

УДК 535.212; 535.42

МАНИПУЛЯЦИЯ МИКРОСКОПИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ДВУХЛЕПЕСТКОВЫМИ СВЕТОВЫМИ ПОЛЯМИ

С. П. Котова, Н. Н. Лосевский, А. М. Майорова, Д. В. Прокопова

Представлены результаты экспериментов по оптической манипуляции взвешенными в жидкости микросферами латекса двухлепестковыми световыми полями, претерпевающими поворот при распространении и фокусировке. Оценена предельная скорость, при которой частицы удерживаются в оптической ловушке. Демонстрируется управляемый поворот частиц и изменение расстояния между ними.

Ключевые слова: оптическая манипуляция, спиральные пучки света, двухлепестковые световые поля, дифракционные оптические элементы.

Введение. Структурированные световые поля нашли свое применение во многих задачах [1], в том числе, существенно расширили возможности лазерных пинцетов, открытых А. Эшкиным [2] и нашедших множество приложений в коллоидной физике, биологии и биомедицине [3, 4]. Использование световых полей с заданным распределением интенсивности и углового момента позволяет реализовать перемещение микро- и наночастиц по разнообразным траекториям, вращение микрочастиц, их растяжение, скручивание и т. д. В работах [5–9] для захвата пары сферических микрочастиц, управления их положением с субмикронной точностью, для контролируемого поворота микроробъектов используется пучок света, представляющий собой пару оптических вихрей. Предлагаются различные способы формирования подобных двойных ловушек: за счет острой фокусировки циркулярно поляризованного пучка Эйри [5], использования кольцевых оптических вихрей типа “ласточкин хвост” [6], формируемых пространственным модулятором света пучков в виде пары оптических вихрей с одинаковым топологическим зарядом [7], реализации так называемых лепестковых полей [8]. В этих работах теоретически и экспериментально демонстрируется возможность управления свойствами оптических ловушек при изменении параметров используемых световых пучков.

Самарский филиал ФИАН, 443011 Россия, Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: prokopovadv@lebedev.ru.

С учетом интереса к развиваемой технике оптического манипулирования целью настоящей статьи является исследование возможности оптического захвата и манипулирования за счет использования двухлепестковых световых полей, рассчитанных на основе оптики спиральных пучков. Двухлепестковые световые поля имеют в структуре интенсивности два ярких максимума, которые вращаются вокруг общего центра при распространении вблизи плоскости фокусировки системы. Методы формирования подобных световых полей и их свойства подробно исследовались в СФ ФИАН применительно к задачам флуоресцентной микроскопии [10–14]. Были разработаны способы формирования двухлепестковых полей за счет дифракционных оптических элементов (ДОЭ), реализованных с помощью пространственно-временных модуляторов света (ПВМС). С помощью модифицированного итерационного алгоритма Герчберга–Сэкстона на основе фазового распределения двухлепесткового спирального пучка света были получены фазовые ДОЭ, формирующие в области фокусировки двухлепестковое поле с эффективностью $\eta \geq 50\%$ [10]. Полученные ДОЭ используются в настоящей работе в схеме оптического пинцета.

Методика эксперимента. Эксперименты по оптической манипуляции микрообъектами при помощи двухлепестковых световых полей проводились на типичной установке лазерного пинцета, сконструированной на основе микроскопа. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался DPSS лазер с длиной волны излучения $\lambda = 532$ нм, выходная мощность варьировалась от 2 до 50 мВт. Двухлепестковое световое поле формируется с помощью фазового ПВМС Holoeye Pluto NIR, на который подается специально рассчитанная фазовая маска, представленная на рис. 2 [10], разрешение 1024×1024 пикселя, физический размер при реализации на ПВМС Holoeye Pluto NIR 8.192 мм. Полученное световое поле фокусируется микрообъективом с высокой числовой апертурой (40X, 0.65 NA) в заданную плоскость, формируя двухлепестковую вихревую оптическую ловушку.

В качестве микрообъектов для манипулирования использовались микросферы латекса, взвешенные в дистиллированной воде. Диаметр микросфер 2.9 мкм. Световое поле фокусировалось в плоскость кюветы с образцами. Суммарная мощность излучения лазера в рабочей зоне пинцета составила 8 мВт.

Результаты и их обсуждение. Двухлепестковые поля обеспечивают возможность захватывать сразу два объекта и одновременно поворачивать их. После захвата двух микросфер двумя “лепестками” сформированного распределения производилась перефокусировка света вдоль оси Z за счет введения дополнительной сферической линзы в

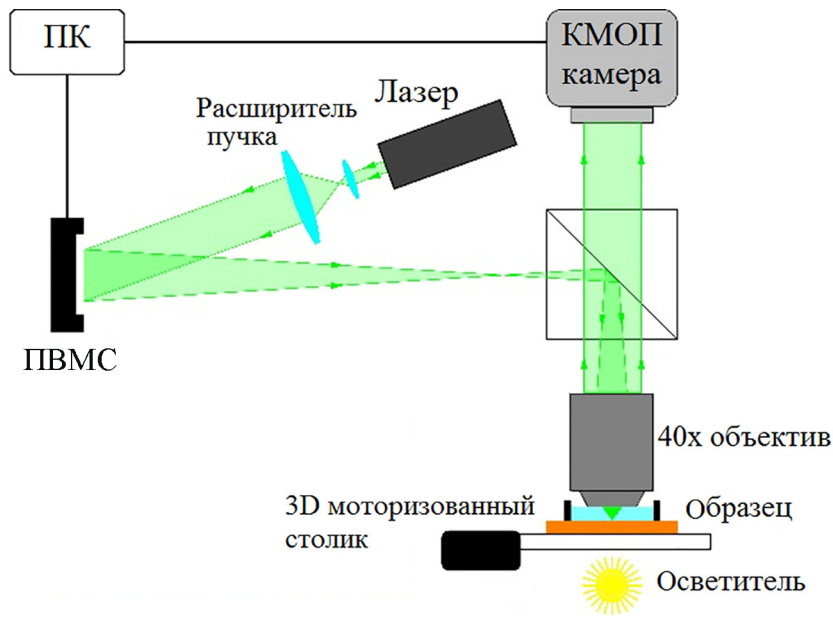


Рис. 1: Принципиальная схема установки для оптической манипуляции.



Рис. 2: Используемая для формирования двухлепесткового поля фазовая маска в градациях серого, черный цвет соответствует фазе 0, белый – 2π , разрешение 1024×1024 пикселя, физический размер при реализации на ПВМС Holoeye Pluto NIR 8.192 мм.

распределение фазы на ПВМС. При этом происходит контролируемый поворот распределения вокруг оптической оси и, соответственно, контролируемый поворот вокруг оси удерживаемых ловушкой микрочастиц. Микрочастицы были повернуты на 90 градусов. Результаты экспериментов представлены на рис. 3: первый столбец – распределение

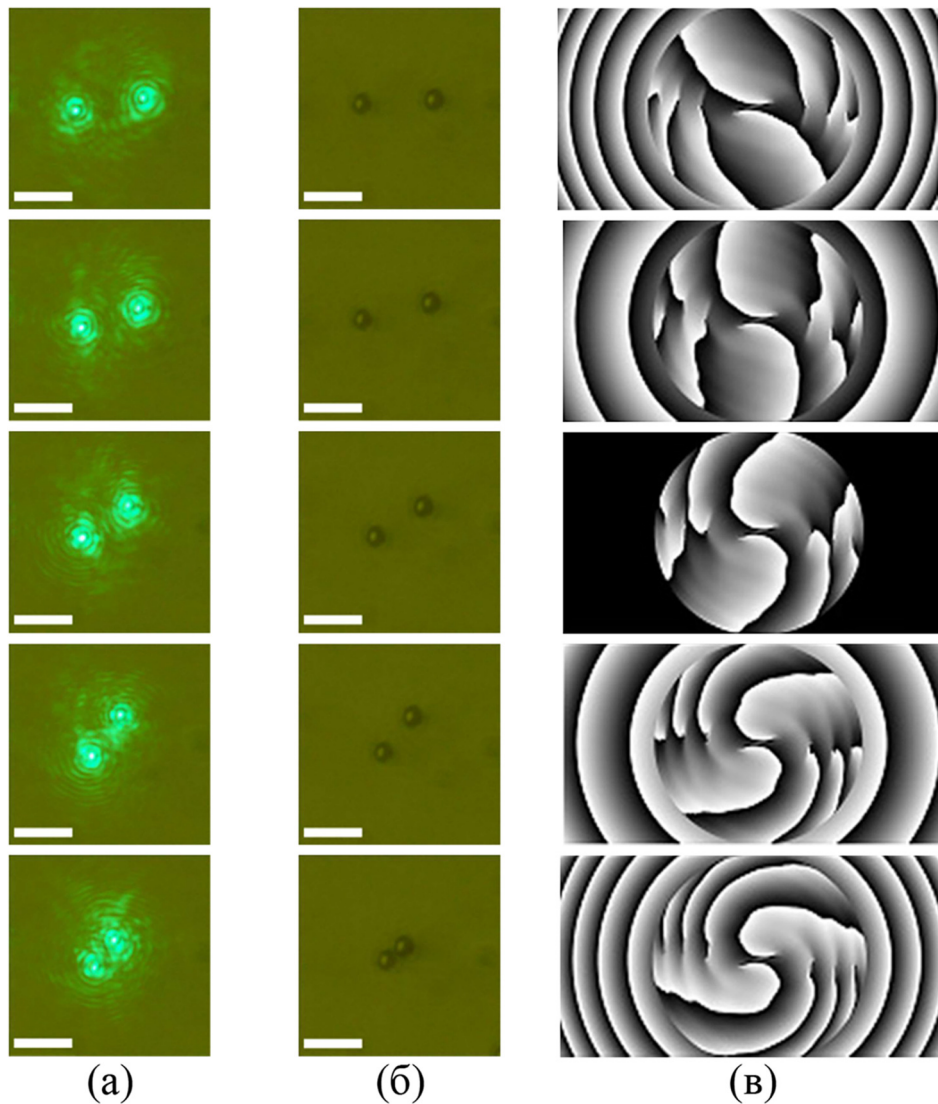


Рис. 3: Результаты экспериментов по оптической манипуляции микросферами латекса двухлепестковым световым полем. Первый столбец (а) – распределение интенсивности в рабочей зоне при различной дефокусировке, сторона кадра 35 мкм, длина белого прямоугольника 10 мкм; второй столбец (б) – положение микросфер в ловушке при соответствующей дефокусировке, сторона кадра 35 мкм, длина белого прямоугольника 10 мкм; третий столбец (в) – распределение фазы на ПВМС, обеспечивающее соответствующее положение двух микрообъектов.

интенсивности в рабочей зоне при различной дефокусировке; второй столбец – положение микросфер в ловушке при соответствующей дефокусировке; третий столбец – распределение фазы на ПВМС, обеспечивающее соответствующее положение двух мик-

рообъектов. ПВМС освещается пучком, ограниченным круглой апертурой диаметром 7 мм, что немного меньше диаметра элемента, формирующего двухлепестковое поле. Различие диаметра пучка и формируемого на ПВМС элемента позволяет исключить дифракцию на краях элемента.

Как видно из рис. 3, при повороте распределения интенсивности на 45° изменяется расстояние между максимумами в распределении интенсивности и, как следствие, захваченными частицами. Расстояние между центрами частиц меняется от 12.5 до 4 мкм (второй столбец (б) рис. 3).

Ранее было показано, что, задавая параметр поворота спирального пучка, можно управлять скоростью поворота формируемого двухлепесткового светового распределения [15]. Параметр поворота θ_0 является характерным параметром спирального пучка, определяющим, на какой угол повернется распределение интенсивности при распространении от ближней до дальней зоны [16]. Выбор параметра поворота при расчете ДОЭ определяет зависимость угла поворота формируемого поля от расстояния в плоскости фокусировки [14]. Эти факторы обеспечивают возможность контролируемого поворота захватываемых микрообъектов и управления их положением. При этом максимальная скорость, с которой можно вращать частицы, будет определяться не только параметрами светового пучка, но и жесткостью оптической ловушки.

Жесткость ловушки оценивалась экспериментально. Для этого измерялась скорость поступательного перемещения кюветы с жидкостью, при которой происходил отрыв микрообъектов от ловушки. Она составила величину около 50 мкм/сек. Для используемой геометрии эксперимента это соответствует максимальной угловой частоте, при которой частицы будут удерживаться в ловушке, около 5 Гц.

Экспериментально продемонстрированы возможности двухлепестковых световых полей для захвата, сближения и поворота одновременно двух микрочастиц. Таким образом, двухлепестковое световое поле может быть полезно для оптической манипуляции при проведении сборки или разделения частей микроконструкций. Предлагаемая технология может быть альтернативой методикам, описанным в [6, 7]. При этом использование свойств спиральных пучков света при расчете соответствующих ДОЭ, с одной стороны, позволяет существенно повысить их энергетическую эффективность, а с другой стороны, обеспечивает возможность одновременного управления положением микрообъектов за счет варьирования параметров спирального пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 20-02-00671 А, № 19-32-90078 Аспиранты).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, et al., *J. Opt.* **19**(1), 013001 (2017). DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/013001.
- [2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu, *Optics letters* **11**(5), 288 (1986). DOI: 10.1364/OL.11.000288.
- [3] I. A. Favre-Bulle, A. B. Stilgoe, E. K. Scott, H. Rubinsztein-Dunlop, *Nanophotonics* **8**(6), 1023 (2019). DOI: 10.1515/nanoph-2019-0055.
- [4] K. Cheng, J. Guo, Y. Fu, J. Guo, *Sensors and Actuators A: Physical* **322**, 112616 (2021). DOI: 10.1016/j.sna.2021.112616.
- [5] Z. Chen, Y. Jiang, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **244**, 106851 (2020). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106851.
- [6] J. Jiang, D. Xu, Z. Mo, et al., *Opt. Express* **30**, 11331 (2022). DOI: 10.1364/OE.453165.
- [7] J. Wen, B. Gao, G. Zhu, et al., *Optics and Lasers in Engineering* **148**, 106773 (2022). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106773.
- [8] V. Shahabadi, E. Madadi, *JOSA B* **37**(12), 3665 (2020). DOI: 10.1364/JOSAB.402944.
- [9] Z. Qiu, B. Cao, K. K. Huang, et al., *Optics Communications* **510**, 127915 (2022). DOI: 10.1016/j.optcom.2022.127915.
- [10] В. Г. Волостников, Е. Н. Воронцов, С. П. Котова и др., *Известия РАН. Серия физическая* **80**(7), 841 (2016). DOI: 10.3103/S1062873816070248.
- [11] Е. Н. Воронцов, С. П. Котова, Н. Н. Лосевский и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **45**(3), 9 (2018). DOI: 10.3103/S1062873816070248.
- [12] Е. Н. Воронцов, Н. Н. Лосевский, Д. В. Прокопова и др., *Компьютерная оптика* **40**(2), 158 (2016). DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-2-158-163>.
- [13] Д. В. Прокопова, Е. Н. Воронцов, С. П. Котова и др., *Известия РАН. Серия физическая* **83**(12), 1608 (2019). DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873819120232>.
- [14] Д. В. Прокопова, С. П. Котова, *Фотоника* **14**(2), 170 (2020). DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.170.182.
- [15] Е. Н. Воронцов, Н. Н. Лосевский, Д. В. Прокопова и др., *Компьютерная оптика* **40** (2), 158 (2016). DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-158-163.
- [16] Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников, *УФН* **174**(12), 1273 (2004). DOI: 10.1070/PU2004v047n12ABEH001802.

Поступила в редакцию 17 августа 2022 г.

После доработки 4 октября 2022 г.

Принята к публикации 5 октября 2022 г.