

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-11-71-78

УДК 535.42

Оптический пинцет с акустооптическим управлением

Антон Игоревич Морозов^{1✉}, Александр Сергеевич Мачихин²,
Алексей Борисович Козлов³, Витольд Эдуардович Пожар⁴

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,
Москва, Россия

¹ai.morozv@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>

²machikhin@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

³kozlov@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>

⁴vitold@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

Аннотация

Предмет исследования. Брэгговская дифракция лазерного пучка на многочастотной акустической волне в кристалле парателлурита с образованием нескольких пучков, отклоняемых в задаваемых направлениях. **Цель работы.** Создание средства одновременного контролируемого перемещения нескольких прозрачных микрочастиц по произвольным траекториям с использованием лазерного пучка, управляемого акустооптически. В частности, разрабатываются такие режимы работы оптического пинцета с акустооптическим управлением, которые позволяют автоматически манипулировать одновременно несколькими микрообъектами, варьировать число ловушек, их силу и траектории. **Метод.** Перемещение частиц осуществляется путем управления положением оптической ловушки, образованной фокусированным лазерным пучком, отклоняемым в двух направлениях разработанным многоканальным акустооптическим дефлектором. Управление процессом пространственного упорядочивания частиц осуществляется автоматически после задания для каждой из них индивидуальной траектории на экране. **Основные результаты.** Собрана экспериментальная установка (стенд) на базе биологического инвертированного микроскопа. Она позволяет отображать на экране в реальном времени положение и частиц, и ловушек. На примере микрочастиц пищевых дрожжей продемонстрирована возможность одновременного управления ансамблем микрообъектов с помощью многоканального двухкоординатного акустооптического немеханического дефлектора. **Практическая значимость.** Разработанные аппаратно-программные средства могут найти применение в биомедицине и материаловедении для автоматизированного, прецизионного и высокопроизводительного манипулирования микрообъектами.

Ключевые слова: оптический пинцет, микроманипулирование, дифракция Брэгга, акустооптический дефлектор

Благодарность: работа выполнена в рамках Государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010). Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

Ссылка для цитирования: Морозов А.И., Мачихин А.С., Козлов А.Б., Пожар В.Э. Оптический пинцет с акустооптическим управлением // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 71–78. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-71-78>

Коды OCIS: 230.1040, 350.4855

Optical tweezers with acousto-optic control

ANTON I. MOROZOV¹✉, ALEXANDER S. MACHIKHIN², ALEKSEY B. KOZLOV³, VITOLD E. POZHAR⁴

Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

¹ai.morozv@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>

²machikhin@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

³kozlov@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>

⁴vitold@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>

Abstract

Subject of study. Bragg diffraction of a laser beam by a multi-frequency acoustic wave in crystals to form several beams deflected in specified directions. **Aim of study.** Development of a method and means for moving a few microparticles simultaneously by laser focused beams (optical particle traps) along arbitrary trajectories. And then development and testing of operating modes for optical tweezers with acousto-optic control, performing simultaneous manipulation of those microobjects and varying the number of traps. **Method.** Particle trajectories are controlled by setting all the individual trajectories on a screen, which displays the workspace area and the particles to be rearranged in space. The experimental setup is assembled on the basis of a biological inverted microscope. It provides a real-time display of the particles and traps positions. In particular, such modes of operation of optical tweezers with acousto-optic control are being developed that allow one to automatically manipulate several microobjects simultaneously, to vary the number of traps, their strength, and trajectories. **Main results.** Using microscopic particles of nutritional yeast, the effectiveness of the developed hardware and software is experimentally shown. Simultaneous non-mechanical control of multiple specimen by a two-coordinate acousto-optical deflector is demonstrated. **Practical significance.** The developed hardware and software tools can be used in biomedicine and materials science for automated, precise and high-performance manipulation of multiple microscopic objects.

Keywords: optical tweezers, micromanipulation, Bragg diffraction, acousto-optical deflector

Acknowledgment: the work was carried out within the framework of the State Assignment of the STC UP RAS (project FFNS-2022-0010). The results of the work were obtained using the equipment of the Center for Collective Use of the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Morozov A.I., Machikhin A.S., Kozlov A.B., Pozhar V.E. Optical tweezers with acousto-optic control [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 11. P. 71–78. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-71-78>

OCIS codes: 230.1040, 350.4855

ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов оптической манипуляции микро- и наночастицами является одним из важных направлений развития современной фотоники. Это связано с многочисленными практическими применениями технологии лазерного пинцета в биологии, медицине, нанотехнологиях и других областях [1–4].

Оптический пинцет использует лазерные пучки для захвата и удержания прозрачных микроскопических объектов за счет частичной передачи импульса света при прохождении через объект, что создает градиентную силу, возвращающую объект в центр ловушки и заставляющую его следовать за положением

пучка. Одним из основных направлений развития этой технологии является расширение функциональных возможностей лазерных пинцетов в части формирования массивов ловушек и их быстрого перемещения в пространстве. Поэтому важной частью оптического пинцета является система управления положением лазерного пучка, которая может включать механические элементы (зеркальные устройства) или быть оптико-электронной (пространственный модулятор света, акустооптический (АО) или электрооптический дефлектор).

Основными преимуществами АО дефлекторов, получивших значительное распростра-

нение в различных областях науки и техники [5–7], являются отсутствие подвижных элементов, быстрая скачкообразная угловая адресация, значительные углы отклонения, составляющие несколько градусов. Благодаря чувствительности АО взаимодействия практически ко всем параметрам электромагнитного излучения этим способом можно в реальном времени управлять не только положением, но также «силой» и формой оптической ловушки [8, 9]. Акустооптические дефлекторы с помощью цифровых синтезаторов позволяют изменять координаты ловушки в оптическом пинцете с частотой до 100 кГц [10].

Целью данной работы является создание средства одновременного контролируемого перемещения нескольких прозрачных микрочастиц по произвольным траекториям с использованием лазерного пучка, управляемого акустооптически. В частности, разрабатываются такие режимы работы оптического пинцета с АО управлением, которые позволяют автоматически манипулировать одновременно несколькими микрообъектами, варьировать число ловушек, их силу и траектории.

Для достижения поставленной цели была разработана и собрана оригинальная оптико-электронная установка (экспериментальный

стенд) для оптического микроманипулирования, в которой двухкоординатный АО дефлектор используется для создания нескольких ловушек и изменения их положения путем быстрого периодического переключения частоты ультразвука. С помощью разработанных алгоритмов и программного обеспечения, задавая количество и значения рабочих частот ультразвука, а также мощность этих частотных компонент, можно управлять в реальном времени количеством ловушек, их положением и силой удержания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

На рис. 1 приведены схема и внешний вид экспериментального стенда. Излучение непрерывного лазера (длина волны излучения лазера $\lambda = 671$ нм, мощность излучения $P = 500$ мВт) с помощью двух плоских зеркал направляется в двухкоординатный АО дефлектор, который отклоняет его на заданные углы в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Телескопическая система, состоящая из двух линз с задними фокусными расстояниями $f'_5 = 200$ мм и $f'_6 = 125$ мм, сужает пучок, который затем фокусируется микрообъективом (увеличение $100\times$, числовая апертура 1,25)

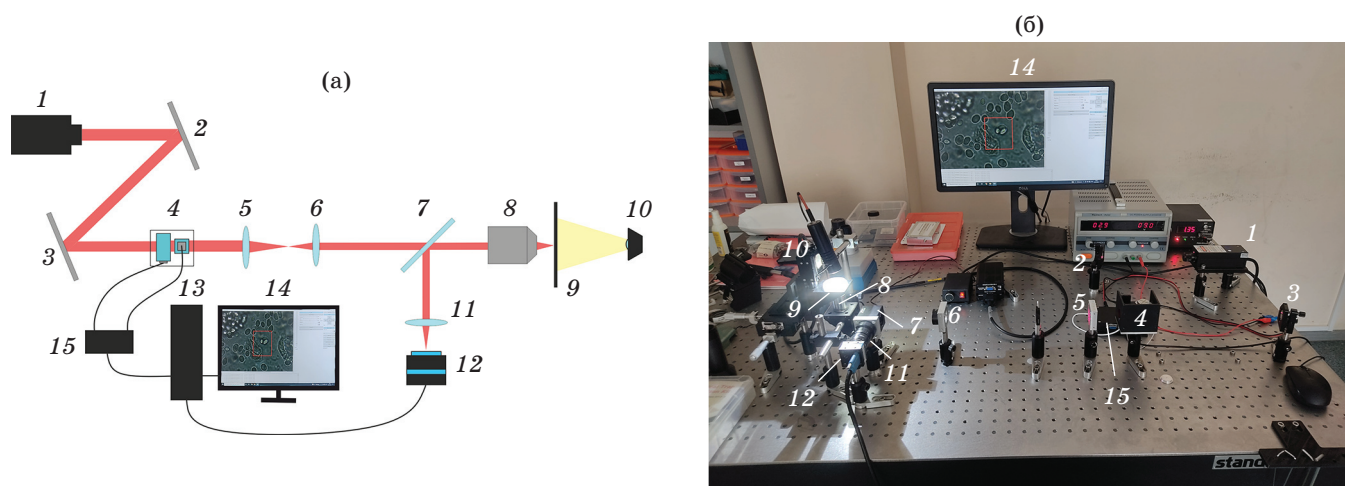


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки. 1 — лазер, 2 и 3 — зеркала, 4 — двухкоординатный АО дефлектор, 5 и 6 — линзы, 7 — дихроичное зеркало, 8 — микрообъектив, 9 — предметный столик с объектом, 10 — белый светодиодный источник излучения, 11 — объектив, 12 — видеокамера, 13 — компьютер, 14 — дисплей, 15 — ВЧ синтезатор

Fig. 1. (a) The diagram and (b) external view of the experimental setup. (1) laser, (2) and (3) are mirrors, (4) 2D acousto-optical deflector, (5) and (6) are lenses, (7) dichroic mirror, (8) microscope objective, (9) object stage with a sample, (10) white light emitting diode source, (11) camera lens, (12) video camera, (13) computer, (14) display, (15) radio frequency synthesizer

на исследуемом объекте, освещаемом белым светодиодным источником излучения. Отраженное объектом лазерное излучение и прошедший через объект свет отводятся дихротичным зеркалом и фокусируются объективом (заднее фокусное расстояние $f'_{11} = 75$ мм) на сенсоре цветной видеокамеры КМОП (7716×5360 пикселей, размер пикселя 1,12×1,12 мкм). Зарегистрированное видеокамерой изображение отображается на мониторе и позволяет как наблюдать исследуемую среду, так и отображать создаваемые в ней оптические ловушки.

Двухкоординатный АО дефлектор разработан и изготовлен в НТЦ УП РАН. Он состоит из двух повернутых на 90° относительно друг друга идентичных АО ячеек из кристалла парателлурита TeO_2 с углом среза 6° относительно оптической оси [110], предназначенных для отклонения лазерного излучения в двух взаимно ортогональных направлениях (x и y). В каждой ячейке происходит анизотропная ($e \rightarrow o$) брэгговская дифракция оптического излучения на акустической волне, возбужденной с помощью пьезоизлучателя из кристалла LiNbO_3 . С помощью двухканального синтезатора высокочастотного (ВЧ) электрического сигнала по командам компьютера в АО ячейках возбуждаются ультразвуковые волны заданных частот и амплитуд, что позволяет изменять направление и интенсивность дифрагированного лазерного излучения.

Вариация $\Delta\psi$ — угла отклонения лазерного пучка определяется вариацией ΔF частоты ультразвука [11]

$$\Delta\psi \approx \lambda \Delta F / n_o V, \quad (1)$$

где n_o — показатель преломления кристалла TeO_2 для обыкновенно поляризованного излучения, V — скорость распространения в нем сдвиговой звуковой волны ($V = 617(1 + 4,895\alpha^2)$ м/с) [12]. В разработанном АО дефлекторе изменение частоты ультразвука в диапазоне 64–96 МГц обеспечивает вариацию угла отклонения пучка в пределах 1,5°. Зависимость изменения координаты ловушки x в объектной плоскости может быть выражена через фокусные расстояния линзовых компонентов 5, 6 и 8 (рис. 1)

$$\Delta x = f'_8 \frac{f'_5}{f'_6} \Delta\psi, \quad (2)$$

что соответствует перемещению в плоскости фотоприемника

$$\Delta X = \Delta x \frac{f'_{11}}{f'_8}. \quad (3)$$

В разработанной установке максимальные значения этих величин, определяющие линейное поле зрения, составляют $\Delta x_{\max} = 105$ мкм и $\Delta X_{\max} = 3150$ мкм. Из рис. 2 можно видеть, что расчетные и измеренные в эксперименте зависимости смещений Δx и Δy от частоты ультразвука совпадают с хорошей точностью, наклон прямых различается, что свидетельствует о небольшом различии характеристик двух АО ячеек.

Пространственный размер ловушки δx определяется угловой расходимостью $\delta\psi$ лазерного пучка и значением $\Gamma = f_5/f_6$

$$\delta x = \delta\psi \Gamma f'_8, \quad (4)$$

а диапазон перемещения ловушки Δx — размахом угла отклонения $\Delta\psi_{\max}$

$$\Delta x = \Delta\psi \Gamma f'_8. \quad (5)$$

В разработанной установке пространственный размер ловушки составляет $\delta x = 6$ мкм, что обеспечивает $\Delta x/\delta x \approx 17$ разрешимых положений ловушки в пространстве.

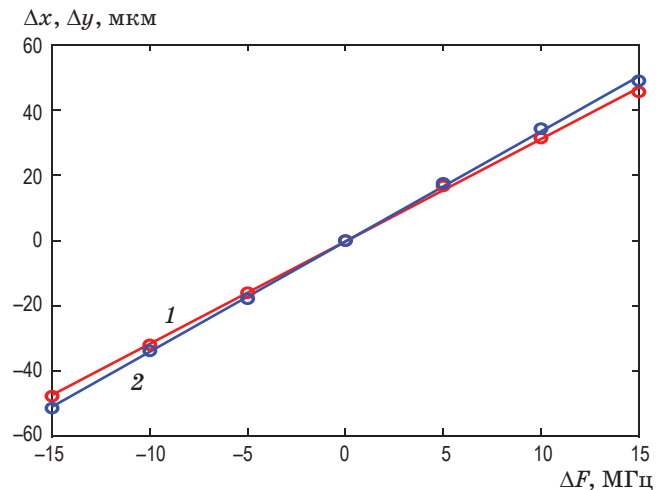


Рис. 2. Рассчитанные (линии) и измеренные (точки) зависимости смещения ловушки Δx (1) и Δy (2) в плоскости объекта от вариации ΔF управляющей частоты ультразвука

Fig. 2. Calculated (lines) and measured (points) dependences of the trap shift (1) Δx and (2) Δy in the object plane on the variation ΔF of the ultrasound control frequency

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Разработанная программа управления лазерным пинцетом позволяет задавать и контролировать параметры приемника излучения и синтезатора электрических ВЧ сигналов, используемого для генерации акустических волн. Программа непрерывно отображает рабочую область в объектной плоскости и позволяет с помощью курсора, клавиатуры и графического интерфейса управлять количеством и положением оптических ловушек, задавать траектории их перемещения, захватывать микрочастицы, анализировать изображения.

Расчет положения ловушки осуществляется за счет проведения предварительной калибровки, которая также предусмотрена в интерфейсе программы. В процессе калибровки выбираются девять (3×3) точек в рабочей области АО дефлектора и определяются соответствующие

значения частоты каждого из двух каналов ВЧ синтезатора. Таким образом определяются значения частот (F_{x0} , F_{y0}), соответствующие центральной точке изображения (X_0 , Y_0), и коэффициенты смещения k_x и k_y , позволяющие адресовать ловушку в нужную точку,

$$X = X_0 + k_x(F_x - F_{x0}), Y = Y_0 + k_y(F_y - F_{y0}). \quad (6)$$

На рис. 3 приведена блок-схема алгоритма одновременного управления положением нескольких частиц, координаты и траектории которых заданы пользователем на дисплее.

Среди различных режимов управления в настоящее время наиболее эффективным оказался квазимноголучевой режим, который и реализован в стенде. В этом режиме в каждую АО ячейку запускается последовательность коротких импульсов разных частот,

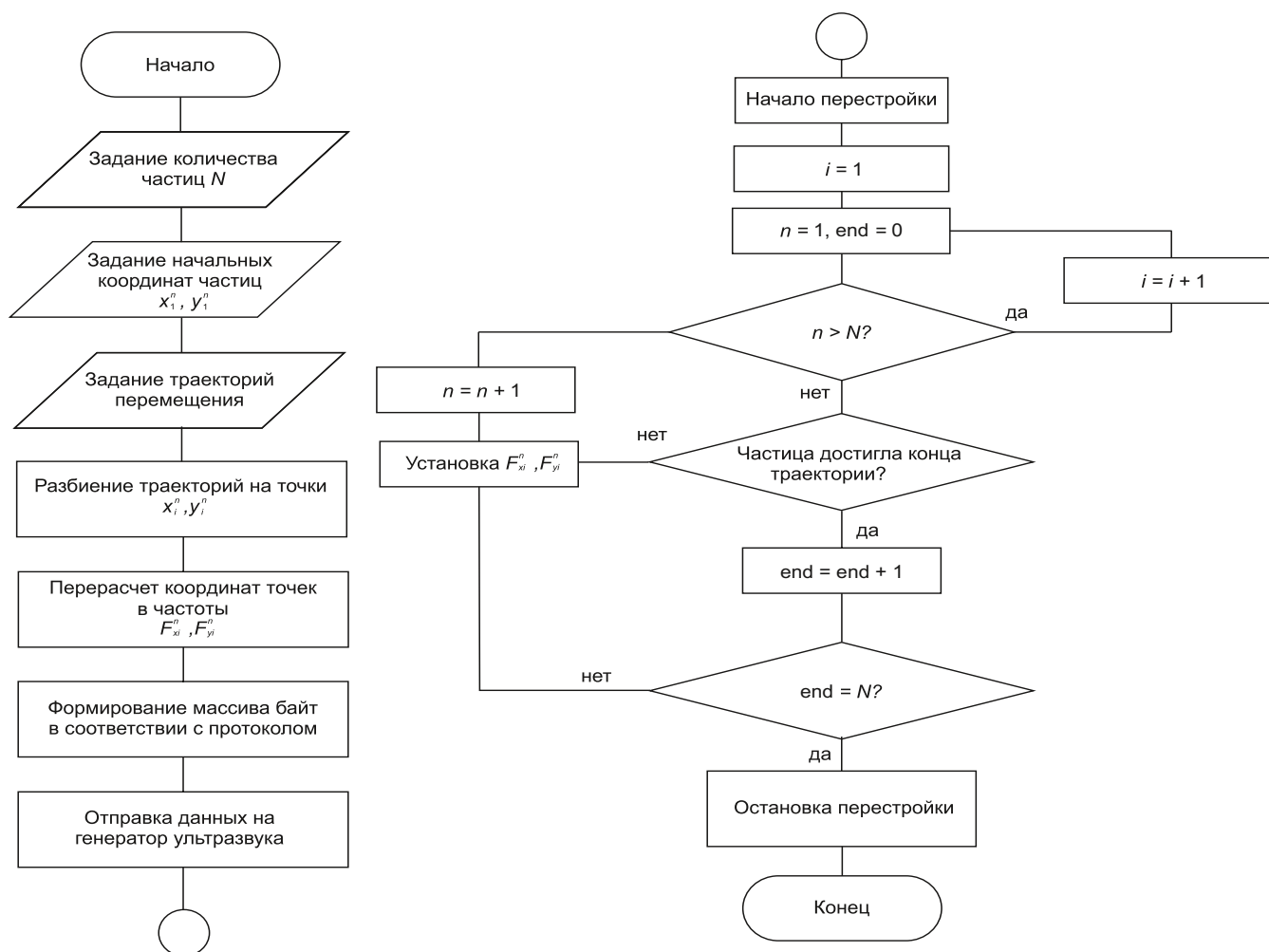


Рис. 3. Блок-схема алгоритма перемещения частиц по траекториям

Fig. 3. The block diagram of the algorithm for moving particles along trajectories

каждый из которых обеспечивает небольшое смещение ловушки по соответствующей координате. При этом луч с небольшим периодом переключается с одной частицы на другую, таким образом происходит перемещение всех частиц в едином процессе. Важно, что в программе осуществлена пакетная пере-

дача данных, за счет чего в память управляющего устройства может загружаться весь массив данных, описывающих траекторию движения, что позволяет избежать дополнительных задержек на передачу информации с компьютера и достичь частоты переключений 100 кГц.

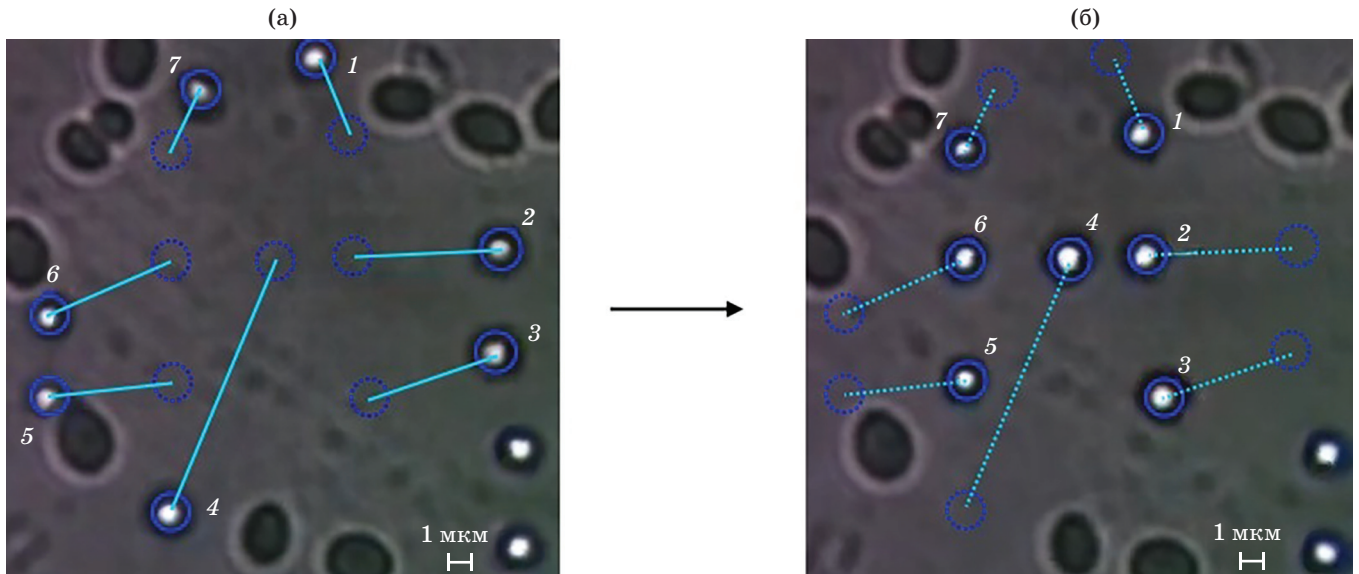


Рис. 4. Пример захвата и выстраивания семи частиц в виде буквы «Н». Изображения иллюстрируют положения частиц до (а) и после (б) применения пинцета

Fig. 4. An example of capturing and aligning seven particles in the shape of the letter «H». The images illustrate the positions of the particles (a) before and (b) after application of tweezers

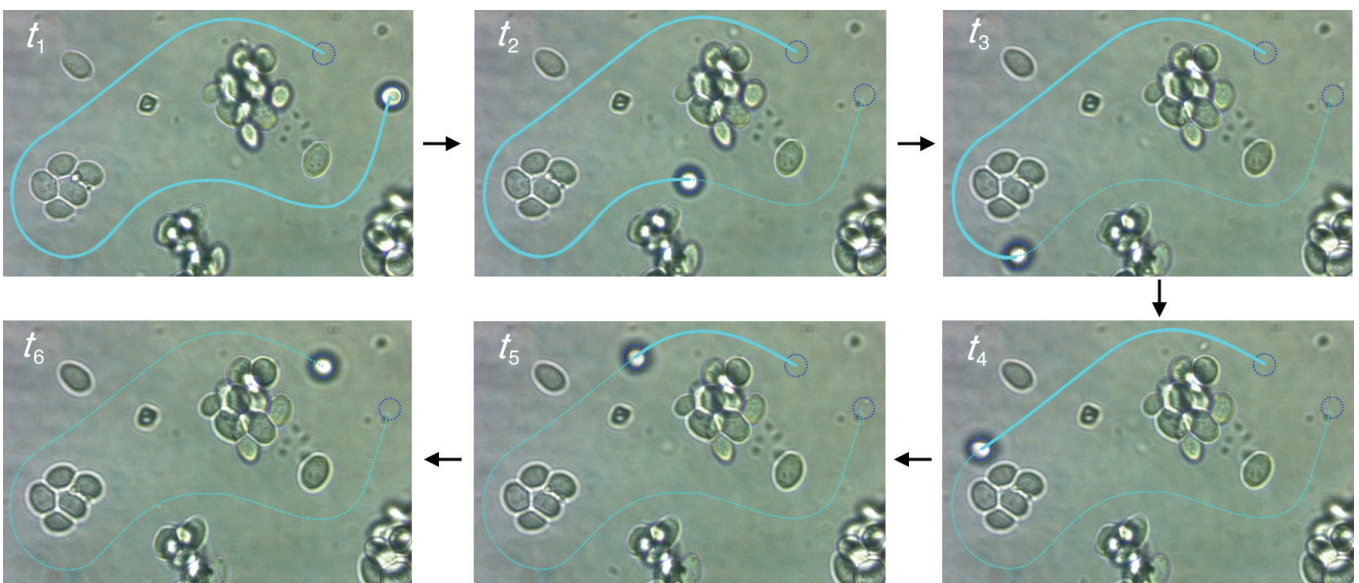


Рис. 5. Пример перемещения частицы по сложной (длинной криволинейной) траектории

Fig. 5. An example of a particle moving along a complex (long curvilinear) trajectory

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для демонстрации работоспособности разработанного аппаратно-программного комплекса была проведена серия экспериментов по созданию заданного количества оптических ловушек и управлению их положением. В качестве микрообъектов для манипулирования использовались пищевые дрожжи в виде порошка диаметром зерен около 1,5 мкм. Манипуляции этими микрочастицами в заполненной водой чашке Петри со стеклянным дном заключались в их перемещениях по различным траекториям с разной скоростью. Рисунки 4 и 5 демонстрируют результаты двух из таких экспериментов.

На рис. 4 приведен пример оптической группировки частиц. Семь частиц были выбраны вручную (курсором на дисплее) и для каждой из них были заданы такие траектории перемещения, чтобы в конечном расположении они образовали фигуру в виде буквы «Н». Алгоритм пересчитывает начальные и конечные координаты частиц в управляющие частоты, после чего последовательно осуществляются адресация ловушки, захват частицы, ее локальное смещение по траектории.

Рисунок 5 иллюстрирует пример перемещения частицы по сложной траектории, что необходимо в случае большого числа частиц в рабочем поле, например, в задачах сортировки частиц, введения микрообъектов определенного типа в рабочую область или удаления. Видно, что во время движения положение частицы строго соответствует заданной траектории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный и созданный аппаратно-программный комплекс для оптического манипулирования микрообъектами с помощью АО дефлекции лазерного излучения обеспечивает интерактивное и прецизионное управление количеством, положением и силой оптических ловушек, что дает возможность перемещать частицы по произвольным траекториям, сортировать их, перегруппировывать и др. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют быстро и эффективно выполнять эти задачи в интерактивном режиме.

Представленные результаты работы могут найти применение в биомедицине и материаловедении для автоматизированного, прецизионного и высокопроизводительного манипулирования микрообъектами. Развитие представленного подхода может быть связано с совершенствованием оптической схемы установки, дополнением алгоритмами автоматического распознавания, контроля положения и статистического анализа частиц, реализацией функций, необходимых для АО управления формой ловушек (изменения профиля интенсивности излучения в фокусе пучка) и для манипулирования не только диэлектрическими, но и проводящими частицами.

Сравнение разработанного и протестированного режима микроманипулирования с другими возможными режимами, в том числе с многолучевым режимом, будет проведено в ходе дальнейших исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bustamante C.J., Chemla Y.R., Liu S., et al. Optical tweezers in single-molecule biophysics // *Nat. Rev. Methods Primers*. 2021. V. 1. P. 29. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00021-6>
2. Heller I., Hoekstra T.P., King G.A., et al. Optical tweezers analysis of DNA-protein complexes // *Chem. Rev.* 2014. V. 114. P. 3087–3119. <https://doi.org/10.1021/cr4003006>
3. Fazal F.M., Block S.M. Optical tweezers study life under tension // *Nat. Photonics*. 2011. V. 5(6). P. 318–321. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.100>
4. Polimeno P., Magazzù A., Iati M.A., et al. Optical tweezers and their applications // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2018. V. 218. P. 131–150. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.07.013>
5. Hsu T.W., Zhu W., Thiele T., et al. Single-atom trapping in a metasurface-lens optical tweezer // *PRX Quantum*. 2022. V. 3(3). P. 030316. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.3.030316>
6. Brooks R.V., Spence S., Guttridge A., et al. Preparation of one ^{87}Rb and one ^{133}Cs atom in a single optical tweezer // *New J. Phys.* 2021. V. 23(6). P. 065002. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ac0000>
7. Kaufman A.M., Ni K.K. Quantum science with optical tweezer arrays of ultracold atoms and molecules // *Nat. Phys.* 2021. V. 17(12). P. 1324–1333. <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01357-2>
8. Obydenov D., Yushkov K., and Molchanov V. Ring-shaped optical trap based on an acousto-optic tunable spatial filter // *Opt. Lett.* 2021. V. 46(18). P. 4494–4497. <https://doi.org/10.1364/OL.435485>
9. Machikhin A., Pichugina Y., Kozlov A., et al. Acousto-optical deflector for non-mechanical manipulating using optical tweezers // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1461. P. 012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1461/1/012087>
10. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978. 112 с.

- Magdich L.N., Molchanov V.Ya. Acousto-optic devices and their applications [in Russian]. Moscow: “Sovetskoe Radio” Publ., 1978. 112 p.
11. Fuigin M. Dispersion of tellurium dioxide refractive indexes. // Acta Optica Sinica. 1986. V. 6(5). P. 446–450.
12. Voloshinov V.B. Anisotropic light diffraction on ultrasound in a tellurium dioxide single crystal // Ultrasonics. 1993. V. 31(5). P. 333–338.

АВТОРЫ

Антон Игоревич Морозов — инженер-исследователь, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57797373100; <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>; ai.morozv@gmail.com

Александр Сергеевич Мачихин — доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

Козлов Алексей Борисович — научный сотрудник, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57209523302; <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>; kozlov@ntcup.ru

Витольд Эдуардович Пожар — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

AUTHORS

Anton I. Morozov — Research Engineer, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57797373100; <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>; ai.morozv@gmail.com

Alexander S. Machikhin — Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

Aleksey B. Kozlov — Research Officer, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57209523302; <https://orcid.org/0000-0001-7056-3923>; kozlov@ntcup.ru

Vitold E. Pozhar — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Department Head, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 6603147714; <https://orcid.org/0000-0003-0553-5410>; vitold@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 05.06.2023
Одобрена после рецензирования 22.07.2023
Принята к печати 00.00.2023

The article was submitted to the editorial office 05.06.2023
Approved after review 22.07.2023
Accepted for publication 00.00.2023