

Формирование набора осевых оптических бутылок за счет кольцевого экранирования бинарного аксикона

А.Р. Скиданова

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
skidanovaanna253@gmail.com

Аннотация — В работе рассматривается простой способ формирования набора оптических бутылок, расположенных последовательно друг за другом на оптической оси, которые генерируются за счёт экранирования бинарного дифракционного аксикона кольцевым экраном.

Ключевые слова — оптические бутылки, бинарный дифракционный аксикон, преобразование Френеля, моделирование

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические ловушки [1-3] позволяют захватывать объекты в область с минимальной интенсивностью, окруженной световым барьером. Это позволяет снижать разрушительное воздействие лазерного излучения на захваченный объект. Известны различные подходы к формированию оптических бутылок. В работе [4] формирование теневого фокуса осуществлялось с помощью введения фазового сдвига на π радиан центральной части фокусируемого Гауссова пучка по отношению к периферии. Интенсивность «стенок» такой ловушки является довольно низкой. В [1] рассматривалась интерференция мод Гаусса-Лагерра, фазовый сдвиг между которыми подобран так, чтобы при интерференции они взаимно уничтожались в общем фокусе. Суперпозиция формировалась с помощью амплитудной голограммы, которая характеризуется низкой дифракционной эффективностью. Более удобно использовать отдельный специально рассчитанный дифракционный оптический элемент (ДОЭ), формирующий заданное распределение поля вблизи оптической оси. В работе [5] рассмотрена численная процедура оптимизации бинарных ДОЭ для формирования световых бутылок, на основе модифицированного генетического алгоритма оптимизации функции многих переменных, а в работе [6] такой ДОЭ экспериментально исследован.

Тем не менее, наиболее часто для формирования оптических бутылок используют тандем из двух оптических элементов – линзы и аксикона [3, 7-9]. В этом случае теневая область формируется в фокальной плоскости линзы. Отметим, что параметры формируемой ловушки можно динамически менять как за счёт характеристик аксикона [3, 9], так и за счёт изменения расстояния между двумя этими элементами [8].

Как правило, все рассмотренные подходы ориентированы на формирование одиночных оптических бутылок. В данной работе рассмотрен простой для оптической реализации подход формирования и управления набором оптических бутылок, расположенных на оптической оси, за счёт экранирования бинарного дифракционного аксикона кольцевым экраном.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Рассмотрим бинарный аксикон в следующем виде:

$$\tau(r) = \cos(kar), \quad (1)$$

где r – радиальная координата, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число для излучения с длиной волны λ , α – параметр аксикона, соответствующий числовой апертуре.

Для получения продольного распределения пучка, которое позволит визуализировать сформированные оптические ловушки, используется преобразование Френеля. Для ускорения вычислений оно рассчитывается с использованием быстрого преобразования Фурье и может быть записано в следующем виде:

$$U(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \mathfrak{F} \left\{ U_0(u, v) \exp \left[\frac{ik}{2z} (u^2 + v^2) \right] \right\}, \quad (2)$$

где \mathfrak{F} – быстрое преобразование Фурье, (u, v) – координаты на входе, (x, y) – координаты в плоскости на расстоянии z от аксикона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для представленных ниже результатов использовались следующие параметры расчета: радиус элемента $R = 1,5$ мм, размеры поля построения 512×512 . Параметр α был подобран таким образом, чтобы аксикон содержал в себе не менее десяти колец. Освещается фазовый элемент ограниченной радиусом R плоской волной с единичной амплитудой и длиной волны $\lambda = 0,532$ мкм.

Известно, что аксикон формирует осевой световой отрезок. Если наложить на аксикон кольцевой экран, это приведет к блокировке излучения в соответствующей точке оптической оси. В результате чего в данном месте будет образована теневая область, окруженная световыми стенками (за счет дифракционных эффектов), которая представляет собой оптическую ловушку.

Ниже представлена фазовая маска бинарного аксикона с параметром $\alpha = 15$ в случае блокировки третьего кольца и распределение интенсивности получаемого пучка в фокальной плоскости (рис. 1). А на рис. 2 показано распределение интенсивности сформированного пучка в области вблизи оптической оси при $z \in [400 \text{ мм}, 800 \text{ мм}]$.

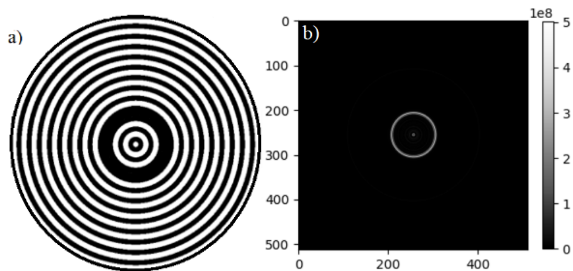


Рис. 1. Фазовая маска бинарного аксикона с блокировкой третьего кольца (а) и распределение интенсивности в фокальной плоскости (b)

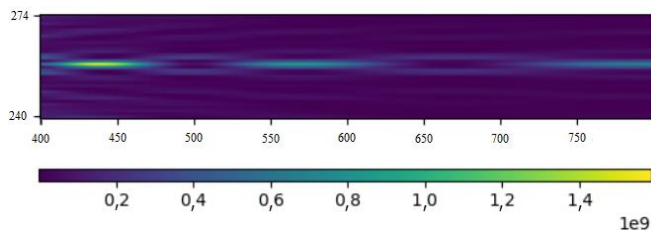


Рис. 2. Продольное распределение интенсивности пучка на расстоянии 400–800 мм

Как можно увидеть по рис. 2 осевая световая линия прерывается на расстояниях $z = 500$ мм и $z = 670$ мм, образуя две теньевые области, окруженные тонкими световыми стенками.

Более того, если рассмотреть распространение пучка на более протяженном расстоянии – от 400 до 2800 мм, то видно, что ловушек на самом деле формируется не две, а четыре (рис. 3). Все ловушки имеют одинаковый диаметр равный 0,011 мм, но при этом каждая последующая область становится всё более вытянутой. Интенсивность боковых стенок дальних ловушек значительно ниже, чем у ближних, поэтому весь набор бутылок может быть использован для сортировки частиц разного размера.

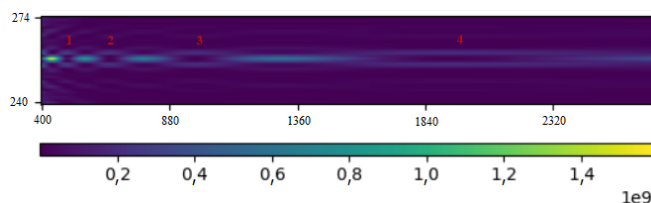


Рис. 3. Продольное сечение пучка на расстоянии 400–2800 мм

Объяснить множественность ловушек можно тем, что рассматриваемый аксикон является бинарным, то есть фактически состоит из комбинации двух аксиконов. Кроме того, наложение апертуры так же делит элемент как бы на два – внутренний и наружный. Соответственно при распространении света от различных областей оптического элемента, происходит интерференция, которая и приводит к формированию не одной, а нескольких ловушек. На более дальних расстояниях ($z > 3000$ мм) ловушки уже не формируются.

Более наглядное представление о свойствах сформированных пучков позволяет получить трехмерная

визуализация. Так как особый интерес для изучения представляет область вблизи оптической оси, то внешние кольца были частично обрезаны (рис. 4). На рис. 4 хорошо видна форма пучка и отчётливо выделяются места образования оптических бутылок.

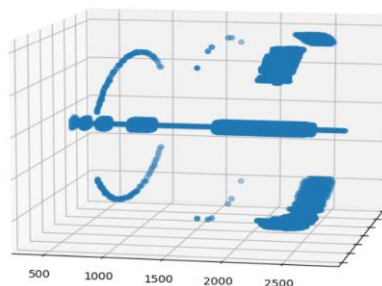


Рис. 4. 3D визуализация интенсивности пучка в пространстве на расстоянии 400–2800 мм

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе численного моделирования показана возможность формирования и управления набором оптических бутылок, расположенных на оптической оси, за счёт экранирования бинарного дифракционного аксикона кольцевым экраном. Такие пучки могут найти свое применение в манипулировании и захвате микро- и нано объектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-12-00041.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Arlt, J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt // *Opt. Lett.* – 2000. – Vol. 25. – P. 191–193.
- [2] Yelin, D. Generating an adjustable three-dimensional dark focus / D. Yelin, B. E. Bouma, G. J. Tearney // *Opt. Lett.* – 2004. – Vol. 29. – P. 661–663.
- [3] Khonina, S.N. Generation of Multiple Vector Optical Bottle Beams, Photonics / A.P. Porfirev, S.G. Volotovskiy, A.V. Ustinov, S.A. Fomchenkov, V.S. Pavelyev, S. Schröter, M. Duparré // *Photonics.* – 2021. – Vol. 8(6). – P. 218.
- [4] Ozeri, R. Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap / R. Ozeri, L. Khaykovich, N. Davidson // *Phys. Rev. A.* – 1999. – Vol. 59(3). – P. R1750–R1753.
- [5] Качалов Д.Г. Оптимизация бинарного ДОЭ 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.
- [6] Pavelyev, V. Diffractive optical elements for the formation of “light bottle” intensity distributions / V. Pavelyev, V. Osipov, D. Kachalov, S. Khonina, W. Cheng, A. Gaidukeviciute, B. Chichkov // *Applied Optics.* – 2012. – Vol. 51(18). – P. 4215–4218.
- [7] De Angelis, M. Axially symmetric hollow beams using refractive conical lenses / M. de Angelis, L. Cacciapuoti, G. Pierattini, G.M. Tino // *Opt. Lasers Eng.* – 2003. – Vol. 39. – P. 283–291.
- [8] Wei, M.D. Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon / M.D. Wei, W.L. Shiao, Y.T. Lin // *Opt. Commun.* – 2005. – Vol. 248. – P. 7–14.
- [9] Khonina, S.N. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Applied Physics B.* – 2018. – Vol. 124. – P. 191–193.