

УДК 535.42

## МНОГОПУЧКОВЫЕ ВИХРЕВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ЛОВУШКИ

*К.Н. Афанасьев, Е.Н. Воронцов*

### Аннотация

Поиск эффективных способов формирования массивов лазерных ловушек, обладающих ненулевым угловым моментом, представляет большой интерес для лазерного манипулирования. Целью данной работы является разработка различных способов формирования массивов оптических ловушек. Исследуется метод мультиплицирования пучка на дифракционной решетке, голографическая запись пучка, метод формирования фазовых элементов на основе оптики спиральных пучков. Получены массивы ловушек с распределением интенсивности в виде треугольников и колец.

### Введение

Лазерное манипулирование – одно из самых молодых и перспективных направлений современной оптики, основы которого были заложены в работах американского физика Артура Эшкина. Оптический пинцет позволяет захватывать частицы размером от десятков нанометров до сотен микрометров с силами порядка  $10^{-12} - 10^{-9}$  Н. Такой диапазон размеров и сил делает привлекательным использование оптических пинцетов для задач биологии и медицины в качестве стерильного инструмента для манипуляции фрагментами клеток, нитями ДНК, в коллоидной химии и в микротехнологиях.

Простейшая оптическая ловушка представляет собой остросфокусированный лазерный пучок. Захват диэлектрической прозрачной частицы происходит за счет сил, возникающих из-за преломления световых лучей ( $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  на рис. 1). В случае острой фокусировки этих сил достаточно, чтобы скомпенсировать силу светового давления  $\vec{F}_{\text{св.д.}}$ .

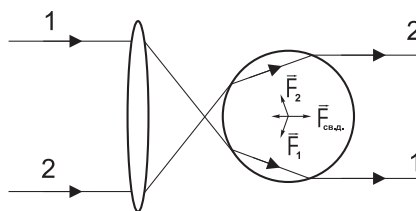


Рис. 1. Принцип действия оптического пинцета с точки зрения геометрической оптики

Особый интерес представляют поля с более сложным пространственным распределением фазы и интенсивности, а также массивы лазерных ловушек. Один из наиболее эффективных способов формирования таких полей – использование различных дифракционных оптических элементов.

В данной работе исследуются методы мультиплицирования пучка на дифракционной решетке, голографическая запись пучка, метод формирования массива

лазерных ловушек на основе оптики спиральных пучков. Экспериментально получены массивы пучков с распределением интенсивности в виде треугольников и колец.

### 1. Формирование пучков

Рассмотрим формирование полей с распределением интенсивности в форме кольца и границы треугольника.

Для формирования поля с распределением интенсивности в форме кольца можно использовать дифракционный элемент с фазовым распределением:

$$\varphi(r) = -\frac{kr^2}{R_0} + \frac{krr_0}{R_0} + m\theta, \quad m = 1, 2, \dots,$$

где  $k$  – волновое число,  $r$  и  $\theta$  – полярные координаты в плоскости дифракционного элемента,  $r_0$  – радиус кольца в плоскости фокусировки,  $R_0 = \sqrt{r_0^2 + f_0^2}$ ,  $f_0$  – расстояние до плоскости фокусировки. Этот элемент получил название вихревого аксикона [1].

Слагаемое  $m\theta$  обеспечивает вихревой характер распределения фазы. В центре данного распределения находится особая точка – нуль  $m$ -го порядка (или винтовая дислокация). Пучки, обладающие винтовыми дислокациями, имеют ненулевой орбитальный момент. На рис. 2, а, б) показаны распределения фазы вихревого аксикона в плоскости дифракционного элемента и интенсивности поля, сформированного в дальней зоне.

В работе [2] рассмотрены основные принципы формирования спиральных пучков с распределением интенсивности в форме заданных плоских кривых. Такие пучки обладают угловым моментом и сохраняют пространственное распределение интенсивности при распространении с точностью до масштаба и вращения.

Теоретически можно получить пучок с распределением интенсивности в форме любой плоской кривой, так называемой генерирующей кривой. В случае, если кривая замкнута, площадь, ограниченная этой кривой, не может быть произвольной, а должна удовлетворять некоторому условию квантования. В нашей работе используется спиральный пучок с распределением интенсивности в форме границы треугольника. Порождающей кривой в данном случае является гипоциклоида:

$$\xi(t) = i\nu\rho \left[ 2 \exp(it) + \frac{1}{2} \exp(-2it) \right], \quad t \in [0, 2\pi], \quad (1)$$

где  $\nu = \sqrt{N/7}$ ,  $N$  – число нулей внутри области, охватываемой гипоциклоидой. На рис. 2 в, г) представлены распределения фазы и интенсивности спирального пучка, построенного по кривой (1).

### 2. Методы мультиплицирования

Для мультиплицирования описанных выше пучков в одномерные массивы использовались голографический метод и метод дифракционной решетки. Также смоделировано получение двумерного массива ловушек с помощью дифракционного оптического элемента, фазовый рельеф которого рассчитан на основе алгоритма Гершберга–Сэкстона. Опишем данные методы.

Голографический метод заключается в следующем. Пучок с заданным распределением фазы интерферирует с плоской волной. В результате получается голограмма. Такая голограмма действует подобно дифракционной решетке. При ее восстановлении образуется несколько дифракционных порядков, форма распределения интенсивности в которых соответствует предметному пучку.

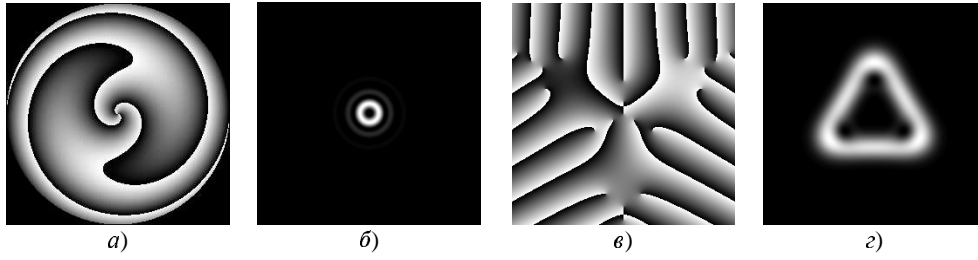


Рис. 2. Фаза вихревого аксикона (а) и интенсивность поля, формируемого в дальней зоне (б). Фаза и интенсивность спирального пучка (в, г). На картинах фазового распределения белый цвет соответствует фазе  $2\pi$ , черный – 0

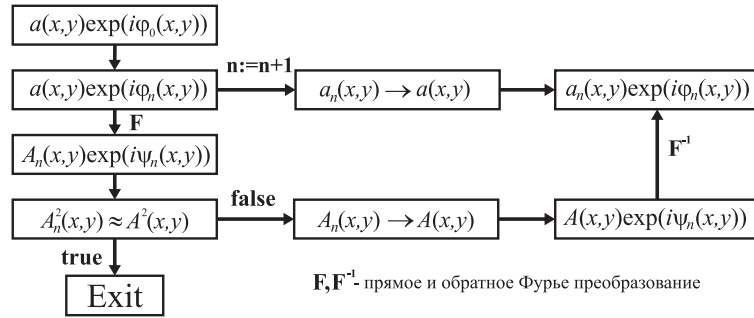


Рис. 3. Схема алгоритма Гершберга – Сэкстона

Метод мультиплицирования пучка на дифракционной решетке сводится к объединению двух фазовых элементов. Один из них – это фазовый элемент, задающий топологию пучка, а второй – дифракционная решетка. Тогда распределение фазы объединенного элемента будет описываться выражением:

$$\varphi(x, y) = \varphi_1(x, y) + \varphi_2(x, y),$$

где  $\varphi_1(x, y)$  – фаза элемента, образующего пучок;  $\varphi_2(x, y)$  – фазовая функция дифракционной решетки. При освещении данного составного элемента плоской волной образуется несколько порядков дифракции, форма распределения интенсивности в которых соответствует мультиплицируемому пучку. В нашей работе использовалась фазовая синусоидальная дифракционная решетка.

Алгоритм Гершберга – Сэкстона является одним из наиболее известных итеративных методов восстановления фазы пучков. Схема алгоритма приведена на рис. 3. В результате его работы получаем фазовое распределение  $\varphi_n$ , соответствующее полю  $A(x, y)$ . В качестве нулевого приближения фазы в нашей работе используется фаза спирального пучка.

### 3. Численные и экспериментальные результаты

Нами реализованы с помощью соответствующих программ все рассматриваемые методы (рис. 4, а; 5, а; 6, а; 7, а). На эксперименте на основе голографического метода и метода дифракционных решеток получены массивы пучков с распределением интенсивности в форме колец и треугольников (рис. 4, б; 5, б; 6, б; 7, б).



Рис. 4. Мультиплицирование поля вихревого аксикона на дифракционной решетке. Численное моделирование (а), экспериментальный результат (б). Период решетки  $d = 0.019$  мм



Рис. 5. Мультиплицирование спирального пучка на дифракционной решетке. Численное моделирование (а), экспериментальный результат (б). Период решетки  $d = 0.019$  мм



Рис. 6. Мультиплицирование поля вихревого аксикона при восстановлении голограммы. Численное моделирование (а), экспериментальный результат (б)

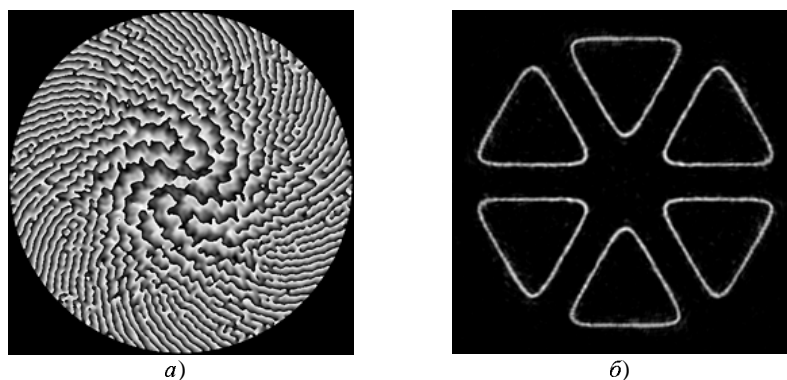


Рис. 7. Фазовый элемент в виде группы треугольников, рассчитанный на основе оптики спиральных пучков (а) и формируемый им пучок (б). На картине фазового распределения (а) белый цвет соответствует фазе  $2\pi$ , черный – 0

### Заключение

Рассмотрены методы мультиплицирования пучков с ненулевым угловым моментом. Распределения интенсивности в ловушках, полученных рассматриваемыми методами, имеют однородный характер. Полученные экспериментально массивы

лазерных ловушек могут использоваться для манипуляции микрообъектами. Однако требуется дополнительное исследование распределение плотности углового момента в указанных ловушках.

Работа выполнена при финансовой поддержке АФГИР (грант RUP1-2623-SA-04), УНК ФИАН и Фонда содействия отечественной науке.

### Summary

*K.N. Afanasiev, E.N. Vorontsov.* Multiple vortical laser traps.

We consider three algorithms to obtain arrays of vortical laser traps: splitting the field with diffractive grating, different orders of hologram and special diffractive elements based on spiral beams optics. Numerical simulation and some experimental results for circle-shaped and triangular-shaped fields are presented.

### Литература

1. *Abramochkin E.G., Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Rakhmatulin M.A., Volostnikov V.G.* Microobject manipulations using laser beams with nonzero orbital angular momentum // *Laser Physics*. – 2006. – V. 16. – P. 842–848.
2. *Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г.* Спиральные пучки света // *УФН*. – 2004. – Т. 174. – С. 1273–1300.
3. *Эшкин А.* Давление лазерного излучения // *УФН*. – 1973. – Т. 110. – С. 101–116.
4. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 364 с.

Поступила в редакцию  
16.01.07

---

**Афанасьев Кирилл Николаевич** – младший научный сотрудник Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

E-mail: *afanasiev@fian.smr.ru*

**Воронцов Евгений Николаевич** – студент Самарского государственного университета, инженер Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

E-mail: *vorontsov2005@rambler.ru*