

УДК 535.21:53.06

## СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОПТОТЕРМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ

© 2022 г. С. П. Котова<sup>1</sup>, \*, Н. Н. Лосевский<sup>1</sup>, А. М. Майорова<sup>1</sup>,  
Е. В. Разуева<sup>1</sup>, С. А. Самагин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самарский филиал, Самара, Россия

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

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Представлены результаты исследований по формированию различных конфигураций микроскопических объектов с помощью структурированных оптотермических ловушек. Продемонстрированы динамическая перестройка конфигураций и фиксация микрочастиц на подложке за счет использования альбумина и кратковременного увеличения мощности лазерного излучения.

DOI: 10.31857/S0367676522120201

### ВВЕДЕНИЕ

В оптотермических ловушках световое поле используется не только для формирования оптической силы, но и для создания в среде градиента температуры, формирующего в свою очередь конвекционные потоки [1–6]. Микро- и нано-объекты в таких комбинированных ловушках переносятся (захватываются) возникающими потоками жидкости, поэтому можно использовать заведомо меньшие мощности (от десятых долей до нескольких десятков милливатт) по сравнению с традиционными оптическими ловушками. Конвекционные оптические ловушки характеризуются возможностью довольно быстрого перемещения объектов (в том числе поглощающих) с относительно больших расстояний, и как следствие, простотой организации областей свободных от микрочастиц и областей с их локальной повышенной концентрацией. В настоящей статье мы предлагаем формировать заданные конфигурации микрочастиц за счет структурированных световых пучков. Такой подход широко используется в оптических ловушках (без конвекционной составляющей) [7–10], где применяются вихревые пучки весьма различных форм. В 2015 г. авторы [5] впервые реализовали структурированную оптотермическую ловушку в виде светового кольца, и отметили, что использование структурированных пучков (колец, параллельных линий и т.д.) открывает очень широкие возможности для манипуляции микрообъектами. Однако дальнейшего широкого развития структурированные оптотермические ловушки до сих пор не получили. Реализованные нами оптотермические ловушки — точечные, в виде вихревых

колец и спиралей Архимеда, описаны в [6, 11]. Цель данной статьи продемонстрировать возможности оптотермических ловушек для формирования разнообразных конфигураций микроскопических объектов, их динамической перестройки, а также фиксации на подложке.

### ФОРМИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ С ЗАДАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ

В экспериментах по манипулированию микрообъектами использовались световые поля с разнообразными распределениями интенсивности в рабочей зоне микроскопа: в виде колец, границ треугольника, квадрата, двойных контуров, решеток нулей. Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) для преобразования лазерного излучения в заданные распределения рассчитывались с использованием оптики спиральных пучков [12]. В расчетах применялся модифицированный итерационный алгоритм Герчберга-Сэкстона, при этом в качестве исходного фазового распределения использовалась фаза спирального пучка, а в качестве распределения интенсивности в выходной плоскости — распределение интенсивности его преобразования Фурье [13, 14].

При построении ДОЭ для формирования полей в виде пространственной решетки нулей интенсивности базисный спиральный пучок задавался в виде суммы спиральных пучков, интенсивность которых локализована вблизи параллельных отрезков. На небольших расстояниях между отрезками спиральные пучки начинают интерферировать. В результате такой интерференции формируется

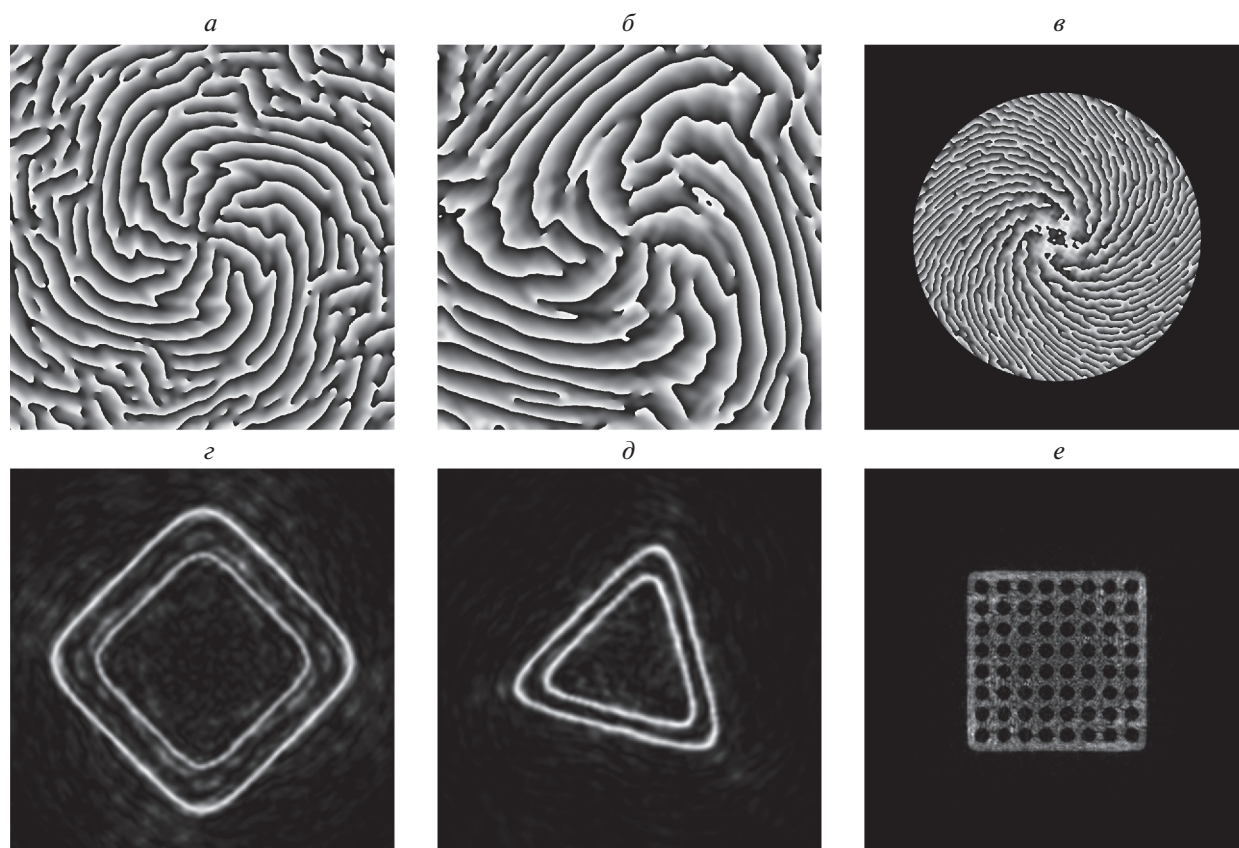


Рис. 1. Примеры рассчитанных фазовых элементов и формируемых ими распределений интенсивности.

решетка из одиночных оптических вихрей, которая является решеткой нулей интенсивности.

Для создания фазовых элементов в виде двойных контуров исходный спиральный пучок выбирался в виде суммы двух спиральных пучков с различными номерами квантования либо использовался производный спиральный пучок [15], поскольку его интенсивность имеет вид двух коаксиальных кривых. В обоих случаях эффективность рассчитанных дифракционных элементов составляет около 80%. При использовании производного спирального пучка расстояние между контурами фиксировано. В случае, когда используется сумма спиральных пучков, расстояние между контурами можно менять, выбирая разные номера квантования базовых кривых. Это расстояние ограничено интерференцией между интенсивностями пучков.

На рис. 1 приведены примеры рассчитанных фазовых элементов и формируемых ими распределений интенсивности в виде двойных контуров треугольника, квадрата и решетки нулей.

Экспериментальная реализация проводилась с помощью фазовых масок, формируемых многопиксельным жидкокристаллическим пространственным модулятором света (ЖК ПМС) HOLOEYE

PLUTO-2-NIR-011. Примеры сформированных полей приведены на рис. 2. Использование ЖК ПМС позволяет динамически (в реальном времени) менять конфигурацию сформированных распределений интенсивности в заданной плоскости за счет быстрой замены одной подаваемой на модулятор фазовой маски на другую. Управление качеством формируемого модулятором светового поля, размером распределения интенсивности, его положением осуществлялось с помощью специально созданного программного модуля. Программа позволяет изменять начальную фазовую маску (менять ее размер, поворачивать, растягивать либо сжимать в горизонтальном и вертикальном направлениях) и добавлять к загруженной и трансформированной фазовой маске дополнительные элементы: сферическую линзу, аксикон, оптический клин (наклон). Также возможны перемещение фазового распределения по поверхности модулятора в поперечных направлениях, задание формы и характеристик апертуры фазового распределения на поверхности модулятора без изменения геометрических и элементных параметров реальной оптической схемы. Например, внесение дополнительной линзы может улучшить качество изображения, изменение фор-

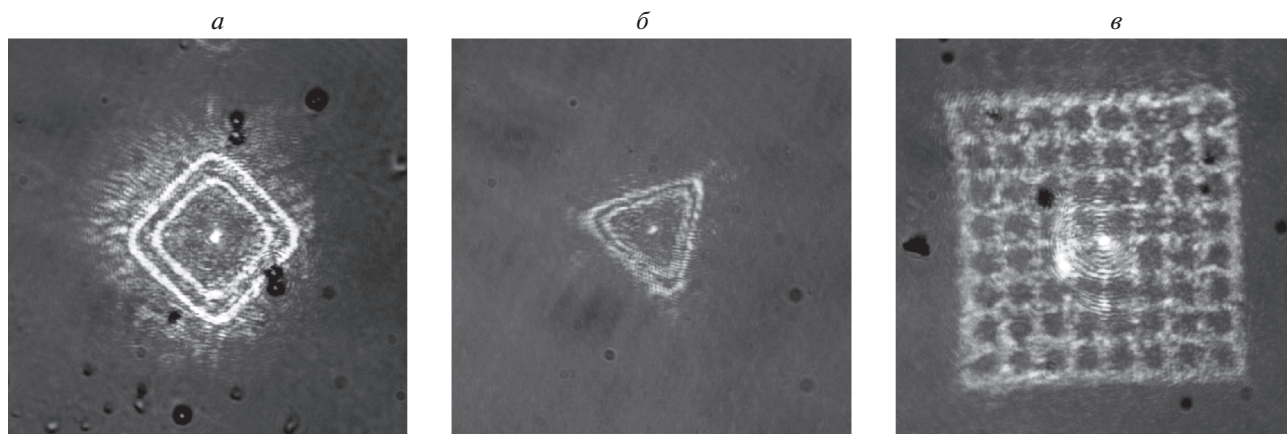


Рис. 2. Примеры экспериментальной реализации световых полей в виде двойных контуров и решетки нулей в рабочей зоне пинцета.

мы и характера внешней области апертуры помогает в случае необходимости избавиться от центрального максимума интенсивности и т.д., при этом менять экспериментальную схему не требуется. Кроме того, в программе реализована возможность сформировать фазовую маску дифракционного оптического элемента, представляющего собой сумму стандартных оптических элементов, таких как сферическая и цилиндрическая линза, призма, аксикон, спиральная фазовая пластинка, и изменять параметры этих элементов.

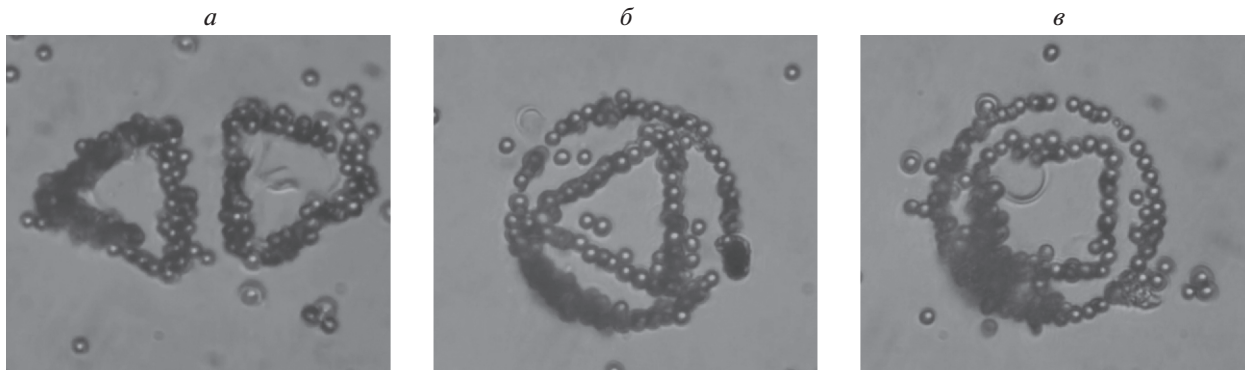
### ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МАНИПУЛИРОВАНИЮ МИКРООБЪЕКТАМИ

Схема экспериментальной установки оптотермической структурированной ловушки подробно описана нами в [6]. Источником излучения служил DPSS лазер с длиной волны излучения 0.53 мкм. Расширенный коллимированный пучок лазера освещал пространственный модулятор света HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011, работающий в режиме отражения. С помощью ПМС формируется структурированный световой пучок (световое поле с заданным распределением интенсивности). Этот пучок фокусировался микрообъективом (40×) в заданную плоскость, формируя структурированную (вихревую) оптическую ловушку. Суммарная мощность излучения в рабочей зоне варьировалась от 10 до 100 мВт. Конвекционная составляющая ловушки формируется за счет использования поглощающего на длине волны 0.53 мкм светофильтра ОС 13 в качестве дна кюветы с образцами. Манипулирование проводилось микрочастицами латекса, взвешенными в дистиллированной воде. Диаметр частиц варьировался от 1 до 4 мкм.

Поскольку в оптотермических ловушках перенос микрочастиц осуществляется конвекционными потоками, то во всех экспериментах наблюдалось довольно быстрое движение микрочастиц с относительно больших расстояний к световому пятну, независимо от вида распределения интенсивности. Аналогичный характер движения наблюдался нами и в случае точечной тепловой ловушки, описанной в [6]. При работе с оптотермической ловушкой необходимо подобрать уровень мощности лазерного излучения так, чтобы скорость перемещения конвекционных потоков жидкости была достаточной для переноса микрочастиц к ловушке и формирования конфигурации вдоль ее границы. Увеличение мощности приводит к увеличению вертикальной составляющей конвекционных потоков, что может привести к тому, что частицы будут уноситься восходящими потоками вверх, не достигая области ловушки (светового распределения). В наших экспериментах захват и выстраивание в заданные конфигурации микрочастиц оптотермическими ловушками со сложным распределением интенсивности наблюдались при суммарной мощности излучения в рабочей зоне до 100 мВт.

Была исследована возможность фиксации захваченных микрочастиц латекса в сформированных конфигурациях. Для этого в кювету добавляли сывороточный альбумин (Альбумин, раствор для инфузий 10%). Кратковременное увеличение мощности лазерного излучения до определенного предела приводило к фиксации микрочастиц на подложке за счет коагуляции альбумина, обусловленной локальным повышением температуры раствора. На рис. 3 представлены примеры фиксации микрообъектов в заданных конфигурациях. На рис. 3а показан случай, когда микрочастицы, взвешенные в дистиллированной воде с раствором альбумина и добавлением ПАВ, захва-





**Рис. 3.** Кадры из видео, иллюстрирующие возможности структурированной термооптической ловушки для формирования заданных конфигураций микрочастиц и их фиксации на подложке.

тывались ловушкой в виде треугольника. Увеличение мощности приводило к прилипанию частиц к подложке вдоль границы треугольника. Далее фазовая маска поворачивалась, кювета перемещалась относительно светового пучка, свободные частицы конвекционными потоками устремлялись к ловушке, выстраивались вдоль ее границы и вновь за счет увеличения мощности фиксировались на подложке. В результате мы видим, что частицы фиксированы вдоль двух треугольников, повернутых и смещенных друг относительно друга. Аналогичные эксперименты проводились при перестройке конфигурации одной формы в другую, например, треугольника в окружность (рис. 3б), окружности в квадрат (рис. 3в). Возможны и другие конфигурации.

Мощности лазерного излучения, необходимые для фиксации частиц, зависят от концентрации альбумина. Зависимость представлена в табл. 1. Видно, что чем выше концентрация альбумина, тем при меньшей мощности лазерного излучения происходит фиксация частиц на световой границе. Существуют как минимальное, так и максимальное пороговые значения мощности. Так, при концентрации альбумина 10% частицы медленно перемещаются к световой ловушке. Попытка увеличить скорость сбора микрочастиц

в ловушку за счет увеличения мощности приводит к тому, что альбумин коагулирует, до того, как частицы попадают в ловушку. При концентрации 0.5% и менее вместо коагуляции происходит образование газовых пузырей из-за нагрева жидкости. Таким образом, в наших экспериментах эффективная фиксация микрочастиц наблюдалась при концентрациях 2.5–10%. Частицы оставались фиксированными на подложке в течение продолжительного времени, не смывались проточной водой, не растворялись в водном растворе.

Представленная технология фиксации микрообъектов на подложке может найти свое применение в биофизических задачах. Манипулирование отдельными клетками — одно из самых ярких применений оптических пинцетов. Например, активно разрабатываются способы выстраивания клеток и биообъектов в разнообразные структуры с использованием как оптических, так и термооптических пинцетов [17–19]. В работе [17] описана процедура формирования паттернов клеток с последующим их культивированием за счет использования фотонно-кристаллического оптического пинцета. Клетки высаживали пинцетом на заранее заданные формы, потом добавляли внеклеточный матрикс и нагревали подложку, за счет чего и проходила фиксация. Преимуществом описанной нами технологии является возможность менять форму ловушки, а, следовательно, и формы паттерна в реальном времени. Однако возможность применения технологии к реальным биообъектам требует дальнейшего изучения.

**Таблица 1.** Зависимость мощности лазерного излучения, при котором происходит, фиксация микрочастиц на подложке в зависимости от мощности лазерного излучения

Концентрация альбумина, %	$P$ , мВт
10	63
5	97
2.5	99
1	99–132
0.5	134 (коагуляция не наблюдается)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе впервые реализованы оптотермические ловушки сложных конфигураций, включая двойные контуры, решетку нулей, перестраиваемые конфигурации различных форм. Продемонстрированы возможности и особенности

структурированных оптотермических ловушек для захвата и перемещения микрочастиц и их эффективной группировки в заданных конфигурациях. Предложен простой и эффективный способ фиксации на подложке захваченных микрообъектов вдоль границ световых ловушек за счет использования раствора альбумина и кратковременного повышения мощности лазерного излучения. Проведенные эксперименты и предложенные технологии показывают их перспективность для биофизических задач, но это требует дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00671).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zemánek P., Volpe G., Jonáš A., Brzobohatý O.* // Adv. Opt. Photon. 2019. V. 11. P. 577.
2. *Zenteno-Hernandez J.A., Lozano J.V., Sarabia-Alonso J.A. et al.* // Opt. Lett. 2020. V. 45. P. 3961.
3. *Hosokawa Ch., Tsuji T., Kishimoto T. et al.* // J. Phys. Chem. C. 2020. V. 124. No. 15. P. 8323.
4. *Lin L., Hill E.H., Peng X., Zheng Y.* // Accounts Chem. Res. 2018. V. 51. P. 1465.
5. *Flores-Flores E., Torres-Hurtado S.A., Páez R. et al.* // Biomed. Opt. Express. 2015. V. 24. P. 4079.
6. *Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N. et al.* // J. Quantitative. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2021. V. 268. Art. No. 107641.
7. *Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., Berry M. et al.* // J. Opt. 2017. V. 19. Art. No. 013001.
8. *Rodrigo J., Angulo M., Alieva T.* // Opt. Express. 2018. V. 26. No. 14. P. 18608.
9. *Li L., Chang Ch., Yuan X. et al.* // Opt. Express. 2018. V. 26. P.9798.
10. *Afanasiev K., Korobtsov A., Kotova S. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 414. Art. No. 012017.
11. *Mayorova A., Korobtsov A., Kotova S. et al.* // IEEE Int. Conf. on Inform. Technol. and Nanotechnol. (Samara, 2021). P. 1.
12. *Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г.* // УФН. 2004. Т. 174. № 12. С. 1273; *Abramochkin E.G., Volostnikov V.G.* // Phys. Usp. 2004. V. 47. No. 12. P. 1273.
13. *Abramochkin E.G., Razueva E.V., Volostnikov V.G.* // Proc. LFNМ. 2006. P. 275.
14. *Afanasiev K.N., Abramochkin E.G., Korobtsov A.V. et al.* // Proc. SPIE. 2007. V. 6644. Art. No. 664410.
15. *Абрамочкин Е.Г., Афанасьев К.Н., Волостников В.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. № 1. С. 76; *Abramochkin E.G., Afanasiev K.N., Volostnikov V.G. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2008. V. 72. No. 1. P. 68.
16. *Волостников В.Г.* // Комп. оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 397.
17. *Jing P., Liu Y., Keeler E.G. et al.* // Biomed. Opt. Express. 2018. V. 9. P. 771.
18. *Li P., Yu H., Wang X. et al.* // Opt. Express. 2021. V. 29. P. 11144.
19. *Lu F., Gong L., Kuai Y. et al.* // Photon. Res. 2022. V. 10. P. 14.

### Structured optothermal traps

**S. P. Kotova<sup>a,\*</sup>, N. N. Losevsky<sup>a</sup>, A. M. Mayorova<sup>a</sup>, E. V. Razueva<sup>a</sup>, S. A. Samagin<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Lebedev Physical Institute, Samara Branch, Samara, 443011 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: kotova@fian.smr.ru*

The results of studies on the formation of various configurations of microscopic objects using structured optothermal traps are presented. The dynamic rearrangement of configurations and their fixation on a substrate with the use of albumin and by short time power increasing have been demonstrated.