

ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВА СВЕТОВЫХ «БУТЫЛОК», ОСНОВАННОЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ СУПЕРПОЗИЦИИ ПУЧКОВ БЕССЕЛЯ

Порфирьев А.П., Скиданов Р.В.

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 набор световых «бутылок». Предложенная процедура основана на использовании суперпозиции пучков Бесселя. Приведены результаты моделирования и натуральных экспериментов.

Ключевые слова: световая «бутылка», пучки Бесселя, суперпозиция пучков, бинарные дифракционные оптические элементы, оптическая схема.

Введение

Оптические «бутылки» – такой вид оптических ловушек, в которых область с нулём или минимумом интенсивности окружена со всех сторон областями с максимумом интенсивности [1]. Такие световые ловушки широко используются для стабильного захвата и перемещения частиц, показатель преломления которых меньше, чем у окружающей среды, или для непрозрачных микрочастиц. Причём такие манипуляции с частицами проводили как в жидкой среде [2, 3], так и в воздухе [4, 5]. Благодаря этому оптические «бутылки» находят применение в таких областях, как захват атомов и молекул [6–8]. Такой тип ловушек может использоваться и для конструирования из отдельных микрокомпонентов микроструктур и микросистем.

Принцип действия большинства таких ловушек основан на том факте, что под действием сил давления света объекты с показателем преломления меньше, чем у окружающей среды, отталкиваются из области высокой интенсивности света. Точно также себя ведут непрозрачные микрообъекты. Таким образом, поместив частицу в область минимума интенсивности световой «бутылки», можно добиться её стабильного захвата и производить с ней различные манипуляции.

Существует множество подходов для формирования ловушек в виде световых «бутылок». Для этих целей используются комбинации одного аксикона с одной [9] или двумя собирающими линзами [10]. В [2] для формирования одной световой «бутылки» с высокой эффективностью был использован двойной аксикон, изготовленный при помощи техники электронно-лучевой литографии и формирующий интерференционную картину двух пучков Бесселя нулевого порядка. Похожий подход применён в [11], где используют оптическую схему с двумя аксиконами с различными углами наклона при основании. В ряде работ [1, 7] световая «бутылка» формируется в результате интерференции различных мод Гаусса. В [12] для эффективного формирования светового распределения в виде заданной 3D картины, полученной вращением одномерных распределений в нескольких областях, используется численная процедура оптими-

зации бинарных дифракционных элементов. В [5] область с нулём интенсивности, ограниченная светом, формируется при помощи оптической схемы, в которой два пучка с фазовой сингулярностью распространяются друг навстречу другу. Также есть работы, где оптическая «бутылка» формируется при помощи острой фокусировки [13]. Главным недостатком всех этих подходов является ограничение на количество сформированных ловушек. Как правило, формируется одна ловушка. Отдельные работы, в которых формируются множественные ловушки, рассматривают некую симметричную интерференционную картину, в которой создаётся некая жёсткая система из оптических «бутылок» [14]. При этом нельзя произвольно менять количество и положение этих ловушек. Если требуется одновременный 3D захват и манипуляция несколькими пространственно разделёнными частицами, с сохранением расстояния между ними, что является актуальной задачей в области автоматической оптической сборки микросистем, то рассмотренные выше методы не подходят. В [3] для решения этой проблемы используется техника формирования массивов оптических «бутылок» с помощью пространственного модулятора света и пространственного фильтра. К сожалению, из-за использования модулятора света фактическая мощность излучения в плоскости захвата составляет 15 % от первоначальной мощности лазера (30 мВт из 200 мВт). Также при использовании модулятора света существует ограничение на мощность используемого лазера, так как может быть повреждена матрица модулятора. В [15] рассматриваются композиционные рассчитанные на компьютере голограммы, формирующие массив самовоспроизводящихся световых «бутылок», удалённых друг от друга во избежание интерференции. Главным недостатком такого подхода является то, что при уменьшении расстояния между соседними ловушками должна происходить их интерференция и искажение формируемого светового поля, что часто приводит к размыванию световой ловушки.

В [16] были рассмотрены композиционные ДОЭ для формирования различных заданных изображений на различных плоскостях. Заданное световое поле формируется из набора световых пятен. При незначительном смещении плоскости наблюдения

от плоскости формирования изображения формируемая картина разрушается. Для формирования амплитудно-фазовых распределений светового поля, устойчивых при распространении на достаточно протяжённом участке вдоль оси распространения, мы предлагаем использовать композиционные ДОЭ, формирующие изображение из набора пучков Бесселя нулевого порядка.

Пучки Бесселя обладают рядом замечательных свойств, таких как распространение на конечном отрезке оптической оси без дифракции [17], возможность восстановления через некоторое расстояние после препятствия, расположенного на оптической оси [18, 19], продольная периодичность [20], возможность наличия углового момента [21, 22].

В настоящей работе предлагается метод расчёта дифракционных оптических элементов (ДОЭ), формирующих массивы световых «бутылок» как суперпозицию пучков Бесселя со смещёнными относительно друг друга осями распространения. Данный подход позволяет рассчитывать элементы, формирующие световые поля с эффективностью от 40 процентов и выше, причём формируемые ловушки могут находиться в непосредственной близости друг от друга, что повышает гибкость манипулирования частицами.

1. Метод расчёта

Фазовая функция элемента, формирующего пучок Бесселя 0-го порядка, имеет следующий вид [20]:

Таблица 1. Распределения интенсивности для ряда пучков Бесселя 0-го порядка и их сформированной суперпозиции (негативные изображения)

Вид пучка	z, мм	775	825	875
Распределение интенсивности в пучке Бесселя 0-го порядка с параметром $\alpha = 32,15 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$				
Распределение интенсивности в пучке Бесселя 0-го порядка с параметрами $\alpha = 10,31 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$				
Распределение интенсивности в суперпозиции 3 пучков Бесселя 0-го порядка с параметрами $\alpha_1 = 21,85 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$, $\alpha_2 = 17,08 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$, $\alpha_3 = 10,31 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$				

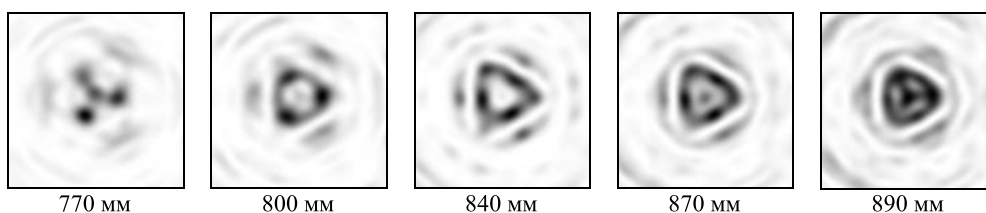


Рис. 1. Распределения интенсивности в различных плоскостях для случая формирования светового поля в виде равностороннего треугольника

$$\tau(x, y) = \text{sgn}(J_0(\alpha r)), \tag{1}$$

где α – параметр, связанный с наклоном лучей к оптической оси.

Для вычисления амплитудно-фазового распределения, формирующего заданную суперпозицию N мод Бесселя 0-го порядка с пространственно разделёнными осями распространения, использовалась следующая формула с комплексными коэффициентами C_p

$$T(x, y) = \sum_{p=1}^N C_p \cdot \text{sgn}(J_0(\alpha_p \vec{r})) \times \exp[i(xu + yv)], \tag{2}$$

где u, v – параметры, соответствующие осевому смещению центра пучка Бесселя.

Как известно, обычные моды Бесселя представляют собой световое поле в виде набора концентрических окружностей, причём в случае моды Бесселя 0-го порядка на оси пучка мы имеем максимум интенсивности, а в случае мод Бесселя высших порядков – минимум интенсивности. Суперпозиция пучков Бесселя 0-го порядка с разными параметрами α позволяет сформировать на оси пучка световое пятно, практически полностью убрав за счёт интерференции концентрические окружности. Так, в табл. 1 представлены распределения интенсивности, получаемые в различных плоскостях вдоль оптической оси с помощью ДОЭ, формирующего суперпозицию трёх пучков Бесселя 0-го порядка с параметрами $\alpha_1 = 21,85 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$, $\alpha_2 = 17,08 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$, $\alpha_3 = 10,31 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$.

Длина волны излучения – 532 нм, радиус элементов – 3 мм. Располагая такие пучки по контуру вдоль некоторой замкнутой кривой, можно добиться формирования световых полей в виде этих кривых, которые будут сохранять свою структуру на некотором отрезке вдоль оси распространения. Так, на рис. 1 представлены распределения интенсивности в различных плоскостях для случая формирования светового поля в виде равностороннего треугольника. Видно, что изображение треугольника остаётся полным на отрезке от 810 мм до 850 мм, а на концах этого отрезка начинает «закрываться», образуя таким образом оптическую ловушку треугольной формы.

Заметим, что в результате расчёта суперпозиций пучков Бесселя по формуле (2) получаются амплитудно-фазовые элементы. С целью повышения эффективности формирования световых полей эти элементы были закодированы при помощи метода локального фазового скачка [23] в фазовые элементы. При этом уровень кодирования амплитуды подбирался таким образом, чтобы не возникало существенных искажений формируемых полей. В ряде случаев простое игнорирование амплитудной составляющей без кодирования позволяло получить хорошие результаты. Заметим, что добиться увеличения эффективности формирования светового поля при сохранении его качества также удалось при помощи уменьшения диаметра освещающей ДОЭ плоской волны по сравнению с диаметром элемента до определённого значения. Дальнейшее его уменьшение приводит к искажениям формируемой картины.

2. Расчёт элементов, формирующих набор соприкасающихся световых «бутылок»

Как было отмечено выше, рассмотренная процедура позволяет рассчитывать распределения светового поля в виде заданных замкнутых кривых, которые сохраняют свою структуру на ограниченном отрезке распространения и «закрываются» на его концах. Таким образом, данный метод позволяет рассчитывать ДОЭ, которые формируют оптические «бутылки» заданной формы. В области оптической микроманипуляции обычно используются оптические «бутылки» круглой формы. Поэтому было принято решение рассчитывать ловушки в виде «закрывающихся» колец. Кроме того, за счёт симметричности таких фигур относительно начала координат данный метод позволяет рассчитывать бинарные фазовые элементы, что избавляет нас от процедуры кодирования фазы.

Далее мы подробно рассматриваем расчёт ДОЭ, формирующих как одну, так и нескольких оптических «бутылок» круглой формы. Радиус элементов при расчёте равнялся 3 мм, длина волны излучения – 532 нм.

Для расчёта суперпозиции пучков Бесселя, формирующей одну световую «бутылку» круглой формы, была использована схема расположения пучков, показанная на рис. 2. Здесь рассматривается суперпозиция 27 пучков Бесселя.

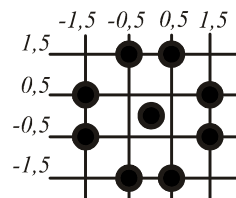


Рис. 2. Схема расположения пучков в суперпозиции для формирования одной световой «бутылки»

Шаг координатной сетки равен размеру минимального дифракционного пятна, формируемого элементом с радиусом 3 мм на расстоянии $z = 800$ мм при длине волны излучения $\lambda = 532$ нм. Точки, расположенные по периметру окружности, образуют световую область в виде кольца, образующего ловушку. Но в результате их интерференции также образуется «паразитное» световое пятно в центре, т.е. в точке с координатами (0,0). Чтобы убрать его, в центре формировалась ещё одна суперпозиция пучков Бесселя, но со сдвигом фазы на π . Таким образом, коэффициенты C_p для пучков, находящихся в точке с координатами (0,0), равны $C_p = 1 \cdot e^{i\pi}$; для всех остальных пучков в суперпозиции $C_p = 1$. Амплитуда и фаза для ДОЭ, формирующего заданную суперпозицию, представлены на рис. 3.

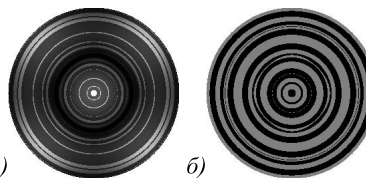


Рис. 3. Амплитудная (а) и фазовая (б) функция ДОЭ, формирующего одну световую «бутылку»

Если проигнорировать амплитудную составляющую и рассматривать только фазу элемента, то при диаметре элемента 5,5 мм и диаметре освещающей его плоской волны 4,0 мм на различных расстояниях от плоскости элемента получают распределения интенсивности и фазы, представленные на рис. 4.

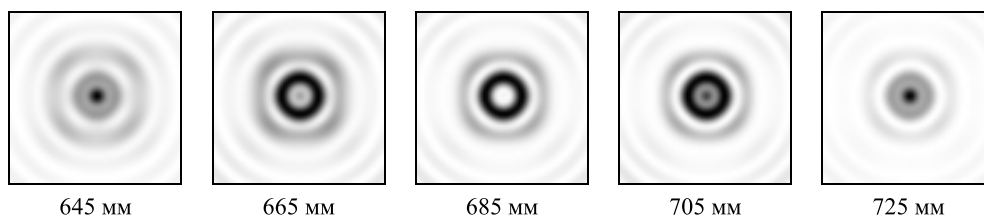


Рис. 4. Распределения интенсивности в сформированном пучке на различных расстояниях от плоскости ДОЭ, формирующего одну световую «бутылку»

Видно, что формируется одна оптическая «бутылка». В качестве критерия сравнения будем использовать энергетическую эффективность формирования оптических «бутылок». Определим эту эффективность по формуле

$$\varepsilon = \frac{N_b}{N}, \tag{3}$$

где N_b – мощность светового пучка в области, составляющей границы световых «бутылок» в данной плоскости, N – общая мощность пучка.

Эффективность формирования полученных световых полей для различных расстояний составляет от 47 до 76 %.

Схемы расположения для формирования двух и трёх световых «бутылок» представлены на рис. 5, 6.

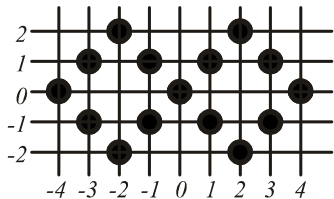


Рис. 5. Схема расположения пучков в суперпозиции для формирования двух световых «бутылок»

Таблица 2. Значения коэффициентов для случая формирования двух световых «бутылок»

Координаты центра пучка	(1; 1)	(1; -1)	(-1; 1)	(-1; -1)	(0; 0)	(-4; 0)	(-3; -1)	(-3; 1)
Коэффициент C_p	2,75	2,75	2,75	2,75	2,25	2,00	2,00	2,00
Координаты центра пучка	(-2; -2)	(-2; 2)	(2; -2)	(2; 2)	(3; -1)	(3; 1)	(4; 0)	
Коэффициент C_p	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	

Таблица 3. Значения коэффициентов для случая формирования трёх световых «бутылок»

Координаты центра пучка	(-6; 0)	(-5; -1)	(-5; 1)	(-4; -2)	(-4; 2)	(-3; -1)	(-3; 1)	(-2; 0)
Коэффициент C_p	1,50	1,75	1,75	2,00	2,00	2,25	2,25	2,25
Координаты центра пучка	(-1; -1)	(-1; 1)	(0; -2)	(0; 2)	(1; -1)	(1; 1)	(2; 0)	(3; -1)
Коэффициент C_p	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,25	2,25
Координаты центра пучка	(3; 1)	(4; -2)	(4; 2)	(5; -1)	(5; 1)	(6; 0)		
Коэффициент C_p	2,25	2,00	2,00	1,75	1,75	1,50		

Для получения чисто фазовых элементов производилось кодирование амплитуды. Уровень амплитуды, выше которого операция кодирования не применялась, для элемента, формирующего две ловушки, равнялся 0,1; кодирование осуществлялось по обоим осям. Для элемента, формирующего три ловушки, уровень кодирования амплитуды составил 0,035 и кодирование осуществлялось только по одной из осей. Фазы рассчитанных элементов представлены на рис. 7, формируемые ими распределения интенсивности и фазы на различных расстояниях вдоль оптической оси представлены на рис. 8 и 9, соответственно.

Дифракционная эффективность для случая двух ловушек равнялась от 44 до 49 % для распределений на различных расстояниях. Дифракционная эффек-

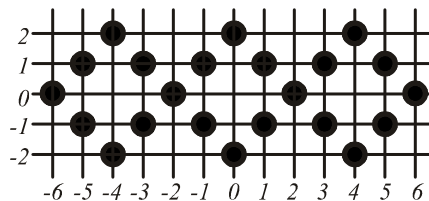


Рис. 6. Схема расположения пучков в суперпозиции для формирования трёх световых «бутылок»

В этих случаях рассматривается суперпозиция 45 и 66 пучков Бесселя соответственно. Заметим, что в этом случае в результате интерференции пучков, участвующих в суперпозиции, в центрах формируемых ловушек не образовывалось световых пятен, как это происходит в случае формирования одной оптической «бутылки». Поэтому в данных случаях не возникла необходимость формирования внутри ловушек суперпозиции пучков со сдвигом фазы.

Все коэффициенты C_p в данных случаях являлись действительными и подбирались таким образом, чтобы добиться равномерного распределения интенсивности вдоль всей световой кривой, образующей «открытые» ловушки (т.е. когда кольца, образующие ловушки, имеют максимальный радиус). Значения этих коэффициентов представлены в табл. 2 и 3.

тивность для случая трёх ловушек равнялась, соответственно, от 27 до 29 %.

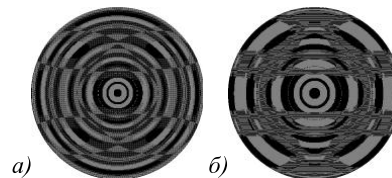


Рис. 7. Фазовые функции ДОЭ, формирующих световые поля в виде набора двух (а) и трёх (б) световых «бутылок»

Заметим, что при дальнейшем увеличении числа ловушек с помощью указанного подхода трудно добиться хорошего сочетания дифракционной эффективности и качества формирования световых «бутылок», поэтому был рассмотрен ещё один подход для

формирования массива ловушек на основе суперпозиции пучков Бесселя. При использовании этого подхода формируемые световые ловушки находятся

на расстоянии друг от друга, равном приблизительно размеру дифракционного пятна, формируемого рассчитываемым элементом.

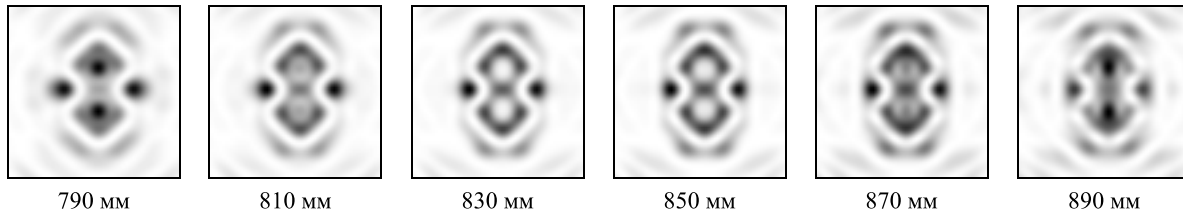


Рис. 8. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего две световые «бутылки»

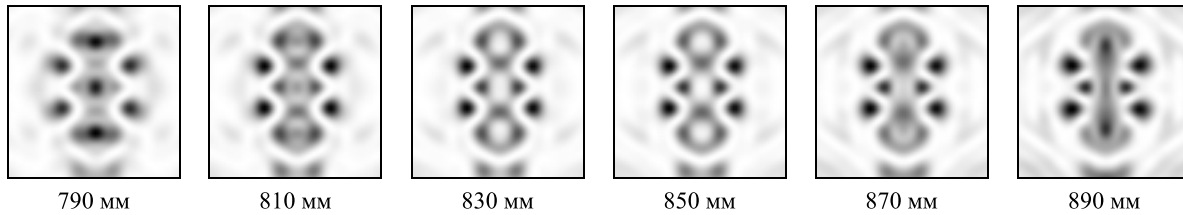


Рис. 9. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего три световые «бутылки»

3. Расчёт элементов, формирующих набор близко расположенных световых «бутылок»

В этом подходе рассматривается пучок Бесселя 0-го порядка, который формировался аксиконом со следующими параметрами: $R=3$ мм, $\alpha=21,85 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$, $\lambda=532$ нм. Элемент с соответствующей функцией пропускания (рис. 10), вычисленной с помощью (1), радиусом 3 мм формирует на отрезке оси от 500 до 524 мм одну световую «бутылку». Так как для последующего натурального эксперимента требовались элементы радиусом 2 мм, при моделировании распространения света через ДОЭ радиус элементов равнялся 2 мм, в результате чего световая

ловушка формировалась на отрезке от 205 до 220 мм от плоскости элемента. На рис. 11 приведены соответствующие распределения интенсивности в различных плоскостях вдоль оптической оси для этого элемента.

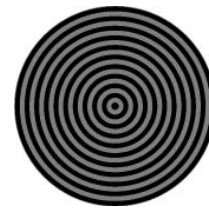


Рис. 10. Фаза элемента, формирующего пучок Бесселя 0-го порядка для создания одной световой «бутылки»

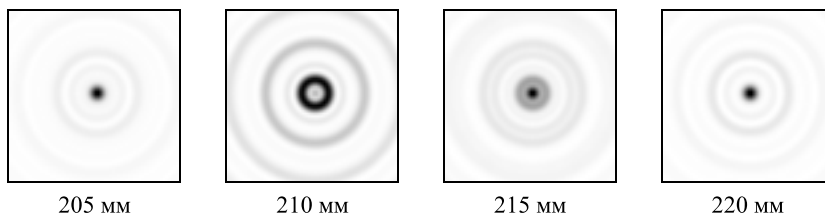


Рис. 11. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего одну световую «бутылку»

Если формировать суперпозицию таких пучков, при условии, что соседние пучки будут иметь фазовый сдвиг, равный π , то можно получить массив близко расположенных световых «бутылок». Отсутствие фазового сдвига приводит к тому, что интерференция соседних пучков вызывает значительные искажения формируемых световых полей и, следовательно, невозможность создания массива ловушек. Внесение фазового сдвига достигается тем, что соседние пучки при расчёте суперпозиции имеют различные коэффициенты $C_p=1$ и $C_{p+1}=1 \cdot e^{i\pi}$ соответственно. На рис. 12 представлена схема расположения пучков в суперпозиции для формирования двух и трёх световых «бутылок». Расстояние между

центрами пучков подбиралось так, чтобы не возникло существенных перепадов в интенсивности соседних колец, образующих ловушки.

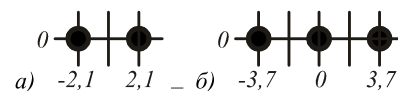


Рис. 12. Схема расположения пучков в суперпозиции для формирования набора двух (а) и трёх (б) световых «бутылок»

Для случая двух ловушек $C_1=1$, $C_2=1 \cdot e^{i\pi}$. Для случая трёх ловушек для пучка, находящегося в центре, $C_2=1 \cdot e^{i\pi}$; для двух других $C_{1,3}=1$. При помощи такого подхода были рассчитаны элементы, формирующие массивы, содержащие от 2 до 5 световых

«бутылок». Для получения фазовых элементов в случае элемента, формирующего две ловушки, амплитудная составляющая просто игнорировалась; в других случаях производилось кодирование амплитуды.

Фазы некоторых из этих элементов представлены на рис. 13, распределения интенсивности и фазы, формируемые ими на различных расстояниях вдоль оптической оси, представлены на рис. 14 - 16.

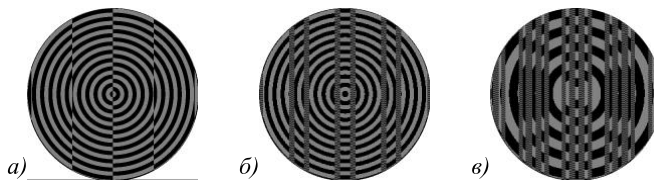


Рис. 13. Фазы элементов, формирующих наборы двух (а), трёх (б) и пяти (в) световых «бутылок»

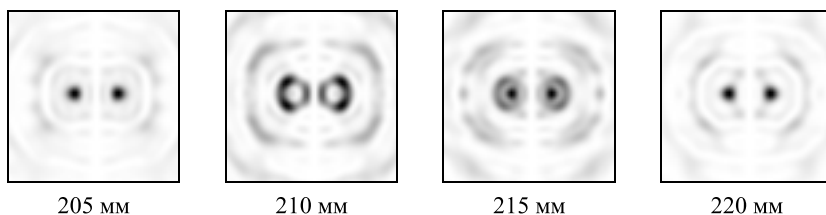


Рис. 14. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из двух световых «бутылок»

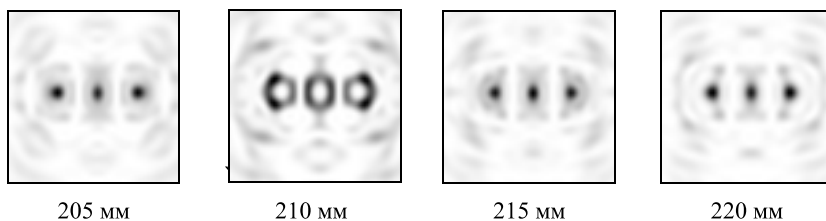


Рис. 15. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из трёх световых «бутылок»

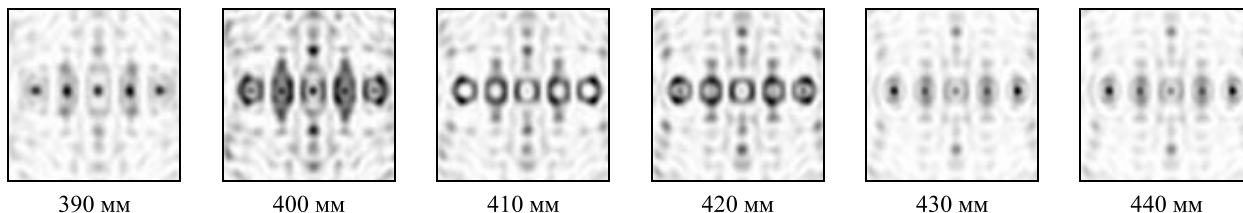


Рис. 16. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из пяти световых «бутылок»

Эффективность формирования таких световых полей на различных расстояниях вдоль оси распространения падает при увеличении числа ловушек от значений в 45 - 62 % при формировании одиночной ловушки до 20 - 31 % при формировании 5 ловушек.

Располагая ловушки не в один, а в два ряда, можно добиться повышения эффективности их формирования. Так, для 6 ловушек, расположенных в два ряда

(рис. 17), эффективность формирования световых полей на различных расстояниях равняется 41 - 42%. Стоит отметить, что в данном случае в одном из направлений вдоль оптической оси возникают искажения некоторых из ловушек. Наличие этих искажений приводит к тому, что «бутылка» не закрывается полностью, но за счёт того, что размер колец, образующих ловушку, всё же уменьшается, можно рассчитывать на захват частицы в такую ловушку.

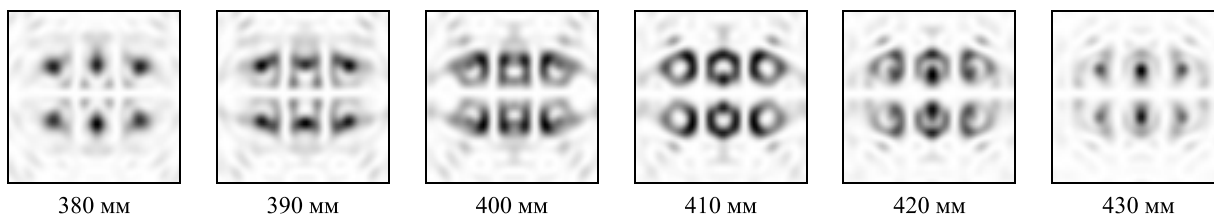


Рис. 17. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из шести световых «бутылок»

Следует отметить, что, так как в обоих представленных подходах рассматриваются суперпозиции пучков Бесселя 0-го порядка, рассчитанные фазовые функции имеют бинарный вид. Благодаря этому значительно упрощается процедура изготовления дифракционных оптических элементов, так как на данный момент технологии изготовления ДОЭ хорошо отработаны только для бинарных элементов.

4. Изготовление ДОЭ

Для проверки представленных выше результатов вычислительных экспериментов методом фотолитографии были изготовлены фазовые ДОЭ. Разрешение записи шаблона составило 1 мкм, глубина травления элемента – 530 нм. Диаметр элементов – 4 и 4,4 мм.

На рис. 18. приведены трёхмерные изображения разных участков микрорельефа дифракционных оптических элементов, фазовая функция которых приводилась ранее. На рис. 18 приведены основные типы участков микрорельефа, сформированного при изготовлении дифракционных оптических элементов.

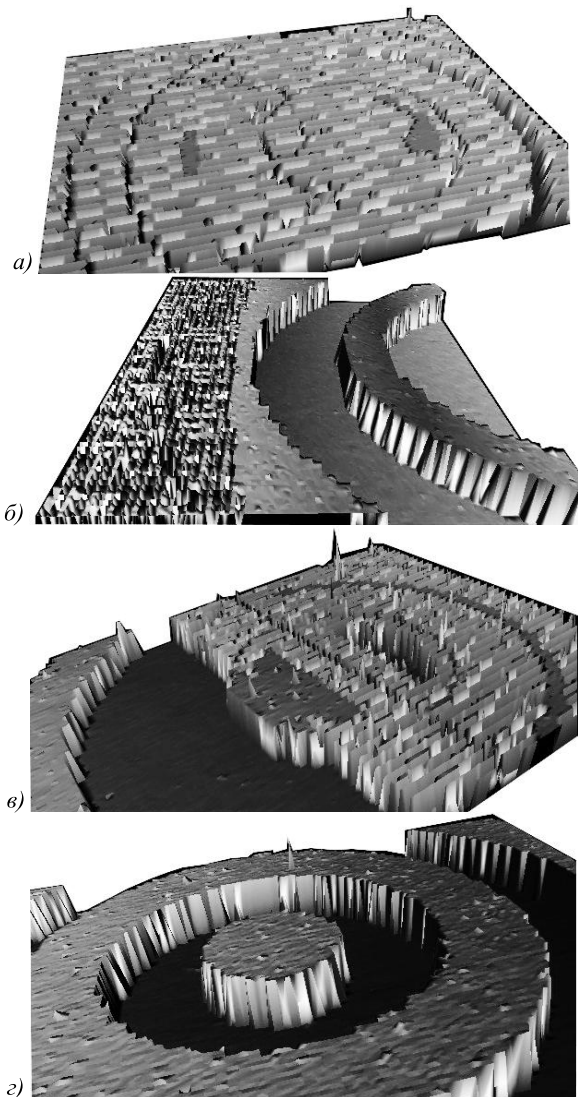


Рис. 18. Трёхмерное изображение участка микрорельефа изготовленных дифракционных оптических элементов

На рис. 18 а приведён пример микрорельефа со сплошным кодированием амплитуды по большей части площади дифракционного оптического элемента. На рис. 18 б приведён пример микрорельефа, на котором кодирование осуществляется только внутри нескольких линейных областей. На рис. 18 в приведён пример микрорельефа, на котором примерно равное соотношение кодированных и некодированных участков. И наконец, на рис. 18 г приведён микрорельеф дифракционного оптического элемента, на котором нет кодирования амплитуды. Такой выбор участков микрорельефа при измерении обоснован тем, что наличие кодирования амплитуды приводит к появлению в микрорельефе чрезвычайно мелких деталей, очень чувствительных к параметрам технологии изготовления. Несоблюдение технологии, как правило, приводит к значительным погрешностям именно на этих участках. Исходя из анализа рис. 18, можно сказать, что существенные погрешности в микрорельефах отсутствуют.

С целью точного определения погрешности изготовления были построены профилограммы для этих четырёх типов микрорельефа (рис. 19).

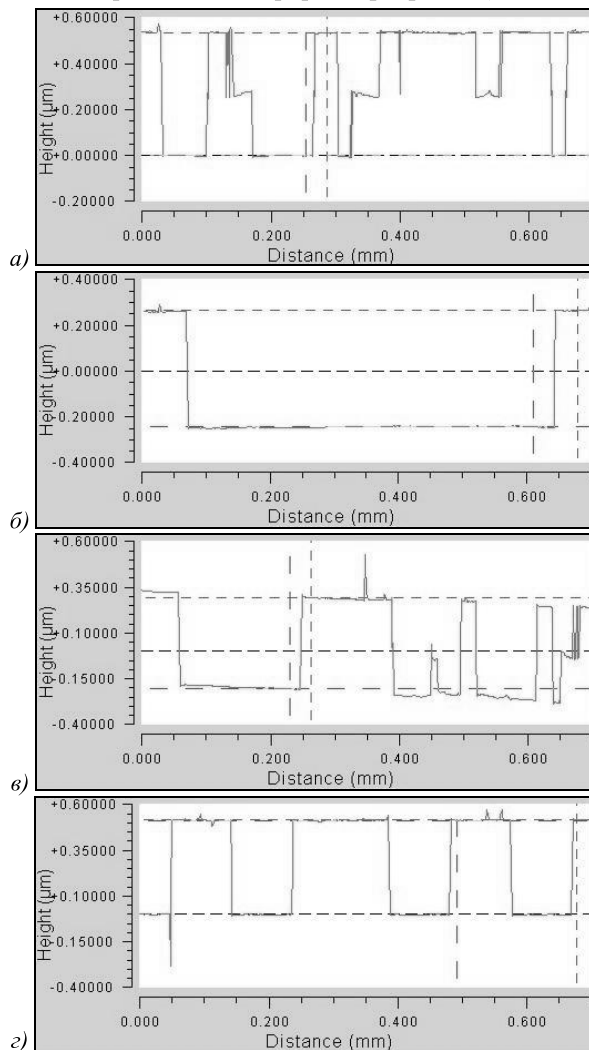


Рис. 19. Профилограммы участков микрорельефа изготовленных дифракционных оптических элементов

Для всех дифракционных оптических элементов запланированная высота микрорельефа составляла 530 нм. По результатам измерений в профилограммах, представленных на рис. 19, высота микрорельефа на рис. 19 а – 534 нм (погрешность изготовления - 0,7%), высота микрорельефа на рис. 19 б – 528 нм (погрешность изготовления - 0,3%), высота микрорельефа на рис. 19 в – 527 нм (погрешность изготовления - 0,5%), высота микрорельефа на рис. 19 г – 524 нм (погрешность изготовления – 1,1%). При изготовлении дифракционных оптических элементов допустимой считается погрешность не более 10%. Приведённые значения погрешностей свидетельствуют о высоком качестве изготовления дифракционных оптических элементов.

5. Эксперимент по формированию набора световых «бутылок»

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 20. Нами был использован твёрдотельный 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.

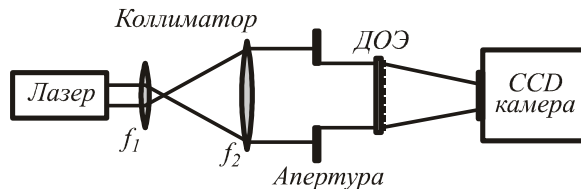


Рис. 20. Оптическая схема эксперимента

На рис. 21 - 23 приведены результаты эксперимента с элементами, фазовые функции которых представлены на рис. 3 и 7. Соответствующие результаты моделирования показаны на рис. 4, 8, 9.

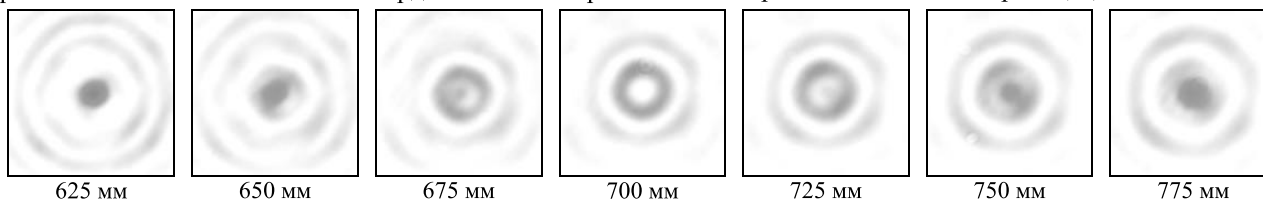


Рис. 21. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего одну световую «бутылку»

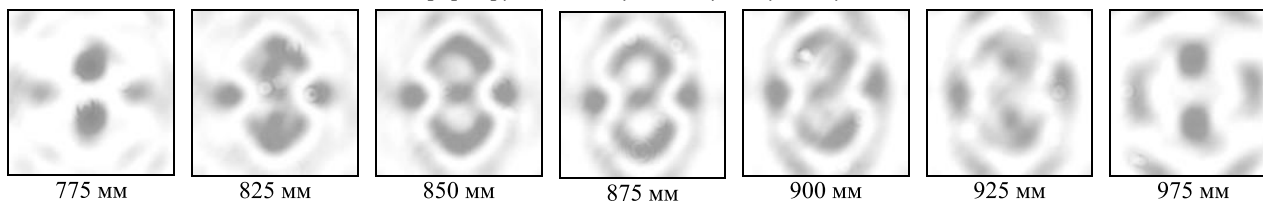


Рис. 22. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из двух световых «бутылок»

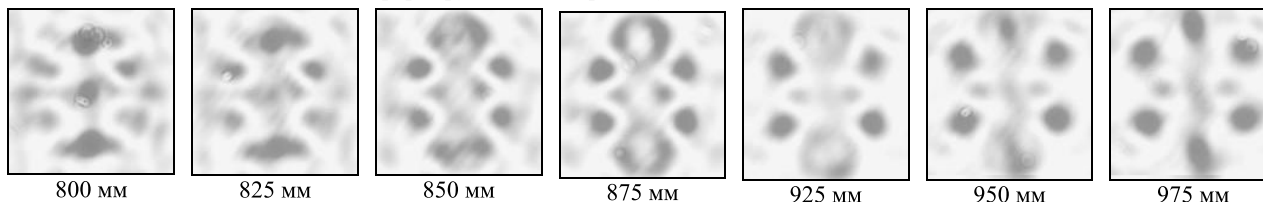


Рис. 23. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из трёх световых «бутылок»

На рис. 24 - 27 приведены результаты эксперимента с элементами, фазовые функции которых представлены на рис. 10 и 13 соответственно. Соответствующие результаты моделирования показаны на рис. 11, 14 - 16.

На рис. 28 приведены результаты эксперимента с элементом, формирующим набор из шести световых «бутылок». Результаты моделирования прохождения плоской волны через этот элемент показаны на рис. 17.

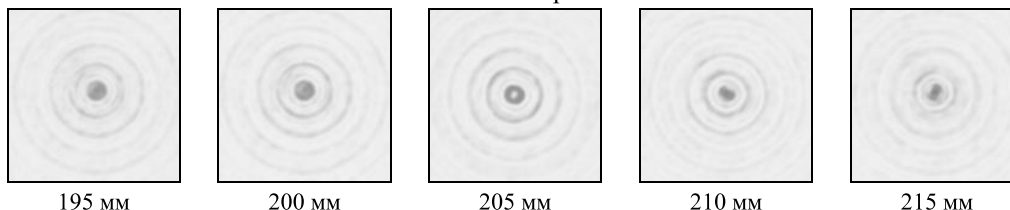


Рис. 24. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего одну световую «бутылку»

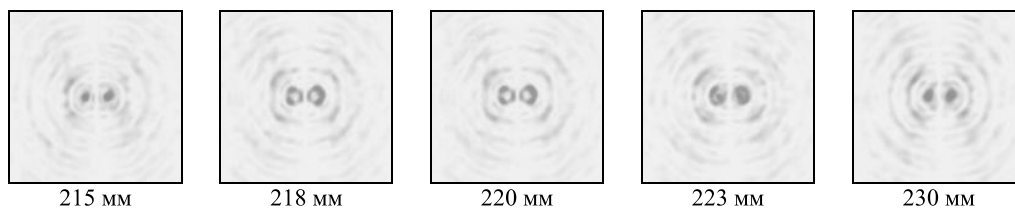


Рис. 25. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из двух световых «бутылок»

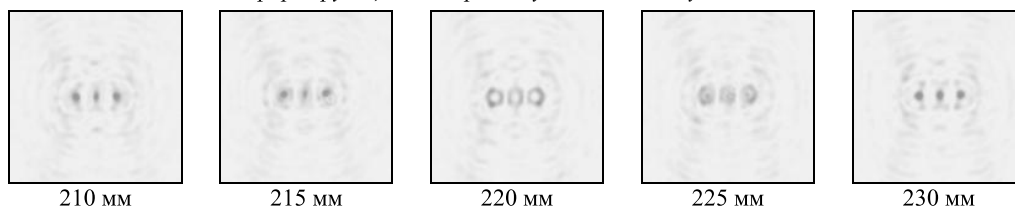


Рис. 26. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из трёх световых «бутылок»

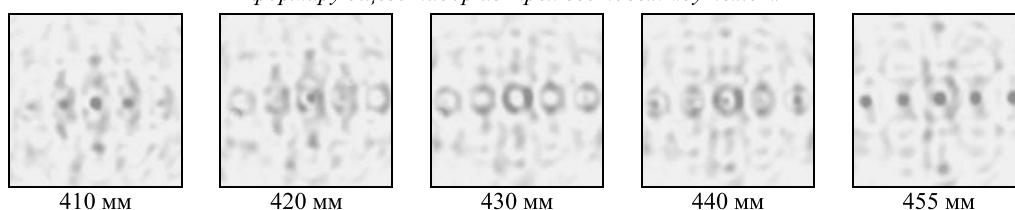


Рис. 27. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из пяти световых «бутылок»

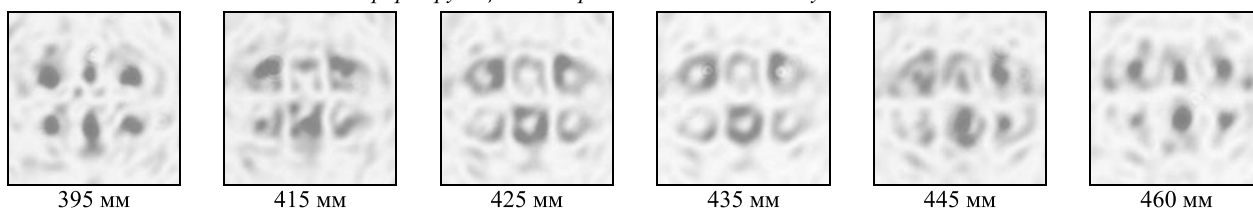


Рис. 28. Распределения интенсивности на различных расстояниях от плоскости элемента, формирующего набор из шести световых «бутылок»

Как видно, приведённые изображения качественно согласуются с распределениями, полученными в ходе вычислительного эксперимента. Небольшие сдвиги в расстояниях, на которых формируются ловушки, вызваны расходимостью лазерного пучка, которая возникает из-за неточной коллимации.

Заключение

Описан метод расчёта бинарных фазовых элементов для формирования массивов световых «бутылок», в основе которого лежит использование суперпозиции пучков Бесселя 0-го порядка. Основное отличие рассматриваемого метода от известных ранее заключается в использовании суперпозиции пучков Бесселя со смещёнными параллельными осями распространения. Такой подход позволяет эффективно формировать несколько световых ловушек одновременно. Было изготовлено несколько ДОЭ на кварцевой подложке. Результаты эксперимента качественно совпали с результатами моделирования, что подтвердило работоспособность метода расчёта ДОЭ для одновременного формирования нескольких световых «бутылок».

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 02.740.11.0805), грантов РФФИ № 08-07-99007, 10-07-00109, гранта Президента Российской Федерации НШ-4128.2012.9.

Литература

1. Arlt, J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt, M.J. Padgett // Optics Letters. – 2000. – V. 25. – N 4. – P. 191-193.
2. Ahluwalia, B.P.S. Micromanipulation of high and low indices microparticles using a microfabricated double axicon / B.P.S. Ahluwalia, X.-C. Yuan, S.H. Tao, W.C. Cheong, L.S. Zhang and H. Wang // J. Appl. Phys. – 2006. – V. 99. – P. 113104.
3. Daria, V.C. Dynamic array of dark optical traps / Vincent Ricardo Daria, Peter John Rodrigo and Jesper Gluckstad // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 84, N 3. – P. 323-325.
4. Zhang, P. Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by Moire techniques / Zhang Peng, Ze Zhang, Jai Prakash, Simon Huang, Daniel Hernandez, Matthew Salazar, Demetrios N. Christodoulides and Zhigang Chen // Optics Letters. – 2011. – V. 36, N 8. – P. 1491-1493.

5. **Shvedov, V.G.** Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, W.Z. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Appl. Phys. A.* – 2010. – V. 100(2). – P. 327-331.
6. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J. M. Dzielzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Opt. Lett.* – 1986. – V. 11(5). – P. 288-290.
7. **Isenhowe, L.** Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap / L. Isenhowe, W. Williams, A. Dally, and M. Saffman // *Opt. Lett.* – 2009. – V. 34, N 8. – P. 1159-1161.
8. **Ozeri, R.** Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap / R. Ozeri, L. Khaykovich and N. Davidson // *Phys. Rev. A.* – 1999. – V. 59(3). – P. R1750- R1753.
9. **Lin, J.-H.** Generation of supercontinuum bottle beam using an axicon / Ja-Hon Lin, Ming-Dar Wei, Hui-Hung Liang, Kuei-Huei Lin and Wen-Feng Hsieh // *Optics Express.* – 2007. – V. 15, N 6. – P. 2940-2946.
10. **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. – V.39. – P. 283-291.
11. **Fengtie, W.** Generation of self-imaged optical bottle beam by using / Wu Fengtie, Lu Wenhe, Liu Bin // *Proc. SPIE.* – 2010. – N 7721. – P. 77211C.
12. **Качалов, Д.Г.** Оптимизация бинарного ДОО для формирования «световой бутылки» / Д.Г. Качалов, К.А. Гамазков, В.С. Павельев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 2011. – Т. 35, № 1. – С. 70-76.
13. **Po-Tse, T.** Direct generation of optical bottle beams from a tightly focused end-pumped solid-state laser / T. Po-Tse, H. Wen-Feng, C. Ching-Hsu // *Optics Express* – 2004. – V. 12, N 24. – P. 5827-5833.
14. **McGloin, D.** Three-dimensional arrays of optical bottle beams / D. McGloin, G.C. Spalding, H. Melville, W. Sibbetta, K. Dholakia // *Optics Communications.* – 2003. – V. 225, N 4-6. – P. 215-222.
15. **Tao, S.H.** The generation of an array of nondiffracting beams by a single composite computer generated hologram / S.H. Tao, X.-C. Yuan and B.S. Ahluwalia // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* – 2005. – V. 7. – P. 40-46.
16. **Котляр, В.В.** Методы кодирования композиционных ДОО / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, В.А. Соифер // *Компьютерная оптика.* – 2001. – Вып. 21. – С. 36-39.
17. **Durnin, J.** Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli, J.H. Eberly // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – V. 58. – P. 1499-1501.
18. **Herman, R.M.** Hollow beams of simple polarization for trapping and storing atoms / R.M. Herman, T.A. Wiggins // *J. Opt. Soc. Am.* – 2002. – V. 19, N 1. – P. 116-121.
19. **McQueen, C.A.** An experiment to study a “nondiffracting” light beam / C.A. McQueen, J. Arlt, K. Dholakia // *Am. J. Phys.* – 1999. – V. 67. – P. 912-915.
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. – V. 44. – P. 1409-1416.
21. **Khonina, S.N.** An analysis of the angular momentum of a light field in terms of angular harmonics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, P. Paakkonen, J. Simonen, J. Turunen // *Journal of Modern optics.* – 2001. – V. 48(10). – P. 1543-1557.
22. **Khonina, S.N.** Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen // *J. Mod. Opt.* – 2004. – V. 51, N 14. – P. 2167-2184.
23. 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.

References

1. **Arlt, J.** Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt, M.J. Padgett // *Optics Letters.* – 2000. – V. 25. – N 4. – P. 191-193
2. **Ahluwalia, B.P.S.** Micromanipulation of high and low indices microparticles using a microfabricated double axicon / B.P.S. Ahluwalia, X.-C. Yuan, S.H. Tao, W.C. Cheong, L.S. Zhang and H. Wang // *J. Appl. Phys.* – 2006. – V. 99. – P. 113104
3. **Daria, V.C.** Dynamic array of dark optical traps / Vincent Ricardo Daria, Peter John Rodrigo and Jesper Gluckstad // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – V. 84, N 3. – P. 323-325.
4. **Zhang, P.** Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by Moire techniques / Zhang Peng, Ze Zhang, Jai Prakash, Simon Huang, Daniel Hernandez, Matthew Salazar, Demetrios N. Christodoulides and Zhigang Chen // *Optics Letters.* – 2011. – V. 36, N 8. – P. 1491-1493.
5. **Shvedov, V.G.** Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, W.Z. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Appl. Phys. A.* – 2010. – V. 100(2). – P. 327-331.
6. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J. M. Dzielzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Opt. Lett.* – 1986. – V. 11(5). – P. 288-290.
7. **Isenhowe, L.** Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap / L. Isenhowe, W. Williams, A. Dally, and M. Saffman // *Opt. Lett.* – 2009. – V. 34, N 8. – P. 1159-1161.
8. **Ozeri, R.** Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap / R. Ozeri, L. Khaykovich and N. Davidson // *Phys. Rev. A.* – 1999. – V. 59(3). – P. R1750- R1753.
9. **Lin, J.-H.** Generation of supercontinuum bottle beam using an axicon / Ja-Hon Lin, Ming-Dar Wei, Hui-Hung Liang, Kuei-Huei Lin and Wen-Feng Hsieh // *Optics Express.* – 2007. – V. 15, N 6. – P. 2940-2946.
10. **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. – V.39. – P. 283-291.
11. **Fengtie, W.** Generation of self-imaged optical bottle beam by using / Wu Fengtie, Lu Wenhe, Liu Bin // *Proc. SPIE.* – 2010. – N 7721. – P. 77211C.
12. **Kachalov, D.G.** Optimization binary DOE for formation of the “light bottle” / D.G. Kachalov, K.A. Gamazkov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina // *Computer optics.* – 2011. V. 35, N 1. – P. 70-76. – (In Russian).
13. **Po-Tse, T.** Direct generation of optical bottle beams from a tightly focused end-pumped solid-state laser / T. Po-Tse, H. Wen-Feng, C. Ching-Hsu // *Optics Express* – 2004. – V. 12, N 24. – P. 5827-5833.
14. **McGloin, D.** Three-dimensional arrays of optical bottle beams / D. McGloin, G.C. Spalding, H. Melville, W. Sibbetta, K. Dholakia // *Optics Communications.* – 2003. – V. 225, N 4-6. – P. 215-222.
15. **Tao, S.H.** The generation of an array of nondiffracting beams by a single composite computer generated holo-

- gram / S.H. Tao, X.-C. Yuan and B.S. Ahluwalia // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2005. – V. 7. – P. 40-46.
16. **Kotlyar, V.V.** Methods of encoding composite DOE / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Computer Optics. – 2001. – V. 21. – P. 36-39. – (In Russian).
 17. **Durnin, J.** Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli, J.H. Eberly // Phys. Rev. Lett. – 1987. – V. 58. – P. 1499-1501.
 18. **Herman, R.M.** Hollow beams of simple polarization for trapping and storing atoms / R.M. Herman, T.A. Wiggins // J. Opt. Soc. Am. – 2002. – V. 19, N 1. – P. 116-121.
 19. **McQueen, C.A.** An experiment to study a “nondiffracting” light beam / C.A. McQueen, J. Arlt, K. Dholakia // Am. J. Phys. – 1999. – V. 67. – P. 912-915.
 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. – V. 44. – P. 1409-1416.
 21. **Khonina, S.N.** An analysis of the angular momentum of a light field in terms of angular harmonics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, P. Paakkonen, J. Simonen, J. Turunen // Journal of Modern optics. – 2001. – V. 48(10). – P. 1543-1557.
 22. **Khonina, S.N.** Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen // J. Mod. Opt. – 2004. – V. 51, N 14. – P. 2167-2184.
 23. **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. – V. 19. – P. 54-64. – (In Russian).

GENERATION OF OPTICAL BOTTLE BEAMS ARRAY BY SUPERPOSITION BESSEL BEAMS

A.P. Porfirev, R.V. Skidanov

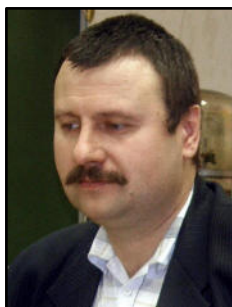
*S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,
Image Processing Systems Institute of the RAS*

Abstract

We propose and analyze technique for generation optical bottle beams array by diffractive optical elements (DOE). This technique is based on superposition Bessel beams. Result of computer simulation and experimental results are presented.

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

Сведения об авторах



Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанопластики. В списке научных работ Р.В. Скиданова 79 статей, 4 монографии.

E-mail: romans@smr.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973) graduated with honours (1990) from the Samara State University (SSU), majoring in Physic. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the senior researcher laboratory of laser measurement at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU’s Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 79 scientific papers, 4 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.



Порфирьев Алексей Петрович, 1987 года рождения. Магистр прикладных математики и физики (2010), аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, стажёр-исследователь Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений. Область научных интересов – дифракционная оптика, оптическая микроманипуляция.

E-mail: lporfirev@rambler.ru.

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

Поступила в редакцию 11 ноября 2011 г.