

УДК 535.15:53.06

ОПТОТЕРМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ НА ОСНОВЕ СЕКТОРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2023 г. С. П. Котова¹, *, Н. Н. Лосевский¹, А. М. Майорова¹, С. А. Самагин¹

¹Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

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

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Представлен способ реализации секторных дифракционных оптических элементов, формируемых из фазовых распределений простых оптических элементов. Продемонстрированы захват и вращение микрочастиц латекса диаметром 3–4 мкм в оптотермических ловушках с использованием сформированных элементов.

DOI: 10.31857/S0367676523702903, EDN: QPOKHC

ВВЕДЕНИЕ

Предложенные А. Эшкиным [1, 2] однопучковые оптические ловушки, известные также как лазерные пинцеты, сегодня находят свое применение в биологических, химических, медицинских и биофизических исследованиях, в областях микромеханики и охлаждения атомов [3–5]. При этом по-прежнему широко проводятся исследования, направленные на изучение новых типов структурированных световых полей [6–8] и расширение функциональных возможностей оптических пинцетов за счет их применения. Особое место занимает оптическое манипулирование ансамблем частиц. Несмотря на то, что такая возможность давно успешно реализована с помощью голографических пинцетов [9, 10], актуальной остается задача манипулирования микронными и субмикронными объектами (ансамблем частиц) с использованием одного светового пучка с возможностью контроля количества захватываемых объектов, их точным позиционированием и управлением скоростью их вращения. В работах [11–16] для манипуляций парой объектов используются весьма разнообразные пучки: циркулярно-поляризованные пучки Эйри [11], оптические вихри типа “ласточкин хвост” [13], лепестковые световые поля [14, 16], включая двухлепестковые световые пучки на основе спиральных пучков [16]. В работе [17] продемонстрировано формирование фазовых голограмм методом суперпозиции модуляций для получения набора вихревых ловушек. Показана возможность независимого управления положением ловушек и их топологическим зарядом. Однако метод характеризуется невысокой дифракционной эффективностью (не более 30%).

Для захвата большего количества микрообъектов можно использовать кольцевые оптические ловушки, формируемые с помощью пучков Бесселя высоких порядков, мод Лагера–Гаусса, пучков Эйри, а также ловушки в виде произвольных световых контуров [18–20]. В этом случае трудно регулировать количество захватываемых частиц, управлять положением частиц (а именно позиционировать их на определенном расстоянии друг от друга), “выключать” вращение частиц в вихревых световых ловушках. Для решения этих проблем З. Ву и соавторы [18] для захвата нескольких объектов предлагают использовать осесимметричные вихревые пучки (rotationally-symmetric power-exponent-phase vortex beam (RSPEPVB)) с фазовой структурой следующего вида: $\exp\{i2\pi[\text{rem}(l\varphi, 2\pi)/2\pi]^n\}$, где φ – полярный угол, $\text{rem}(l\varphi, 2\pi)$ – функция остатка от деления. Фаза RSPEPVB определяется топологическим зарядом l и порядком показателей степени n . Такие пучки позволили авторам обеспечить многочастичный захват, причем число захватываемых частиц строго контролируется и равно топологическому заряду пучка. Следует отметить многоступенчатость и наличие нескольких элементов в оптической схеме, формирующей данные пучки.

В настоящей статье мы предлагаем способ формирования ловушек для захвата и управления ансамблем микрообъектов за счет использования многосекторных дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Метод позволил реализовать оптотермические ловушки в виде расположенных определенным образом точек либо отрезков. Подход отличается простотой реализации и достаточно высокой дифракционной эффективностью.

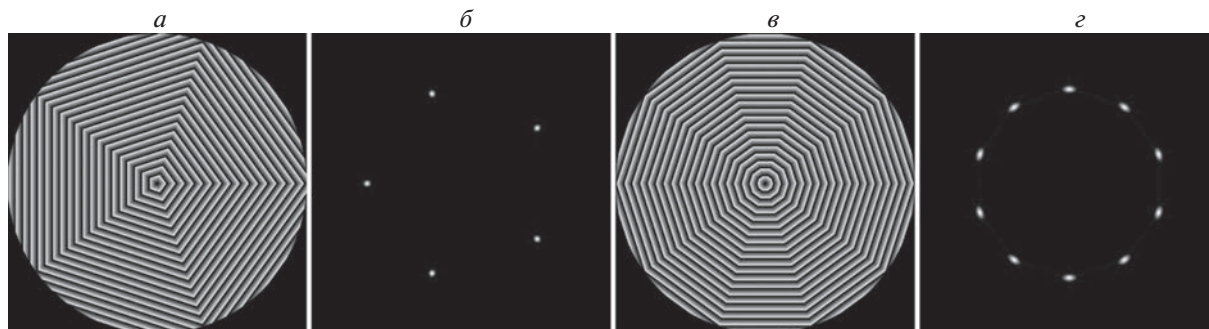


Рис. 1. Секторные ДОЭ для формирования 5- (*а, б*) и 10-точечных (*в, г*) ловушек: фазовые распределения (*а, в*) и соответствующие им рассчитанные распределения интенсивности (*б, г*).

ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЕКТОРНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для захвата и манипулирования ансамблем микрочастиц создавались распределения в виде заданного количества точечных световых пятен, расположенных в вершинах правильного многоугольника, а также распределения в виде набора отрезков, выходящих из центра, либо образующих правильные многоугольники. Фазовая функция дифракционного оптического элемента для этих целей формируется путем деления площади многоэлементного матричного модулятора на отдельные участки. Это известный способ формирования массива отдельных ловушек. Например, в [22] мы демонстрировали возможность формирования этим методом от 8 до 32 независимых ловушек в виде точек, окружностей, отрезков и других распределений с индивидуально регулируемыми пространственными характеристиками. В настоящей статье мы реализуем не независимые ловушки различных форм, а определенные конфигурации точечных ловушек либо ловушек в виде отрезков. Для этого более удобной является секторная структура ДОЭ. Такая структура выгоднее матричной и с точки зрения энергетической эффективности. Это связано с тем, что, как правило, в лазерных пинцетах для формирования оптических ловушек в качестве освещающего пучка используется излучение с Гауссовым распределением интенсивности. Поэтому при формировании ДОЭ логично предположить, что пучок имеет осесимметричное распределение интенсивности с круглой апертурой, и соответственно использовать секторную структуру ДОЭ.

Многоэлементный ДОЭ секторного типа представляет собой фазовый элемент, состоящий из набора областей в виде секторов круга, в каждом из которых задано свое распределение фазовой задержки, соответствующее простому оптическому элементу.

Например, для формирования распределения интенсивности в виде набора пятен (и соответственно набора точечных оптических ловушек

при реализации оптического пинцета) равной мощности нужно разделить область апертуры элемента на требуемое число равных секторов (количество секторов равно количеству точечных ловушек) и в каждом из них задать распределение фазовой задержки призмы (клина) (рис. 1). Направление и величина наклона волнового фронта пучка, сформированного в каждой области, будет определять положение пятна в плоскости наблюдения. Были реализованы случаи 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 15 равноотстоящих ловушек, расположенных по кольцу. На рис. 1 в качестве примера представлены случаи формирования 5- и 10-точечных ловушек: фазовые распределения (*а, в*) и соответствующие им рассчитанные в фокальной плоскости распределения интенсивности (*б, г*) соответственно. При расчетах здесь и в дальнейшем предполагалось, что падающий на фазовый элемент световой пучок имеет однородное распределение интенсивности и плоский волновой фронт с круглой апертурой.

Можно управлять диаметром формируемого распределения интенсивности: если использовать оптический клин меньшего наклона, получим кольцо точек меньшего диаметра.

Распределение интенсивности в самом пятне будет отличаться от осесимметричного из-за формы субэлементов. Однако в задачах манипулирования данным обстоятельством можно пренебречь, поскольку размер микрообъектов, как правило, сравним или больше пятна излучения.

Добавление в каждый сектор фазовой задержки цилиндрической линзы обеспечивает превращение фокальной точки в отрезок. Аналогично случаю формирования точечных световых пятен, из-за формы секторов наблюдается неравномерное распределение интенсивности вдоль отрезка, а за его положение отвечают направление и величина клина в фазовом распределении. Ориентация отрезка задается ориентацией распределения фазовой задержки, соответствующей цилиндрической линзе, а его длина определяется величиной оптической силы линзы.

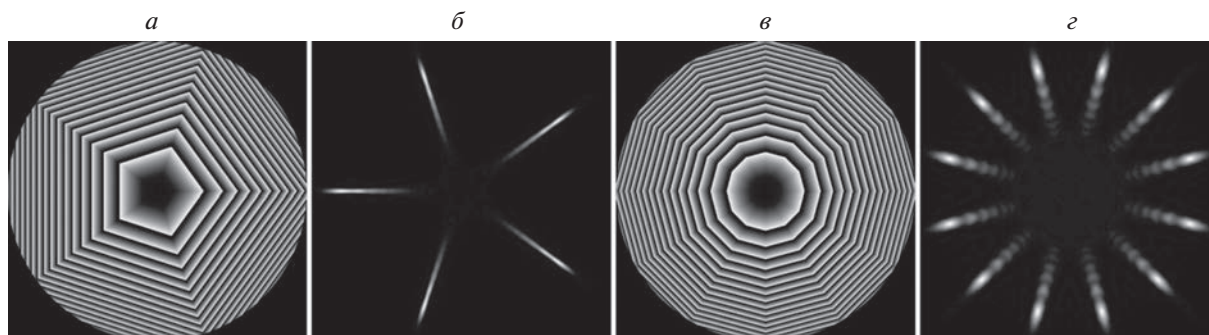


Рис. 2. Секторные ДОЭ для формирования 5- (*а, б*) и 12-лучевых (*в, г*) ловушек: фазовые распределения (*а, в*) и соответствующие им рассчитанные распределения интенсивности (*б, г*).

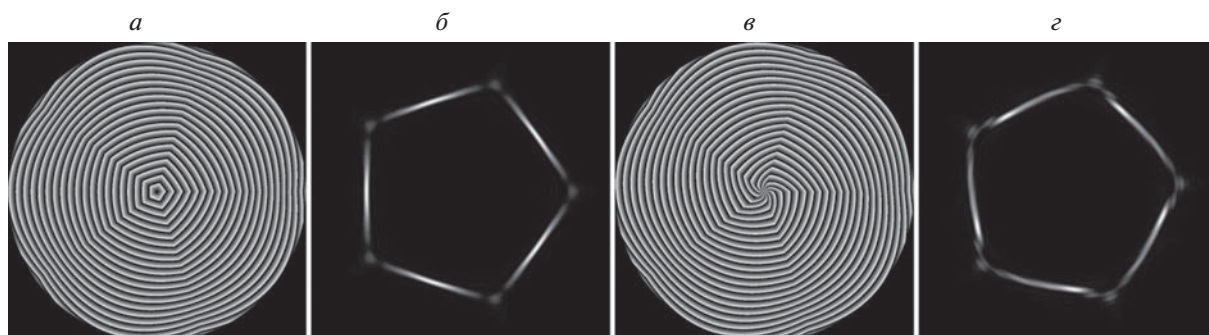


Рис. 3. Секторные ДОЭ для формирования ловушки в виде пятиугольника (*а, б*) и вихревой ловушки в виде пятиугольника (*в, г*). Фазовые распределения (*а, в*) и соответствующие им рассчитанные распределения интенсивности (*б, г*).

Были реализованы случаи 5- и 12-лучевых ловушек (5 или 12 отрезков, исходящих из одной точки) (рис. 2) и ловушек в виде правильных многоугольников, в частности пятиугольника, представленного на рис. 3*а, б*.

Интересной является возможность формирования вихревых оптических полей и соответственно вихревых оптических ловушек с помощью предлагаемой техники секторных ДОЭ. Для этого необходимо к распределению фазовой задержки сформированного секторного элемента добавить фазовую маску спиральной фазовой пластинки с требуемой величиной топологического заряда. Фазовое распределение для формирования вихревой ловушки в виде пятиугольника и соответствующее распределение интенсивности приведены на рис. 3*в* и 3*г*.

Заметим, что рассматриваемый “секционный” подход, заключающийся в делении апертуры на области (сектора), позволяет формировать более широкий круг полей: точки и отрезки можно располагать произвольным образом (не обязательно по кольцу, в виде звезд либо правильных многоугольников). На рис. 4 приведены примеры таких “произвольных распределений”. Для наглядности сектора с фазовыми распределениями (рис. 4*а* и 4*в*) и формируемые в фокальной плоскости распределения интенсивности в виде точек (*б*) и от-

резков (*г*) пронумерованы. Номер сектора на рис. 4*а* и 4*в* с определенным фазовым распределением соответствует номеру формируемой ловушки на рис. 4*б* и 4*г*. Видно, что вид фазового распределения определяет форму ловушки и задает ее положение, позволяя формировать различные конфигурации.

Сформированные маски использовались в экспериментах по манипуляции.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МАНИПУЛИРОВАНИЮ МИКРООБЪЕКТАМИ

В экспериментах по манипулированию были реализованы так называемые оптотермические ловушки. В таких ловушках за счет поглощения лазерного излучения формируются конвекционные потоки, которые и обеспечивают эффективный и быстрый перенос микрообъектов различных размеров и геометрических форм в область действия сил захвата светового поля [23–26].

Схема оптотермической ловушки неоднократно описывалась нами [20, 26]. Источником излучения служил DPSS лазер с длиной волны излучения 0.53 мкм, выходная мощность лазера варьировалась от 185 до 260 мВт. Конвекционная составляющая ловушки формировалась за счет того, что в

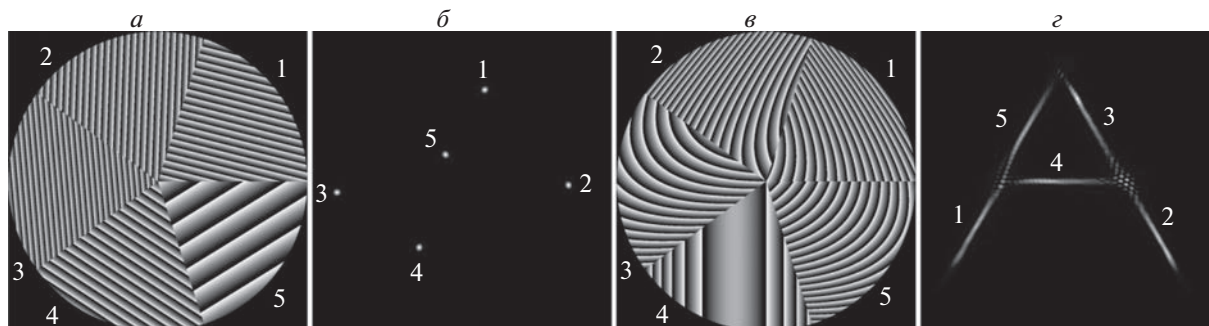


Рис. 4. Фазовые распределения (*а, в*) для формирования произвольно расположенных точек (*б*) и отрезков — в виде буквы “А” (*г*). Номер сектора на рис. (*а, в*) соответствует номеру формируемой ловушки на рис. (*б, г*).

качестве дна кюветы с образцами использовался поглощающий на длине волны 0.53 мкм светофильтр ОС 13. Расширенный коллимированный пучок лазера освещал ЖК пространственный модулятор света HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011 (1080×1920 пикселей), работающий в режиме отражения. С помощью ЖК ПМС формировалось световое поле с заданным распределением интенсивности, которое фокусировалось микрообъективом ($40\times$) в заданную плоскость, с одной стороны формируя оптическую ловушку, а с другой, за счет поглощения светофильтром, создавая градиент температуры и соответственно конвекционные потоки. Суммарная мощность излучения в рабочей зоне пинцета составляла от 50 до 70 мВт. В качестве микрообъектов манипулирования использовались микрочастицы латекса различных диаметров (3–4 мкм), взвешенные в дистиллированной воде.

Для экспериментальной реализации структурированных световых полей и их управления использовался специальный программный модуль [27], с помощью которого на ЖК ПМС передаются фазовые профили ДОО, которые преобразуются модулятором в пространственное распределение фазовой задержки для падающего на него излучения. Программный модуль позволяет реализовать изменение размера фазового распределения на транспаранте, что обеспечивало масштабирование — изменение расстояния между ловушками, а также вращение фазового распределения на модуляторе, за счет которого были реализованы повороты распределений интенсивности в пинцете (повороты набора ловушек как единого целого). Управление работой ЖК ПМС осуществлялось с помощью 4-ядерного ПК.

Эксперименты по захвату манипулированию микрочастицами проводились с 5-точечной ловушкой, а также 5-лучевой ловушкой. Во всех случаях микрочастицы довольно быстро с относительно больших расстояний переносились конвекционными потоками в зону действия сил захвата светового поля независимо от вида распределения интенсивности. Микрочастицы захватываются точечными ловушками, расположенными

в вершинах правильных многоугольников, либо выстраиваются вдоль отрезков лучевой ловушки. Было реализовано контролируемое вращение захваченного ловушками ансамбля микрообъектов за счет вращение фазового распределения на модуляторе.

На рис. 5 приведены кадры из видео, иллюстрирующие эксперименты по манипулированию — экспериментально реализованные ловушки: 5-точечная (*а*), 5-лучевая (*б*), в виде пятиугольника (*в*), 12-лучевая, и кадры с захваченными частицами (*д–з*). Кадры (*д, е*) иллюстрируют поворот 5-точечной ловушки с захваченными частицами, а кадры (*ж, з*) — поворот 5-лучевой ловушки с захваченными частицами. На кадре (*д*) точечные ловушки с захваченными частицами пронумерованы цифрами от 1 до 5; в правой нижней части рисунка пунктиром объединена группа микрочастиц. Из кадра (*е*), видно, что группа микрочастиц, выделенная пунктиром, остается неподвижной, в то время как все пронумерованные точечные ловушки 1–5, повернулись примерно на 30 градусов по часовой стрелке. Иными словами, на кадре (*е*) 5-точечная ловушка повернулась на 30 градусов по часовой стрелке относительно своего положения на кадре (*д*). На кадрах (*ж*) и (*з*) видно, что микрообъекты выстраиваются вдоль лучей ловушки и удерживаются при ее повороте. Стрелками 1 и 2 на кадре (*ж*) обозначены два луча с захваченными частицами. Одна из незахваченных частиц выделена пунктиром. На кадре (*з*) видно, что выделенная пунктиром частица не изменила своего положения, в то время как лучи ловушки 1–2 и соответственно захваченные ими частицы повернулись примерно на 25 градусов по часовой стрелке относительно своего положения на кадре (*ж*).

В табл. 1 представлены скорости вращения различных типов структурированных ловушек. Это максимальные скорости вращения распределения фазы, которые можно достичь на нашей установке. В общем случае скорость вращения распределения определяется скоростью работы транспаранта и скоростью вычислительной работы компьютера (т.е. его мощностью), при этом

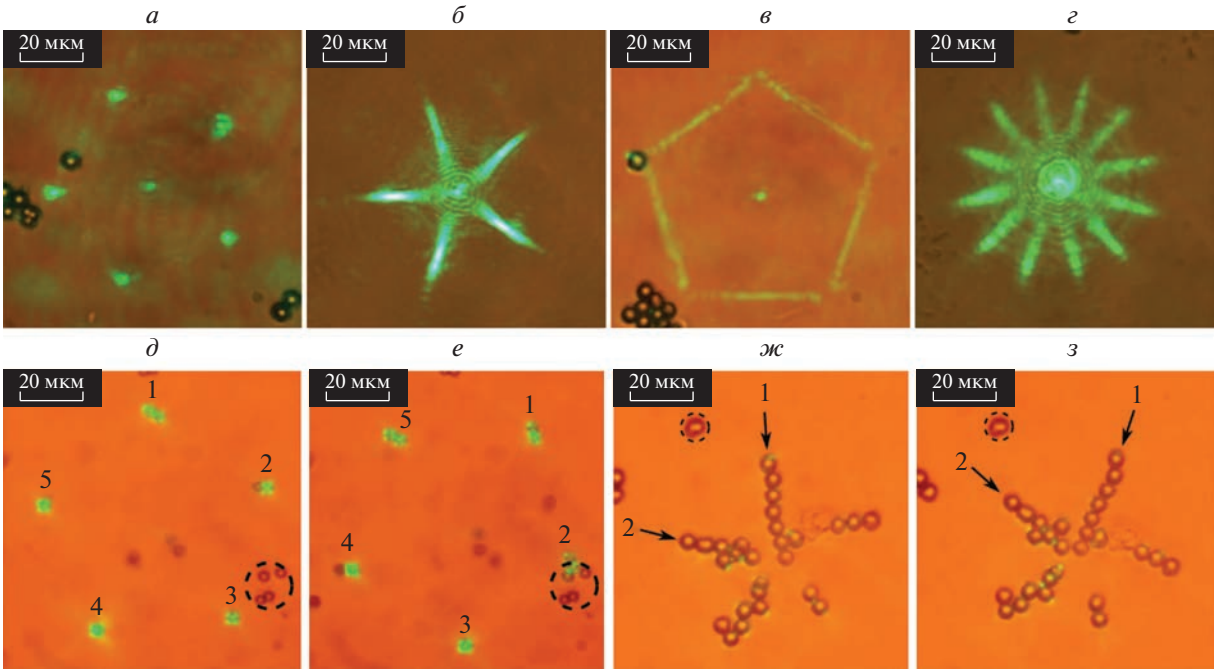


Рис. 5. Эксперименты по манипулированию микрочастицами ловушками разных типов. Верхняя строка (а–д): примеры реализованных ловушек. Нижняя строка: кадры из видео, иллюстрирующие захват и поворот микрочастиц 5-точечной ловушкой (д, е) и 5-лучевой ловушкой (ж, з).

скорость обработки каждого кадра зависит от сложности распределения. Для указанных в табл. 1 скоростей частицы латекса 3 и 4 мкм удерживались в поле ловушек. Понятно, что максимально допустимая скорость вращения, при которой микро-объекты удерживаются в ловушке, зависит от жесткости ловушек. В нашем случае скорости вращения, при которых будет зафиксирован отрыв частицы из ловушки, достигнуты не были. Также измерялись максимальные скорости поступательного перемещения ловушки, при которых микрочастицы латекса удерживаются в ней (скорости отрыва). Для 5-точечной масштабированной ловушки и микрочастиц латекса, диаметром 3 мкм эта скорость составила 7 мкм/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен простой способ формирования световых полей различных конфигураций за счет разделения рабочей области модулятора на участки заданной формы, в каждом из которых задается фазовая функция, соответствующая простым оптическим элементам. Полученные данным методом ДОЭ использовались для формирования оптических ловушек в виде заданного количества точек либо отрезков, расположенных определенным образом. Продемонстрированы захват, перемещение и поворот ансамбля микрочастиц размерами 3–4 мкм точечными и многолучевыми ловушками. Поворот осуществляется за счет вращения фазового распределения на модуляторе.

Таблица 1. Экспериментально измеренные скорости вращения микрочастиц латекса в ловушках разного типа

Тип скорости	Вид распределения	Размер микрочастиц, мкм	Значение скорости, град/с
Вращения	5-лучевая ловушка (рис. 5б)	4	5.5
Вращения	5-точечная ловушка (рис. 5а)	3	2.7
Вращения	5-точечная масштабированная ловушка (уменьшенный размер за счет увеличения в 1.5 раза размеров исходного фазового распределения)	3	1.6
Вращения	Ловушка в виде правильного пятиугольника (рис. 5в)	4	4

При этом обеспечивается контролируемый поворот сформированного ансамбля микрочастиц на заданный угол. Предлагаемый способ формирования ансамбля точечных ловушек можно рассматривать как более простую с точки зрения экспериментальной реализации альтернативу способу, рассматриваемому в [21]. Точечные ловушки можно располагать произвольным образом (не обязательно по кольцу), варьировать расстояния как от центра ансамбля, так и между точками. К достоинствам метода можно отнести возможность создания как вихревой (за счет добавления фазового распределения спиральной фазовой пластинки), так и безвихревой конфигураций. Наряду с точечными ловушками были реализованы оптические ловушки в виде отрезков, расположенных в различных конфигурациях. Метод может быть полезен в задачах биомедицины, а также при создании оптоэлектронных микророботов [28]. Возможности секторных ДОО для формирования более сложных конфигураций оптических ловушек, в том числе вихревых, требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S. // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 288.
2. Ashkin A. // IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 2000. V. 6. No. 6. P. 841.
3. Favre-Bulle I.A., Stilgoe A.B., Scott E.K., Rubinsztein-Dunlop H. // Nanophotonics. 2019. V. 8. No. 6. P. 1023.
4. Cheng K., Guo J., Fu Y., Guo J. // Sens. Actuators A. 2021. V. 322. Art. No. 112616.
5. Zemánek P., Volpe G., Jonáš A., Brzobohatý O. // Adv. Opt. Photon. 2019. V. 11. P. 577.
6. Forbes A., de Oliveira, M. and Dennis M.R. // Nature Photonics. 2021. V. 15. P. 253.
7. Котляр В.В., Ковалев А.А., Стафеев С.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 10. С. 1400; Kotlyar V.V., Kovalev A.A., Stafeyev S.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 10. P. 1158.
8. Воляр А.В., Абрамочкин Е.Г., Брецько М.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 10. С. 1392; Volyar A.V., Abramochkin E.G., Bretsko M.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 10. P. 1151.
9. Curtis J.E., Koss B.A., Grier D.G. // Opt. Commun. 2002. V. 207. P. 169.
10. Chapin S.C., Germain V., Dufresne E.R. // Opt. Express. 2006. V. 14. No. 26. P. 13095.
11. Chen Z., Jiang Y. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2020. V. 244. Art. No. 106851.
12. Jiang J., Xu D., Mo Z. et al. // Opt. Express. 2022. V. 30. No. 7. P. 11331.
13. Wen J., Gao B., Zhu G. et al. // Opt. Laser. Engin. 2022. V. 148. P. 106773.
14. Shahabadi V., Madadi E. // JOSA B. 2020. V. 37. No. 12. P. 3665.
15. Qiu Z., Cao B., Huang K.K. et al. // Opt. Commun. 2022. V. 510. P. 127915.
16. Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М., Прокопова Д.В. // Кр. сообщ. по физике ФИАН. 2022. Т. 49. № 11. С. 9; Kotova S.P., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Prokopova D.V. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2022. V. 49. No. 11. P. 362.
17. Ikonnikov D.A., Vyunisheva S.A., Prokopova D.V. et al. // Laser Phys. Lett. 2023. V. 20. Art. No. 086002.
18. Rodrigo J., Angulo M., Alieva T. // Opt. Express. 2018. V. 26. No. 14. P. 18608.
19. Котова С.П., Лосевский Н.Н., Майорова А.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 12. С. 1685; Kotova S.P., Losevsky N.N., Mayorova A.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 12. P. 1434.
20. Коробцов А.В., Котова С.П., Лосевский Н.Н. и др. // Квант. электрон. 2022. Т. 52. № 9. P. 856; Korobtsov A.V., Kotova S.P., Losevsky N.N. et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2023. Vol. 50. Suppl. 1. P. 856.
21. Wu Z., Zhao J., Dou J. et al. // Opt. Express. 2022. V. 30. No. 24. P. 42892.
22. Afanasiev K., Korobtsov A., Kotova S. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 414. No. 1. Art. No. 012017.
23. Zenteno-Hernandez J.A., Lozano J.V., Sarabia-Alonso J.A. et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45. No. 14. P. 3961.
24. Lin L., Hill E.H., Peng X., Zheng Y. // Acc. Chem. Res. 2018. V. 51. No. 6. P. 1465.
25. Hosokawa C., Tsuji T., Kishimoto T. et al. // J. Phys. Chem. C. 2020. V. 124. No. 15. P. 8323.
26. Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N. et al. // J. Quant. Spectrosc. 2021. V. 268. Art. No. 107641.
27. Самагин С.А. Программа управления изображением распределения фазовой задержки дифракционного оптического фазового элемента при работе с жидкокристаллическим пространственным модулятором света дисплейного типа. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022611374, 2022.
28. Zhang S., Scott E.Y., Singh J., Chen Y. et al. // PNAS. 2019. V. 116. P. 14823.

Optothermal traps based on sector diffraction optical elements

S. P. Kotova^a*, N. N. Losevsky^a, A. M. Mayorova^a, S. A. Samagin^a

^aLebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara Branch, Samara, 443011 Russia

*e-mail: kotova@fian.smr.ru

A method for implementing sectoral diffractive optical elements formed from phase distributions of simple optical elements is presented. The capture and rotation of latex microparticles with a diameter of 3–4 μm in optothermal traps using formed elements has been demonstrated.