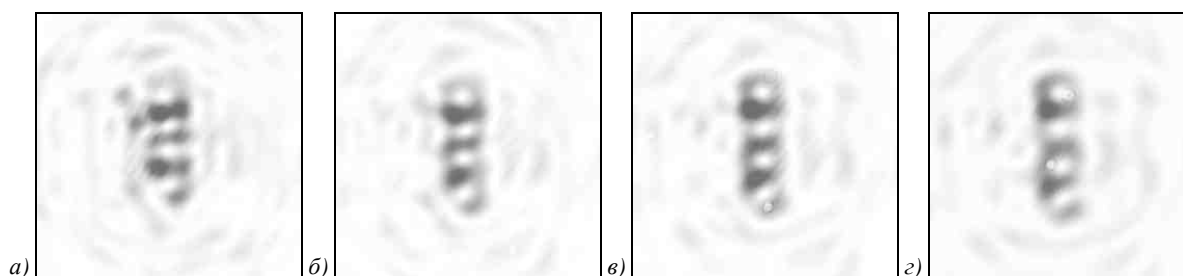


Рис. 14. Распределение интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего четыре полых световых пучка: 675 мм (а), 725 мм (б), 775 мм (в), 825 мм (г) (негативное изображение)

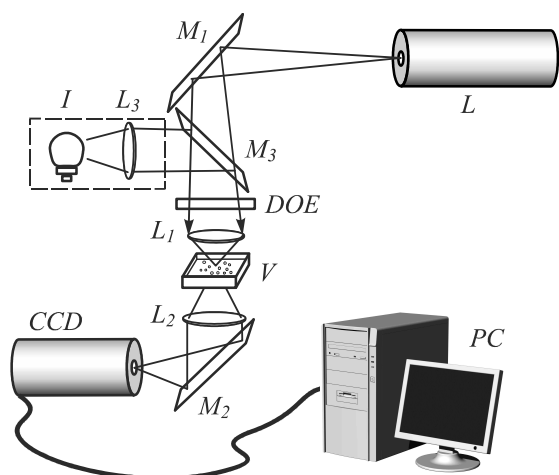


Рис. 16. Оптическая схема эксперимента по осаждению полистироловых микрообъектов в полых пучках

В оптической схеме введены обозначения: L – твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и максимальной средней мощностью 2000 мВт. M_1 , M_2 , M_3 – поворотные зеркала, I – лампа осветителя, L_1 – фокусирующий микрообъектив (8 \times), L_2 – изображающий микрообъектив (20 \times), DOE – дифракционный оптический элемент, CCD – видекамера, V – кювета с микрообъектами. В эксперименте была использована CCD ВИДЕОСКАН 2020 с разрешением 1600 \times 1200 пикселей.

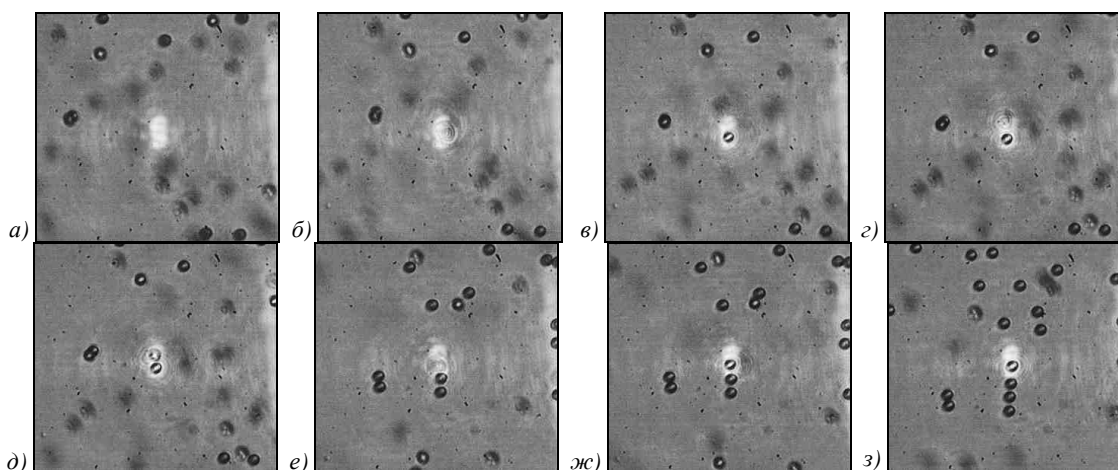


Рис. 17. Стадии процесса осаждения выстраивания в линию группы полистироловых микрочастиц: начальное состояние подложки (а), начало осаждения первой микрочастицы (б), окончание осаждения первой микрочастицы (в), начало осаждения второй микрочастицы (г), окончательное осаждение второй микрочастицы (д), начало осаждения третьей микрочастицы (е), окончательное осаждение третьей микрочастицы (ж), осаждение четвёртой микрочастицы (з)

На рис. 17 показаны стадии осаждения и позиционирования полистироловых микрочастиц в двойном полем пучке.

Как видно из рис. 17, с помощью полых пучков осуществляется быстрый процесс выстраивания в линию микрочастиц. При этом нет необходимости в больших перемещениях захватывающего пучка в сторону, т.к. микрочастицы сами попадают в ловушку.

Заключение

Представленный в работе метод формирования массивов полых пучков позволяет создавать произвольную конфигурацию универсальных световых ловушек, имеющих определённую устойчивость при распространении в свободном пространстве.

Возможность формирования массива таких ловушек позволяет существенно упростить процедуру позиционирования групп микрообъектов. Представленные в работе результаты экспериментов убедительно это доказывают.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения о предоставлении гранта от 15.06.2012 № 14.В37.21.0239 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и гранта РФФИ №12-07-31075.

Литература

1. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Opt. Lett.* – 1986. – Vol. 11, N 5. – P.288-290.
2. **Скиданов, Р.В.** Самовоспроизводящиеся лазерные пучки и их применение / Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика.* – 2006. – Т. 29. – С. 4-23.
3. **Lee, H.S.** et al. Holographic nondiverging hollow beam / H.S. Lee [et al.] // *Phys. Rev.* – 1994. – V. 49. – P. 4922-4927.
4. **Wang, X.** Laser cavity for generation of variable-radius rings of light / X. Wang, M.G. Littman // *Opt. Lett.* – 1993. – V. 18, N 10. – P. 767.
5. **Tikhonenko, V.** Excitation of vortex solitons in a Gaussian beam configuration / V. Tikhonenko and N.N. Akhmediev // *Opt. Commun.* – 1996. – Vol. 126. – P. 108-112.
6. **Mamaev, A.V.** Vortex Evolution and Bound Pair Formation in Anisotropic Nonlinear Optical Media / A.V. Mamaev, M. Saffman and A.A. Zozulya // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol. 77. – P. 4544-4547.
7. **Herman, R.M.** Production and uses of diffractionless beams / R.M. Herman, T.A. Wiggins // *J. Opt. Soc. Am.* – 1991. – V. 8. – P. 932-942.
8. **Liu, Zh.** Generation of hollow Gaussian beams by spatial filtering / Zhengjun Liu, Haifa Zhao, Jianlong Liu, Jie Lin, Muhammad Ashfaq Ahmad and Shutian Liu // *OPTICS LETTERS.* – 2007. – Vol. 32, N 15, August 1. – P. 6417-6424.
9. **Liu, Zh.** Generation of dark hollow beam by use of phase-only filtering / Zhengjun Liu, Haifa Zhao, Jianlong Liu, Jie Lin, Muhammad Ashfaq Ahmad and Shutian Liu // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2009. – Vol. 47. – P. 1250-1253.
10. **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 and W. Jhe // *Opt. Commun.* – 1997. – Vol. 138. – P. 287-296.
11. **Mishra, S.R.** Generation of hollow conic beams using a metal axicon mirror / Satya Ram Mishra, Sanjiv K. Tiwari, Surjya P. Ram, Shrikant C. Mehendale // *Optical Engineering.* – 2007, August. – Vol. 46(8). – P. 084002.
12. **de Angelisa, M.** Axially symmetric hollow beams using refractive conical lenses / M. de Angelisa, L. Cacciapuoti, G. Pierattinia, G.M. Tino // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2003. – Vol. 39. – P. 283-291.
13. **Fatemi, F.K.** Generation of hollow beams by using a binary spatial light modulator / Fredrik K. Fatemi and Mark Bashkansky // *OPTICS LETTERS.* – 2006. – Vol. 31, N 7, April 1. – P. 1-5.
14. **Khonina, S.N.** The phase rotor filter / S.N. Khonina [et al.] // *J. Mod. Opt.* – 1992. – V. 39, N 5. – P. 1147-1154.
15. **Khonina, S.N.** Trochoso / S.N. Khonina [et al.] // *Opt. Commun.* – 1992. – V. 91, N 3-4. – P. 158-162.
16. **Paterson, C.** Higher-order Bessel waves produced by axicon-type computer-generated holograms / C. Paterson, R. Smith // *Opt. Commun.* – 1996. – V. 124, N 1-2. – P. 121-130.
17. **Cizmar, T.** Generation of multiple Bessel beams for a biophotonics workstation / T. Cizmar, V. Kollarova, X. Tsampoula, F. Gunn-Moore, W. Sibbett, Z. Bouchal, and K. Dholakia // *Optics Express.* – 2008. – V. 16, Issue 18. – P. 14024-14035.
18. **Woerdemann, M.** Optical assembly of microparticles into highly ordered structures using Ince-Gaussian beams / M. Woerdemann, C. Alpmann and Cornelia Denz // *Applied physics letters.* – 2011. – V. 98. – P. 111101.
19. **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, N 2. – P. 45-50.
20. **Kotlyar, V.V.** An algorithm for the generation of laser beams with longitudinal periodicity: rotating images / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics.* – 1997. – Vol. 44. – P. 1409-1416.
21. **Khonina, S.N.** Generating a couple of rotating non-diffracting beams using a binary-phase DOE / S.N. Khonina [et al.] // *Optik.* – 1999. – Vol. 110, N 3. – P. 137-144.
22. **Порфирьев, А.П.** Формирование массива световых «бутылок», основанное на использовании суперпозиции пучков Бесселя / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика.* – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 80-90.

References

1. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Opt. Lett.* – 1986. – Vol. 11, N 5. – P.288-290.
2. **Skidanov, R.V.** Self-reproducing laser beams and their application / R.V. Skidanov // *Computer Optics.* – 2006. – V. 29. – P. 4-23. – (In Russian).
3. **Lee, H.S.** et al. Holographic nondiverging hollow beam / H.S. Lee [et al.] // *Phys. Rev.* – 1994. – V. 49. – P. 4922-4927.
4. **Wang, X.** Laser cavity for generation of variable-radius rings of light / X. Wang, M.G. Littman // *Opt. Lett.* – 1993. – V. 18, N 10. – P. 767.
5. **Tikhonenko, V.** Excitation of vortex solitons in a Gaussian beam configuration / V. Tikhonenko and N.N. Akhmediev // *Opt. Commun.* – 1996. – Vol. 126. – P. 108-112.
6. **Mamaev, A.V.** Vortex Evolution and Bound Pair Formation in Anisotropic Nonlinear Optical Media / A.V. Mamaev, M. Saffman and A.A. Zozulya // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol. 77. – P. 4544-4547.
7. **Herman, R.M.** Production and uses of diffractionless beams / R.M. Herman, T.A. Wiggins // *J. Opt. Soc. Am.* – 1991. – V. 8. – P. 932-942.
8. **Liu, Zh.** Generation of hollow Gaussian beams by spatial filtering / Zhengjun Liu, Haifa Zhao, Jianlong Liu, Jie Lin, Muhammad Ashfaq Ahmad and Shutian Liu // *OPTICS LETTERS.* – 2007. – Vol. 32, N 15, August 1. – P. 6417-6424.
9. **Liu, Zh.** Generation of dark hollow beam by use of phase-only filtering / Zhengjun Liu, Haifa Zhao, Jianlong Liu, Jie Lin, Muhammad Ashfaq Ahmad and Shutian Liu // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2009. – Vol. 47. – P. 1250-1253.
10. **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 and W. Jhe // *Opt. Commun.* – 1997. – Vol. 138. – P. 287-296.
11. **Mishra, S.R.** Generation of hollow conic beams using a metal axicon mirror / Satya Ram Mishra, Sanjiv K. Tiwari, Surjya P. Ram, Shrikant C. Mehendale // *Optical Engineering.* – 2007, August. – Vol. 46(8). – P. 084002.
12. **de Angelisa, M.** Axially symmetric hollow beams using refractive conical lenses / M. de Angelisa, L. Cacciapuoti, G. Pierattinia, G.M. Tino // *Optics and Lasers in Engineering.* – 2003. – Vol. 39. – P. 283-291.
13. **Fatemi, F.K.** Generation of hollow beams by using a binary spatial light modulator / Fredrik K. Fatemi and Mark

- Bashkansky // OPTICS LETTERS. – 2006. – Vol. 31, N 7, April 1. – P. 1-5.
14. **Khonina, S.N.** The phase rotor filter / S.N. Khonina [et al.] // J. Mod. Opt. – 1992. – V. 39, N 5. – P. 1147-1154.
 15. **Khonina, S.N.** Trochuson / S.N. Khonina [et al.] // Opt. Commun. – 1992. – V. 91, N 3-4. – P. 158-162.
 16. **Paterson, C.** Higher-order Bessel waves produced by axicon-type computer-generated holograms / C. Paterson, R. Smith // Opt. Commun. – 1996. – V. 124, N 1-2. – P. 121-130.
 17. **Cizmar, T.** Generation of multiple Bessel beams for a biophotonics workstation / T. Cizmar, V. Kollrarova, X. Tsampoula, F. Gunn-Moore, W. Sibbett, Z. Bouchal, and K. Dholakia // Optics Express. – 2008. – V. 16, Issue 18. – P. 14024-14035.
 18. **Woerdemann, M.** Optical assembly of microparticles into highly ordered structures using Ince-Gaussian beams / M. Woerdemann, C. Alpmann and Cornelia Denz // Applied physics letters. – 2011. – V. 98. – P. 111101.
 19. **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, N 2. – P. 45-50.
 20. **Kotlyar, V.V.** An algorithm for the generation of laser beams with longitudinal periodicity: rotating images / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1997. – Vol. 44. – P. 1409-1416.
 21. **Khonina, S.N.** Generating a couple of rotating nondiffracting beams using a binary-phase DOE / S.N. Khonina [et al.] // Optik. – 1999. – Vol. 110, N 3. – P. 137-144.
 22. **Porfirev, A.P.** Formation of the massif of the light “bottles”, based on use of superposition of Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // Computer Optics. – 2012. – Vol. 36, N 1. – P. 80-90. – (In Russian).

FORMATION OF THE MASSIF OF HOLLOW BEAMS FOR SEDIMENTATION AND POSITIONING OF MICROPARTICLES

A.P. Porfirev, R.V. Skidanov

Image Processing Systems Institute of the RAS,

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

Abstract

The method of calculation of diffraction optical elements for formation of systems of hollow light beams is described. Experiments on sedimentation from a water suspension of microparticles by arrays of hollow beams for process of their positioning are presented.

Key words: hollow light beams, Bessel beams, binary diffraction optical elements, sedimentation of microparticles, transparent microparticles.

Сведения об авторах

Сведения об авторах Скиданов Роман Васильевич и Порфирьев Алексей Петрович – см. стр. 376 этого номера.

Поступила в редакцию 19 апреля 2012 г.