

УДК 535.21

ВОЗМОЖНОСТИ ОПТОТЕРМИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ

© 2024 г. А. М. Майорова^{1,*}, С. П. Котова¹, Н. Н. Лосевский¹, Д. В. Прокопова¹, С. А. Самагин¹

¹Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук», Самара, Россия

*E-mail: mayorovaal@smr.lebedev.ru

Поступила в редакцию 15.07.2024

После доработки 19.08.2024

Принята к публикации 30.08.2024

Представлены экспериментальные результаты формирования упорядоченных структур микрочастиц латекса диаметром 3 и 5 мкм с помощью массивов точечных оптотермических ловушек. Для реализации таких ловушек рабочая область фазовой маски делилась на субэлементы, для каждого из которых задавалось распределение фазовой задержки призмы (клина).

Ключевые слова: оптотермическая ловушка, дифракционные оптические элементы, массивы точечных ловушек

DOI: 10.31857/S0367676524120017, **EDN:** EYGRXL

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные техники транспортировки микронных и субмикронных объектов, включая отдельные клетки и микроорганизмы, их позиционирование и выстраивание в различные конфигурации актуальны для задач нано- и биотехнологий и активно развиваются последние десятилетия. Например, поиск новых способов выделения и культивирования микроорганизмов является очень важным направлением современной микробиологии, задача формирования различных конфигураций клеток актуальна для тканевой инженерии и т. д. В качестве неинвазивных инструментов применяются оптические и оптотермические [1–4] пинцеты, акустические пинцеты [5, 6], используются техники лазерно-индуцированного прямого переноса [7, 8], с применением микrorоботов [9] и микрофлюидных систем [10]. Оптические и оптотермические пинцеты широко используются как неинвазивный инструмент для манипулирования частицами в биологических приложениях, в том числе точного формирования паттернов биообъектов произвольных конфигураций [2–4]. Например, в работе [2] описана процедура формирования паттернов клеток с последующим их культивированием за счет использования фотонно-кристаллического оптического пинцета. Клетки высаживались пинцетом на заранее заданные формы, потом добавлялся внеклеточный матрикс, подложка нагревалась, за счет чего и проходила фиксация. Оптические [11–13] и оптотермические [14, 15] ловушки на основе структурированных световых полей (структурные ловушки) позволяют

формировать различные конфигурации микронных и субмикронных объектов, которые можно динамически перестраивать за счет изменения светового поля. При этом в оптотермических ловушках возможна фиксация сформированного ансамбля частиц на подложке путем увеличения мощности лазерного излучения [14]. Форма структурированных ловушек может быть весьма разнообразной. Ранее нами были реализованы ловушки в виде контуров различных геометрических фигур, двойных контуров, спирали Архимеда, решетки нулей.

В настоящей статье исследуется способ равномерного позиционирования микрообъектов с помощью оптотермической ловушки. Задачу предлагается решить за счет формирования массива точечных ловушек. В перспективе планируется использовать метод для использования в биомедицинских задачах. Однако на данном этапе эксперименты проводились с микросферами латекса диаметром 3 и 5 мкм. Практическая направленность задачи предполагает использование простого в реализации метода с достаточной дифракционной эффективностью. Например, можно формировать необходимые дифракционные оптические элементы (ДОЭ) из фазовых распределений простых оптических элементов [16, 17]. Для экспериментальной реализации массивов точечных световых ловушек использовался многопиксельный жидкокристаллический пространственный модулятор света (ЖК ПМС). Его рабочая область делилась на участки, и для каждого участка задавалось распределение фазовой задержки призмы (клина). Количество участков

задает количество световых точечных пятен в массиве, а расстоянием между пятнами можно управлять, меняя направление и величину наклона волнового фронта пучка, сформированного в каждой области.

Цель статьи заключалась в сравнительном анализе качества формируемых массивов световых точечных пятен в зависимости от выбора геометрии отдельных участков фазовых масок и реализовать позиционирование микробъектов с помощью оптотермических ловушек. Последнее также связано с практической направленностью рассматриваемой технологии: острофокусированное световое поле используется в оптотермической ловушке не только для формирования оптической силы, но и для создания в среде градиента температуры, формирующего в свою очередь конвекционные потоки, за счет которых происходит захват и перенос микро- и нанообъектов [15, 18–23]. Это позволяет использовать относительно малые мощности лазерного излучения (от десятых долей до нескольких десятков милливатт), захватывать объекты с больших расстояний, переносить объекты различной природы, размеров, формы и морфологии.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ СУБЭЛЕМЕНТОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ МАССИВОВ ТОЧЕЧНЫХ СВЕТОВЫХ ПЯТЕН

Рассмотрим различные способы разбиения фазового элемента на отдельные участки, в каждом из которых задается распределение фазовой задержки

клина. Поскольку в экспериментах, как правило, реализуется осесимметричное распределение интенсивности освещдающего пучка, то наиболее удобным и выгодным с точки зрения энергетической эффективности является формирование, так называемых, секторных ДОЭ, в которых каждый участок является сектором круга. Такие ДОЭ были предложены нами в [16]. Функцию пропускания секторного оптического элемента, состоящего из N областей, можно представить в следующем виде (1):

$$T(r, \varphi) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{\Phi - \Phi_n}{2\Delta\Phi_n}\right) \exp(i_n(r, \varphi)), \quad (1)$$

$\Phi_n, \Delta\Phi_n$ — азимутальная координата середины и полураствор n -го сектора, $\Phi_n(r, \varphi)$ фазовая функция оптического элемента n -го сектора, представляющая собой фазовую задержку стандартного оптического элемента. Для формирования равномерно расположенных точек секторы должны иметь равную площадь, а в качестве фазовой задержки необходимо задавать фазовую задержку призмы с необходимым углом наклона и пространственной ориентации (2):

$$\Phi_n(r, \varphi) = A_n r \sin(\varphi + \alpha_n), \quad (2)$$

где параметры A_n и α_n определяют угол наклона и ориентацию призмы и соответственно отвечают за координаты точки фокусировки в плоскости наблюдения.

На рис. 1а и 1б представлен пример фазового распределения ДОЭ такого типа и формируемое им соответствующее распределение интенсивности

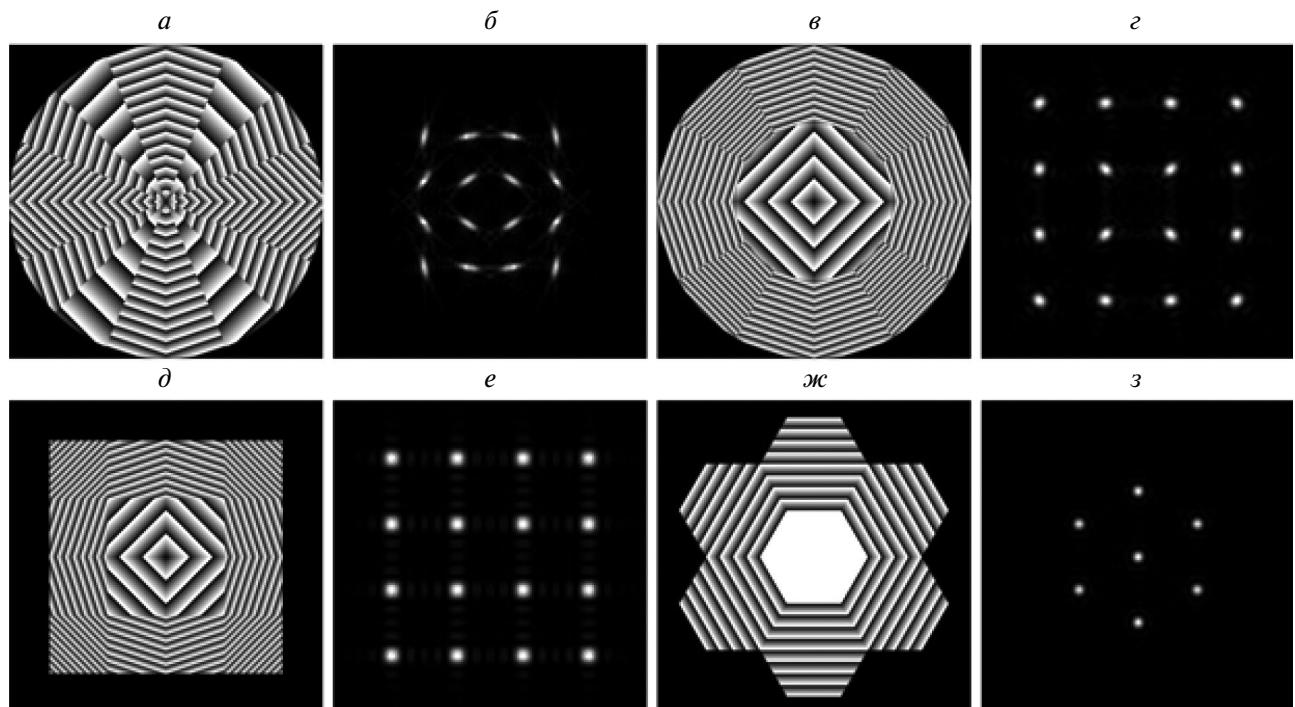


Рис. 1. Фазовые распределения (а, в, д, ж) и соответствующие им распределения интенсивности (б, г, е, з).

матричных оптических ловушек. В таком способе количество формируемых точечных ловушек ограничено, а сформированные пятна имеют вытянутую форму. Это связано с тем, что при большом количестве секторов они становятся узкими и увеличивается роль дифракции на апертуре отдельного субэлемента.

Отдельные участки ДОЭ, представленного на рис. 1 ε , являются секторами концентрических колец. Это частный случай так называемого мозаичного ДОЭ, представляющего собой более общий случай комбинации секторного и кольцевого (мультизонного) дифракционных элементов, функция пропускания которого в общем виде описывается формулой (3):

$$T(r, \varphi) = \sum_{n=1}^N \left(\text{circ}\left(\frac{r}{R_n + \Delta R_n}\right) - \text{circ}\left(\frac{r}{R_n - \Delta R_n}\right) \right) \text{rect}\left(\frac{\varphi - \Phi_n}{2\Delta\Phi_n}\right) \exp(i_n(r, \varphi)), \quad (3)$$

где R_n , ΔR_n — радиус середины и полуширина n -ой кольцевой зоны, а $\Phi_n(r, \varphi)$ фазовая функция оптического элемента n -го сектора, которая в нашем случае — формирования массива точек, задается той же формулой — (2), что и в случае секторного ДОЭ.

Формируемые световые пятна в этом случае имеют более симметричную форму (рис. 1 ε). Преимуществом мозаичных ДОЭ является также возможность регулировать яркость пятен матричной оптической ловушки путем подбора размеров кольцевых и секторных областей.

Также рассматривались случаи разбиения фазового элемента на квадратные и гексагональные участки. Соответствующие фазовые распределения и распределения интенсивности представлены на рис. 1 $d-z$.

При формировании матриц также учитывалось, что освещающий пучок, как правило, круглый. Поэтому на необходимое число квадратных участков (субэлементы) разбивается рабочая область модулятора в виде квадрата, вписанного в окружность диаметром 1080 (с учетом используемого модулятора). Для каждого субэлемента задается фазовая функция клина.

Формирование массива с наиболее равномерным распределением точечных ловушек, имеющих симметричную форму, обеспечивает разбиение рабочей области в виде правильного шестиугольника на гексагональные субэлементы. В этом случае круг диаметром 1080 пикселов разбивается путем геометрических построений на одинаковые шестиугольные «плотно упакованные» субапертуры заданного размера, вписанные в этот круг. Далее аналогично случаю квадратных участков в каждом субэлементе формируется фазовая задержка требуемой призмы.

Положением каждого пятна можно управлять, изменяя угол призмы и ее пространственную ориентацию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ

Сравнивались возможности формирования массивов световых точечных ловушек дифракционными оптическими элементами различных типов. Для их экспериментальной реализации использовался многопиксельный жидкокристаллический пространственный модулятор света (ЖК ПМС) Holoeye HEO-1080P (режим работы: отражение, разрешение 1920×1080 пк, размер пикселя 8 мкм, 256 градаций

серого, глубина модуляции 2π). Формировались квадратные матрицы точечных элементов 3×3 , 4×4 , 5×5 , 6×6 и 8×8 , а также наборы из 7, 19 и 37 точек, равномерно расположенных внутри правильного шестиугольника. Сформированный на ПМС ДОЭ освещался коллимированным пучком от DPSS лазера с $\lambda = 532$ нм и максимальной мощностью 50 мВт. Для исследования структуры поля к фазовому распределению ДОЭ добавлялась линза с фокусным расстоянием $F = 500$ мм и регистрировалось распределение интенсивности вблизи фокальной плоскости. Исследовалась стабильность формируемой структуры при дефокусировке. Примеры соответствующих распределений в плоскости наблюдения вблизи фокальной плоскости линзы представлены на рис. 2.

Результаты экспериментов показали, что деформация отдельных пятен и общей структуры (расстояние между максимумами в строках и столбцах перестает быть эквидистантным) наблюдается для секторных ДОЭ (рис. 2 a и 2 b). При этом для масок с субэлементами в виде секторов круга (рис. 2 a) она проявляется сильнее по сравнению с масками с субэлементами в виде секторов концентрических колец (рис. 2 b). Можно наблюдать, что для ДОЭ с субэлементами в виде квадратов (рис. 2 c , 2 d и 2 e) отдельные максимумы имеют форму квадратов, а при увеличении числа элементов наблюдается некоторое перераспределение энергии внутри максимумов.

Таким образом, для формирования массивов равномерно распределенных точечных ловушек с помощью ДОЭ рассматриваемого типа наиболее оптимальной как с точки зрения геометрии отдельных максимумов, так и поведения поля при дефокусировке являются гексагональные ДОЭ (рис. 2 $e-u$) (ДОЭ с формой субэлемента в виде правильного шестиугольника).

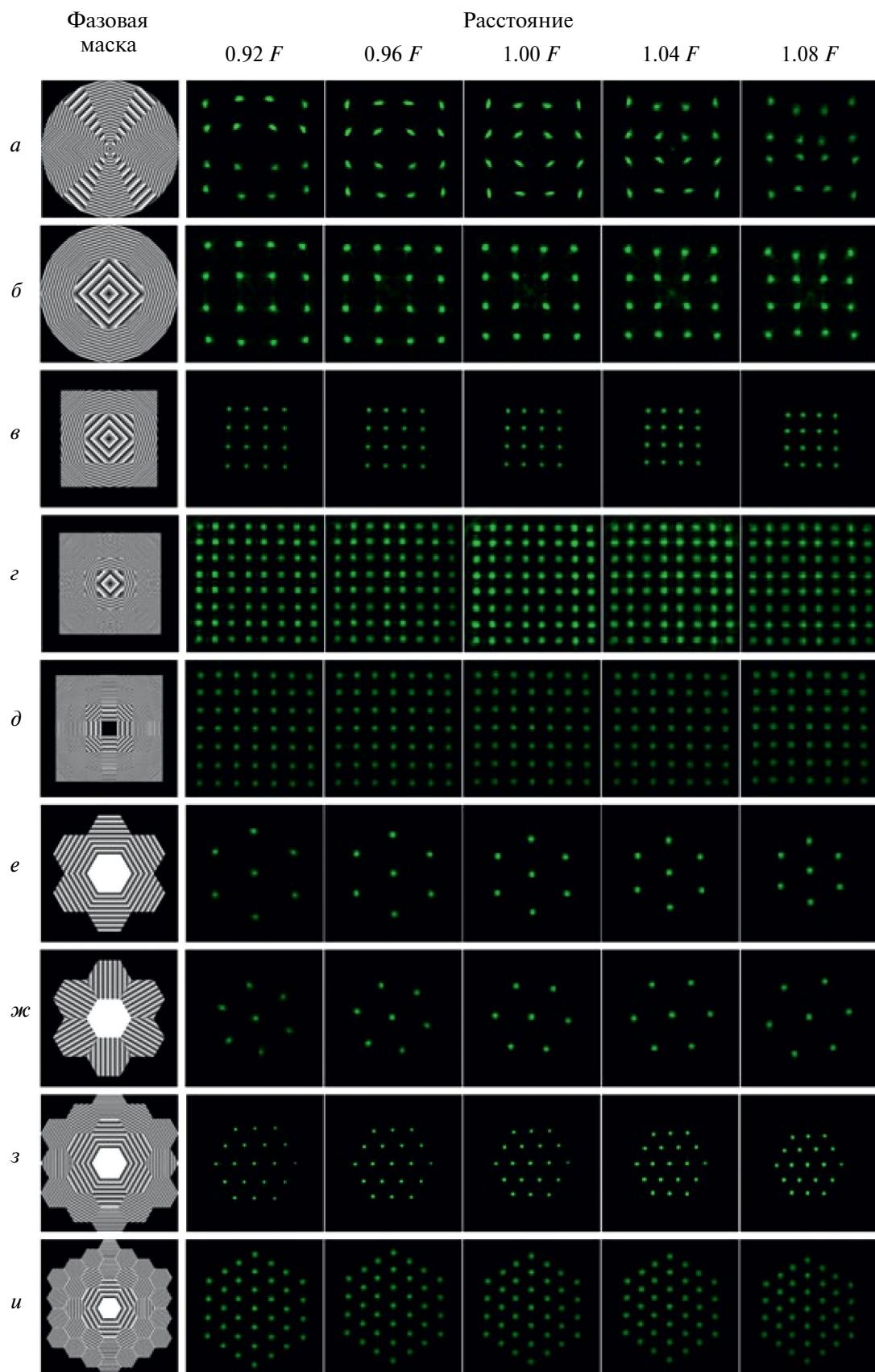


Рис. 2. Фазовые маски и соответствующие им распределения интенсивности в плоскости наблюдения вблизи фокальной плоскости линзы. Расстояния указаны в долях фокусного расстояния линзы.

Рассматриваемый метод позволяет легко формировать массивы вихревых ловушек. Например, это можно сделать, добавляя к распределению фазовой задержки сформированного секторного элемента фазовую маску спиральной пластинки с требуемой величиной топологического заряда. Однако более простым в реализации и позволяющим избежать искажений сформированного поля представляется способ, в котором в исходном распределении в каждой отдельной субапертуре распределение фазы поворачивается на 90 градусов (для квадратных) и на 60 градусов (для гексагональных) относительно ее собственного центра. Наличие вихревой составляющей обеспечивает поворот массива световых точек при распространении светового поля: сравни распределения интенсивности, формируемые в плоскостях наблюдения гексагональной маской без вихревой (рис. 2e) и с вихревой (рис. 2ж) составляющей.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МАНИПУЛИРОВАНИЮ МИКРООБЪЕКТАМИ

Дифракционные оптические элементы с субэлементами в форме квадрата и шестиугольника использовались в схеме оптотермической ловушки. Было важно проверить возможность равномерного распределения захваченных микрообъектов. Использовалась стандартная схема структурированной оптотермической ловушки, неоднократно описанной нами [14, 15]. 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 световой пучок с заданным распределением фазы. Этот пучок фокусировался микрообъективом ($40\times$) в заданную плоскость, формируя массив точечных световых ловушек. Суммарная мощность излучения в рабочей зоне варьировалась от 50 мвт до 120 мвт. Конвекционная составляющая ловушки формируется за счет использования поглощающего на длине волны 0.53 мкм светофильтра в качестве дна кюветы с образцами. Использовались оранжевый и желтый светофильтры. В качестве микрообъектов манипулирования использовались микрочастицы латекса диаметрами 3 и 5 мкм, взвешенные в дистиллированной воде.

Поскольку в оптотермических ловушках перенос микрочастиц осуществляется конвекционными потоками, то во всех экспериментах наблюдалось довольно быстрое движение микрочастиц с относительно больших расстояний к массиву ловушек. Управлять скоростью движения конвекционных потоков (скоростью перемещения частиц) можно, меняя мощность лазерного излучения, либо поглощение подложки (для этого использовались желтый и оранжевый светофильтры). При этом, увеличение мощности приводит к увеличению вертикальной составляющей конвекционных потоков, что может с одной стороны привести к тому, что частицы будут уноситься восходящими потоками вверх, не достигая области ловушки (светового распределения). С другой стороны, увеличение мощности и значительное повышение температуры нежелательно при работе с биологическими объектами.

На рис. 3 представлены кадры из видео, иллюстрирующие процесс переноса микрообъектов к массиву световых ловушек и их выстраивание в максимумы интенсивности. Верхний ряд — ловушка 4×4 , диаметр частиц 3 мкм. Нижний ряд — гексагональный массив из 19 ловушек, диаметр частиц 5 мкм.

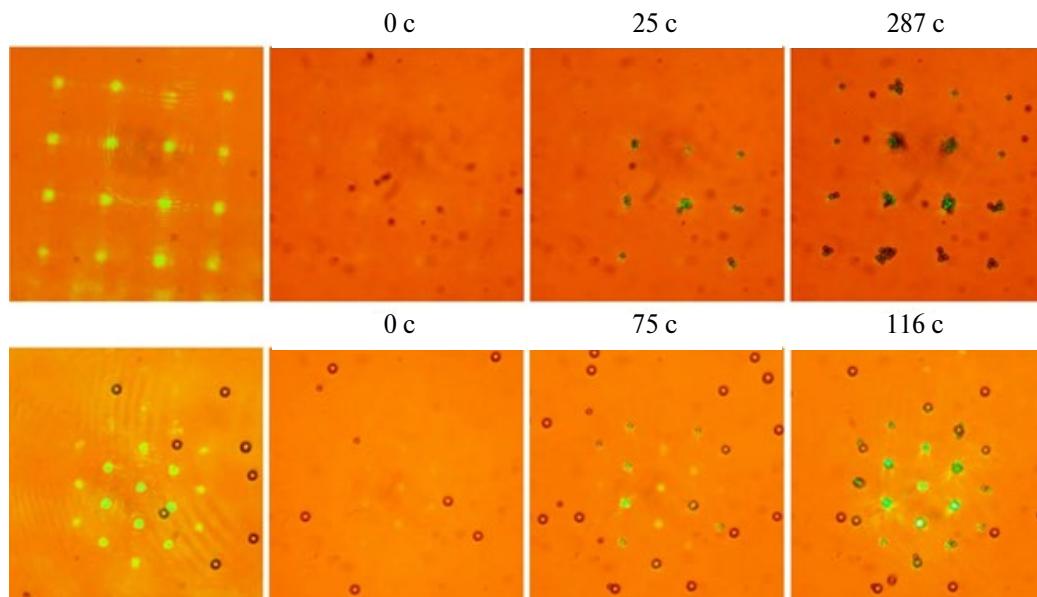


Рис. 3. Кадры из видео, иллюстрирующие процесс переноса микрообъектов к массиву световых ловушек и их выстраивание в максимумы интенсивности. Верхний ряд — ловушка 4×4 , диаметр частиц 3 мкм. Нижний ряд — гексагональный массив из 19 ловушек, диаметр частиц 5 мкм.

световых ловушек и их выстраивание в максимумы интенсивности. Были реализованы массивы ловушек 4×4 , 8×8 , а также наборов из 7 и 19 точек, равномерно расположенных внутри правильного шестиугольника. Во всех случаях формировались упорядоченные структуры захваченных микрочастиц. Однако в ряде случаев наблюдался захват дополнительных микрообъектов внутри массива между точечными ловушками либо захват нескольких объектов одной ловушкой. Поэтому на данном этапе нельзя говорить о реализации равномерного распределения микрочастиц с использованием предлагаемых ДОЭ и оптотермической ловушки.

Проблему предлагается решить за счет использования составной оптотермической ловушки на двух длинах волн, в которой разделены конвекционная и оптическая составляющие за счет использования двух лазеров с разными длинами волн. Например, конвекционная составляющая формируется с помощью волоконного лазера и теплового светофильтра, а структурированная оптическая ловушка (массив световых пятен), за счет лазера на длине волны 0.53 мкм и пространственного модулятора света HOLOEYE PLUTO-2-NIR-011 (дно кюветы при этом прозрачно для излучения 0.53 мкм). Преимуществом такой ловушки является возможность управлять концентрацией частиц, перемещаемых в заданную область за счет уменьшения мощности лазера, формирующего тепловую ловушку, либо его полного выключения, после чего можно обеспечить чисто оптическую манипуляцию.

В проводимых экспериментах площади участков с набором ловушек составляли от 30×30 мкм² до 100×100 мкм². Для позиционирования микрочастиц на больших площадях представляется возможным использовать метод фиксации микрочастиц на подложке за счет использования альбумина и кратковременного увеличения мощности лазерного излучения [14] с последовательным перемещением кюветы в другое место для нового захвата и фиксации микрочастиц. Также целесообразно проведение экспериментов с объектами других типов и размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы возможности и особенности формирования массивов световых ловушек с использованием ДОЭ на основе фазовых распределений призмы (клина). Показано, что качество формируемых световых полей зависит от формы участков, на которые делится рабочая область модулятора света. Оптимальным является разбиение на правильные шестиугольники. Такие ДОЭ обеспечивают формирование равномерно распределенных по площади симметричных точечных пятен, а структура поля сохраняется при дефокусировке.

Использование ДОЭ с гексагональными и квадратными формами субэлементов в схеме оптотермического пинцета позволяет реализовать набор симметричных точечных ловушек. Экспериментально

формировались наборы равномерно распределенных световых ловушек с количеством до 64. Проведены эксперименты по захвату микрочастиц латекса диаметрами 3 и 5 мкм. Продемонстрирована возможность формирования упорядоченных структур таких микрочастиц. Качество сформированной структуры зависит как от типа используемой маски, так и от размеров частицы и их плотности. Для реализации равномерного позиционирования микрочастиц необходимо проведение дополнительных экспериментов, в том числе с микрочастицами различных типов и размеров, а также с использованием оптотермической ловушки на двух длинах волн для возможности управления конвекционными потоками и соответственно точностью позиционирования частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lin L., Hill E.H., Peng X., Zheng Y. // Acc. Chem. Res. 2018. V. 51. P. 1465.
- Jing P., Liu Y., Keeler E.G. et al. // Biomed. Opt. Express. 2018. V. 9. P. 771.
- Li P., Yu H., Wang X. et al. // Opt. Express. 2021. V. 29. P. 11144.
- Lu F., Gong L., Kuai Y. et al. // Photon. Res. 2022. V. 10. P. 14.
- Guex A.G., Di Marzio N., Eglin D. et al. // Mater. Today Bio. 2021. V. 10. Art. No. 100110.
- Yoo J., Kim J., Lee J., Kim H.H. // iScience. 2023. V. 26. No. 11. Art. No. 108178.
- Минаев Н.В., Юсупов В.И., Чурбанова Е.С. и др. // Прибор. и техн. экспер. 2019. № 1. С. 153.
- Юсупов В.И., Жигариков В.С., Чурбанова Е.С. и др. // Квант. электрон. 2017. Т. 47. № 12. С. 1158.
- Zhang D., Ren Y., Barbot A. et al. // Matter. 2022. V. 5. No. 10. P. 3135.
- Song Y., Yin J., Huang W., et al. // Trends Analyt. Chem. 2023. Art. No. 117444.
- Rodrigo J.A., Martínez-Matos Ó., Alieva T. // Photon. Res. 2022. V. 10. P. 2560.
- Afanasiev K., Korobtsov A., Kotova S. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 414. Art. No. 012017.
- Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., Berry M. et al. // J. Optics. 2017. V. 19. Art. No. 013001.
- Котова С.П., Лозевский 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.
- Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N. et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. 2021. V. 268. Art. No. 107641.
- Котова С.П., Лозевский Н.Н., Майорова А.М. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 12. С. 1682; Kotova S.P., Losevsky N.N., Mayorova A.M. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 12. P. 1767.

17. Прокопова Д.В., Котова С.П., Самагин С.А. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2021. Т. 85. № 8. С. 1205; Prokopova D.V., Kotova S.P., Samagin S.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 8. P. 928.
18. Zemánek P., Volpe G., Jonáš A., Brzobohatý O. // Adv. Opt. Photon. 2019. V. 11. No. 3. P. 577.
19. Zenteno-Hernandez J.A., Lozano J.V., Sarabia-Alonso J.A. et al. // Opt. Lett. 2020. V. 45. P. 3961.
20. Hosokawa Ch., Tsuji T., Kishimoto T. et al. // J. Phys. Chem. C. 2020. V. 124. P. 8323.
21. Lin L., Hill E.H., Peng X., Zheng Y. // Acc. Chem. Res. 2018. V. 51. P. 1465.
22. Kollipara P., Chen Z., Zheng Y. // ACS Nano. 2023. V. 17. P. 7051.
23. Chen Z., Li J., Zheng Y. // Chem. Rev. 2021. V. 122. P. 3122.

Capabilities of optothermal traps for space ordering of microscopic objects

A. M. Mayorova¹, *, S. P. Kotova¹, N. N. Losevsky¹, D. V. Prokopova¹, S. A. Samagin¹

¹Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara Branch, Samara, 443011, Russia
*e-mail: mayorovaal@smr.lebedev.ru

Experimental results on the formation of ordered structures of latex microparticles with diameters of 3 and 5 micrometers using arrays of point optothermal traps are presented. To implement these traps, the working area of the phase mask was divided into sub-elements, for each of which a specific distribution of phase delay of the prism (wedge) was specified.

Keywords: optothermal trap, diffractive optical elements, point trap arrays