

09:15

## Массивы оптических ловушек с управляемыми свойствами

© Н.В. Шостка, М.О. Иванов, В.И. Шостка

Физико-технический институт Крымского федерального университета  
им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия  
E-mail: nataliya\_shostka@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 декабря 2015 г.

Предложен и описан экспериментальный метод генерации массива трехмерных оптических ловушек одноосным кристаллом. Показано, что свойствами сформированного массива оптических ловушек можно управлять, изменяя геометрические параметры оптической системы и состояние поляризации излучения после кристалла.

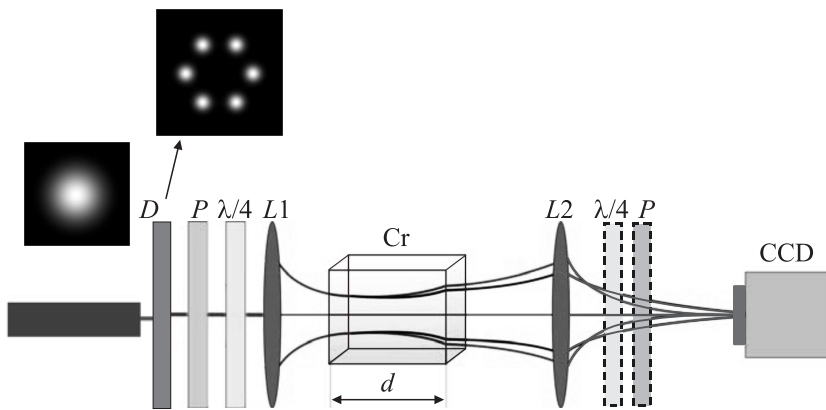
Возможность захвата и транспортировки микрообъектов с помощью света является одним из актуальных исследований в современной оптике. Оптические пинцеты осуществляют манипуляции с коллоидными микрочастицами, живыми клетками, нано- и микрочастицами, отдельными молекулами и атомами, что находит широкое применение в современной науке. Несмотря на большое количество работ, посвященных захватам микро- и наночастиц оптическими методами, лишь совсем недавно удалось впервые осуществить контролируемый захват поглощающих свет частиц в газовой среде [1,2]. Прозрачные микрочастицы захватываются областью максимальной интенсивности света, тогда как поглощающие свет частицы „выталкиваются из области наибольшей интенсивности“. Поэтому для захвата такого типа частиц необходимо создание оптической потенциальной ямы, т.е. такой структуры света, чтобы частица, находясь в области минимальной интенсивности, была равномерно окружена светом относительно данной области. Для создания оптической потенциальной ямы и осуществления полного трехмерного захвата микрообъектов было предложено использовать так называемые „бутылочные пучки“, т.е. пучки или трехмерные оптические ловушки, у которых в области перетяжки существует изолированный ноль интенсивности, равномерно окруженный зоной высокой интенсивности света [3,4]. Ключевую роль в создании такой

структуры играет сингулярный пучок с минимумом интенсивности на оси. Потенциал, заключенный в уникальных свойствах таких пучков, еще далеко не исчерпан, и дальнейшие исследования в данном направлении дают возможность усовершенствовать механизм захвата и манипулирования частицами с помощью сингулярных оптических пучков. Так, например, недавние исследования показали, что поляризация света также влияет на качество захвата, поэтому возможность управления поляризационными состояниями оптических пучков дает дополнительную степень свободы в способе захвата и осуществлении манипуляций по перемещению захваченных частиц в пространстве [5,6].

Как было показано в работах [6,7], формирование полностью замкнутой оптической ловушки можно осуществить при распространении циркулярно поляризованного гауссова пучка вдоль оптической оси одноосного кристалла. В результате прохождения анизотропной среды на выходе кристалла в ортогональной относительно начальной циркулярно поляризованной компоненте пучка рождается оптический вихрь, топологический заряд которого на 2 единицы отличается от заряда исходного пучка [6,8]. С другой стороны, в результате двулучепреломления, при прохождении гауссова пучка вдоль оптической оси одноосного кристалла, из кристалла выйдет измененный пучок, представляющий суперпозицию обыкновенного и необыкновенного пучков, перетяжки которых при фокусировке сдвинуты относительно друг друга вдоль оптической оси, а между ними наблюдается ярко выраженный минимум интенсивности. Таким образом, формируется единичная трехмерная оптическая ловушка. Однако для многих прикладных задач захвата и манипулирования микрочастицами необходимы не только единичные оптические ловушки, но и их трехмерные массивы.

В предлагаемой работе рассмотрено формирование массивов трехмерных ловушек при прохождении вдоль оси кристалла не единичного гауссова пучка, а массива гауссовых пучков, полученного с помощью амплитудного экрана. Ось каждого пучка в массиве наклонена на небольшой угол относительно оптической оси кристалла. Как было показано в работе [9], наклон относительно оси распространения  $z$  отображается как  $y \rightarrow y' + i\alpha z_0$ , где  $\alpha$  — угол между оптической осью кристалла и направлением распространения (осью) пучка в массиве.

Для экспериментального исследования процесса распространения массива гауссовых пучков сквозь среду одноосного кристалла и впоследствии формирования массива трехмерных оптических ловушек исполь-

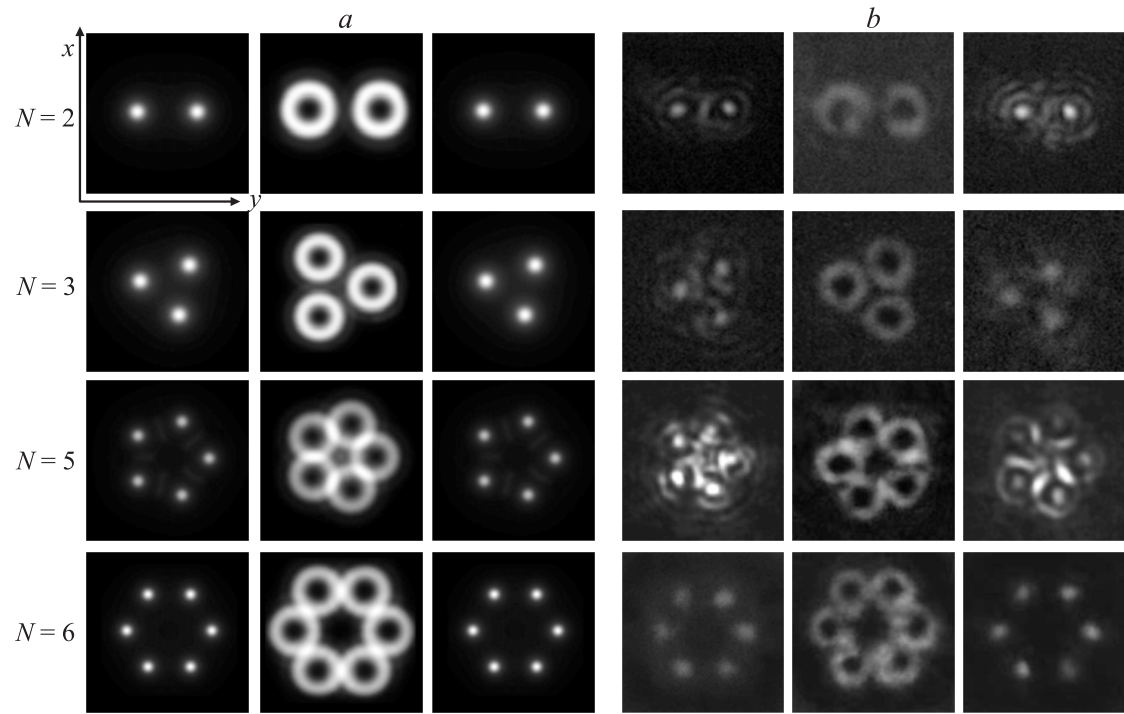


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: источник лазерного излучения ( $\lambda = 634 \text{ nm}$ );  $D$  — амплитудный экран, формирующий  $N$  гауссовых пучков;  $P$  — поляризатор;  $\lambda/4$  — четвертьволновая пластинка;  $\text{Cr}$  — одноосный кристалл — основной элемент для генерации трехмерных оптических ловушек (направление распространения массива гауссовых пучков совпадает с оптической осью кристалла);  $L1, L2$  — фокусирующие линзы.

звалась экспериментальная установка, схематически представленная на рис. 1.

Определим элементы экспериментальной установки: длина кристалла ниобата лития  $d = 20 \text{ mm}$ , его ось ориентирована в плоскости распространения массива пучков. На выходе из кристалла пучок оказывается в среде с показателем преломления  $n = 1$  и распространяется свободно вплоть до плоскости тонкой линзы, расположенной на заданном расстоянии от его выходной грани.

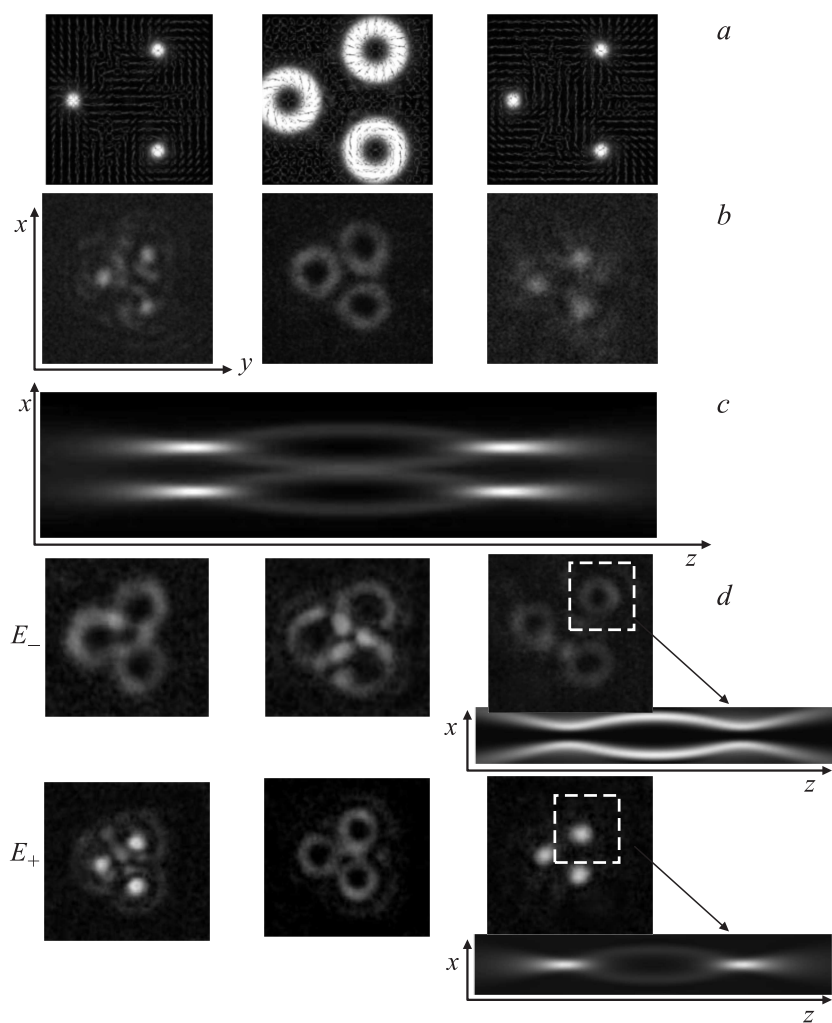
Как и в случае формирования единичной оптической ловушки, поле каждого пучка массива на выходе из кристалла можно представить в виде суперпозиции обыкновенного и необыкновенного пучков. В результате фокусировки вышедшего из кристалла массива пучков четко наблюдается у каждого пучка массива два фокуса, разделенных областью низкой интенсивности. Компьютерное моделирование поперечного распределения интенсивности представлено на рис. 2, *a*. Экспериментальные данные (рис. 2, *b*) с хорошей степенью точности совпадают с теоретическими расчетами.



**Рис. 2.** Картины поперечного распределения интенсивности сформированных массивов оптических ловушек после одноосного кристалла ниобата лития.

Как было показано в работе [6], расстояние между перетяжками единичного пучка зависит не только от двулучепреломляющих свойств кристалла, но и от его длины. В случае с генерацией массива, состоящего из  $N$  пучков, зависимость расстояния между перетяжками по продольной координате остается той же, поэтому, с одной стороны, управлять свойствами сформированного массива ловушек становится возможным изменением геометрических параметров оптической системы. С другой стороны, изменение параметров фокусирующей системы и ее расстояние от выходной грани кристалла позволяют управлять формой сформированной оптической ловушки, а при оптимальном выборе параметров интенсивность внутри ловушки может быть на несколько порядков ниже интенсивности света в фокальных плоскостях, что, несомненно, является приоритетным в осуществлении устойчивого захвата частиц в газовой среде [6,7].

На примере массива, состоящего из трех сингулярных пучков, проведен анализ его структуры поля (рис. 3). Как видно из теоретического построения (рис. 3, *a-c*), особенностью полученного массива оптических ловушек является неоднородное пространственное распределение поляризации, поэтому изменить характер распределения интенсивности в нем можно, вырезая из него то или иное состояние поляризации дополнительными поляризационными элементами (рис. 3, *d*). Распределения интенсивности ортогонально циркулярно поляризованных компонент на выходе из кристалла  $E_+$  и  $E_-$  показывают схожую структуру в области между двумя перетяжками, но принципиально разную — в области перетяжек необыкновенной и обыкновенной компонент. Так, в случае правоциркулярно поляризованного массива гауссовых пучков на входе в кристалл в областях перетяжек поле правой циркулярной компоненты  $E_+$  представляет собой гауссово распределение с максимумом интенсивности по центру каждого пучка массива, тогда как поле левоциркулярно поляризованной компоненты  $E_-$  будет содержать линию нулевой интенсивности вдоль оси каждого пучка массива. Выбирая право- или левополяризованную компоненту поля на выходе из кристалла, возможно сформировать либо массив полностью замкнутых 3-мерных ловушек, либо массив ловушек, позволяющих перемещаться частице вдоль продольного направления. Таким образом, мы имеем возможность не только захватывать частицы, но и в зависимости от целей исследования изменять сам способ их захвата и манипулирования без изменения схемы экспериментальной установки, управляя лишь состоянием поляризации светового поля на выходе из кристалла.



**Рис. 3.** Распределение интенсивности и поляризации в массиве с  $N = 3$  оптических ловушек после кристалла ниобата лития.

В результате проведенного исследования предложенным способом сформированы массивы с количеством оптических ловушек от 2 до 6. При этом наиболее существенными преимуществами формирования массивов ловушек на основе использования одноосных кристаллов являются:

— возможность управления распределением интенсивности в сформированных массивах путем изменения геометрических параметров системы;

— формирование массива полностью открытых по продольной компоненте оптических ловушек либо замкнутых 3-мерных ловушек, в зависимости от целей эксперимента, без изменения принципиальной схемы экспериментальной установки.

Подобные массивы оптических ловушек могут быть использованы в устройствах захвата и манипулирования поглощающих свет нано- и микрочастиц как в жидкостях, так и взвешенных в газовых средах и, в частности, в воздухе.

## Список литературы

- [1] *Shvedov V.G., Hnatovsky C., Rode A.V., Krolikowski W.* // Opt. Express. 2011. V. 19 (18). P. 17350–17356.
- [2] *Shvedov V.G.* et al. // Nat. Photonics. 2014. V. 242. P. 1–5.
- [3] *Arlt J., Padgett M.J.* // Opt. Lett. 2000. V. 25. P. 191–193.
- [4] *Bokor N., Davidson N.* // Opt. Commun. 2007. V. 279. P. 229–234.
- [5] *Hnatovsky C., Shvedov V.G., Shostka N.* et al. // Opt. Lett. 2012. V. 37. P. 226–228.
- [6] *Shvedov V.G., Hnatovsky C., Shostka N., Krolikowski W.* // JOSA. B. 2013. V. 30. P. 1–6.
- [7] *Rubass A.F., Egorov Yu.A., Fadeyeva T.A., Volyar A.V.* // Proc. SPIE. 2005. V. 6023. P. 230–238.
- [8] *Volyar A.V., Egorov Ya.A., Rubass A.F., Fadeeva T.A.* // Techn. Phys. Lett. 2004. V. 30. P. 701–704.
- [9] *Fadeeva T.A., Shvedov V.G., Izdebskaya Ya.V.* et al. // Opt. Express. 2010. V. 18. P. 10848.