

Улучшенный лазерный захват в воздухе, основанный на явлении фотофорезиса

А.П. Порфирьев^{1,2}, А.Б. Дубман²

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Мы демонстрируем использование структурированных лазерных пучков для реализации различных типов лазерного захвата и манипулирования светопоглощающими частицами в воздухе – оптического вращения захваченных микрообъектов вокруг оси, одновременное перемещение множества микрообъектов из одной кюветы в другую, а также перемещение микрообъектов, захваченных в отдельные световые ловушки, параллельно в пространстве. В качестве исследуемых частиц были использованы агломерации наночастиц углерода различной формы и размеров (в диапазоне от единиц до десятков микрометров). Использование таких структурированных лазерных пучков позволит создать улучшенные системы лазерного манипулирования взвешенными в воздухе светопоглощающими частицами для их захвата и анализа их свойств.

1. Введение

Оптический пинцет является уникальной бесконтактной техникой для манипулирования нано- и микрообъектами в различных средах [1–3]. Оптический захват и перемещение различных типов микроскопических объектов возможно благодаря действию различных сил. Например, для захвата прозрачных диэлектрических микрочастиц, находящихся в жидкости, используется градиентная сила от одного сильно сфокусированного лазерного пучка [2]. Однако захват светопоглощающих частиц в газах основан на фотофоретических (ФФ) силах [4, 5]. ФФ силы возникают, когда поверхность частицы в газовой среде неравномерно нагревается падающим световым пучком. При таком неравномерном нагреве молекулы газа отскакивают от поверхности с разными скоростями, создавая силу, действующую на частицу. Эти ФФ силы могут привести к перемещению частицы от источника света (явление положительного фотофорезиса) или к источнику света (явление отрицательного фотофорезиса).

Несмотря на то, что в 2012 году была продемонстрирована возможность трехмерного лазерного захвата светопоглощающих частиц в воздухе одним гауссовым пучком [3], использование так называемых структурированных лазерных пучков с различными профилями амплитуды, фазы и даже поляризации [6] предоставляет гораздо более широкие возможности для лазерного манипулирования на основе фотофорезиса. Например, Шведов и его коллеги использовали вихревые пучки для перемещения и точного позиционирования объектов размером 100 мкм, на расстояние свыше метра с точностью до 10 мкм [7]. Так называемые оптические «бутылки» - минимумы интенсивности, ограниченные в трёх измерениях

областями более высокой интенсивности [8], - использовались для трехмерного стабильного захвата различных частиц для их спектроскопического анализа и идентификации [9]. И, наконец, наиболее интересным примером является создание объемного дисплея с разрешением 1600 точек на дюйм, который был представлен в 2018 году [10]. Этот дисплей основан на использовании абберационной лазерной ловушки для захвата и перемещения светопоглощающих частиц. Дополнительная система RGB-освещения позволяет освещать захваченные частицы и наблюдать рассеянный свет для создания желаемых изображений в свободном пространстве. В этой статье мы демонстрируем использование структурированных лазерных пучков для реализации захвата и манипулирования множеством переносимых в воздухе светопоглощающих частиц.

2. Захват и манипулирование взвешенными в воздухе частицами с использованием массивов самовосстанавливающихся оптических «бутылок»

Хорошо известно, что интерференция двух соосных пучков Бесселя нулевого порядка с различными радиальными волновыми числами приводит к формированию массива оптических «бутылок», генерируемых на оптической оси [11]. Таким образом, для генерации массива самовосстанавливающихся оптических «бутылок» может быть использован бинарный аксикон, который можно представить в виде набора фокусирующих и расходящихся аксиконов с числовыми апертурами $a_n = na_0$, каждый из которых генерирует пучок Бесселя нулевого порядка. В этом случае несколько областей минимальной интенсивности генерируются вдоль оптической оси, и каждая из этих ловушек может использоваться для одновременного захвата различных частиц - например, на рисунке 1 демонстрируется захват и перемещение трех агломераций наночастиц углерода с различными размерами, захваченных внутри различных областей минимальной интенсивности. Таким образом, структура пучков обеспечивает одновременное параллельное трехмерное перемещение нескольких захваченных светопоглощающих микрочастиц.

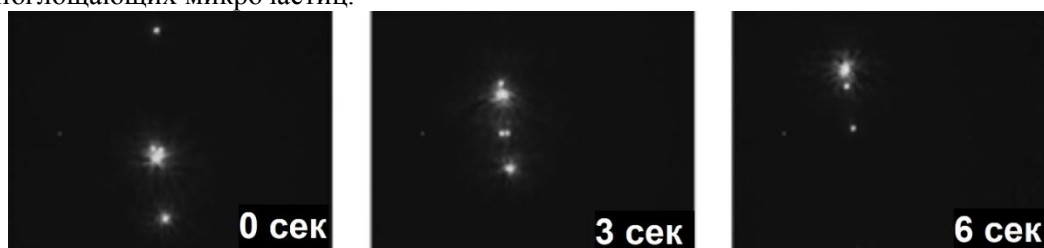


Рисунок 1. Захват и перемещение трех частиц, захваченных внутри разных оптических «бутылок».

3. Перемещение взвешенных в воздухе частиц с использованием линейных световых ловушек, сформированных с использованием цилиндрических линз

Хорошо известно, что наклон цилиндрической линзы относительно оптической оси на угол α приводит к наклону формируемого светового отрезка под тем же углом в плоскости наблюдения. Такая линейная световая ловушка может использоваться для отражения от неё светопоглощающих частиц [12]. Однако сформированные линейные световые ловушки могут быть использованы не только для отражения падающих частиц в воздухе, но и для их захвата, как в случае одиночного Гауссова пучка [3]. Тогда вращение цилиндрической линзы приводит к вращению сформированного светового отрезка и захваченных частиц. Сила сопротивления направлена в направлении, противоположном движению частиц. Увеличение угла наклона приводит к уменьшению вертикальной составляющей фотофоретической силы. При определенном угле наклона это приводит к вылету некоторых частиц из области захвата. Траектория движения этих частиц может быть различной в зависимости от их размера и формы - частицы могут падать в вертикальном направлении или двигаться по сложным траекториям. Такая линейная световая ловушка может быть использована для создания нового полностью оптического инструмента для массивного переноса в воздухе светопоглощающих частиц из одной кюветы в другую - «оптической мельницы» [13]. Когда цилиндрическая линза

вращается, она вызывает транспортировку сотен и тысяч частиц в воздухе. Каждое вращение линзы на 180 градусов приводит к транспортировке некоторых частиц, которые можно оптически наблюдать из рассеянного лазерного излучения (см. рисунок 2, на котором показан пример транспортировки частиц из одной кюветы в другую).

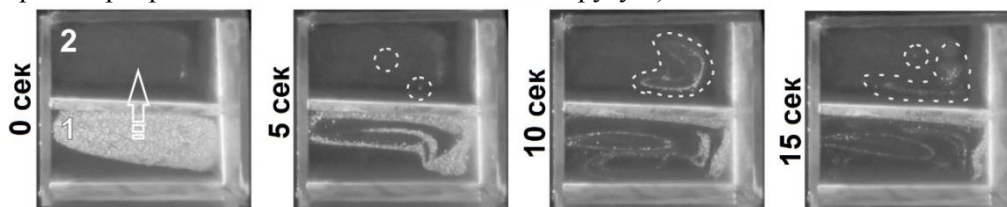


Рисунок 2. Транспортировка частиц в воздухе из одной кюветы в другую. Белые пунктирные кривые показывают области во второй кюветы с перенесенными частицами.

4. Вращение светопоглощающих частиц с использованием вытянутых световых бутылок

Цилиндрические линзы в комбинации с круговыми диафрагмами также могут быть использованы для формирования массивов вытянутых световых бутылок, по аналогии с методом формирования массивов световых бутылок, формируемых при распространении сфокусированного диафрагмированного Гауссова пучка [14]. В этом случае уникальная структура такой ловушки позволяет обеспечить стабильное удержание захваченных частиц в области минимума интенсивности сформированной ловушки во время вращения цилиндрической линзы, что даёт возможность осуществить контролируемое вращение частиц вокруг оси. При этом направление вращения легко контролируется направлением вращения цилиндрической линзы, формирующей ловушки. Пример такого вращения показан на рисунке 3, где захваченная несферическая агломерация частиц углерода с характерным размером около 3 мкм вращается по часовой стрелке по круговой траектории диаметром около 90 мкм.

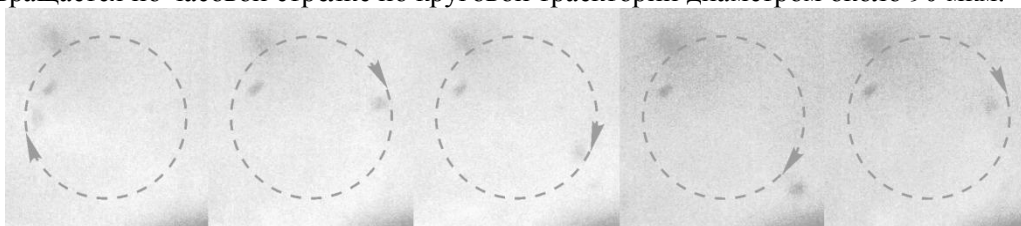


Рисунок 3. Пример вращения несферическая агломерация частиц углерода с характерным размером около 3 мкм по часовой стрелке.

5. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-58-14001, раздел 2), а также Российского научного фонда (грант № 19-72-00018, разделы 3 и 4).

6. Литература

- [1] Ashkin, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // *Phys. Rev. Lett.* – 1970. – Vol. 24(4). – P. 156-159.
- [2] Ashkin, A. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Opt. Lett.* – 1986. – Vol. 11(5). – P. 288-290.
- [3] Zhang, Z. Observation of trapping and transporting air-borne absorbing particles with a single optical beam / Z. Zhang, D. Cannan, J. Liu, P. Zhang, D.N. Christodoulides, Z. Chen // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20. – P. 16212-16217.
- [4] Ehrenhaft, F. Die Photophorese // *Ann. Phys.* – 1918. – Vol. 56. – P. 81-132.
- [5] Shvedov, V.G. Optical guiding of absorbing nanoclusters in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Opt. Express.* – 2009. – Vol. 17. – P. 5743-5757.

- [6] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi // *J. Opt.* – 2016. – Vol. 19(1). – P. 013001.
- [7] Shvedov, V.G. Giant optical manipulation / V.G. Shvedov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, A.S. Desyatnikov, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 105. – P. 118103.
- [8] Arlt, J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt, M.J. Padgett // *Opt. Lett.* – 2000. – Vol. 25. – P. 191-193.
- [9] Wang, C. Photophoretic trapping-Raman spectroscopy for single pollens and fungal spores trapped in air / C. Wang, Y.-L. Pan, S.C. Hill, B. Redding // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Trans.* – 2015. – Vol. 153. – P. 4-12.
- [10] Smalley, D.E. A photophoretic-trap volumetric display / D.E. Smalley, E. Nygaard, K. Squire, J. Van Wagoner, J. Rasmussen, S. Gneiting, K. Qaderi, J. Goodsell, W. Rogers, M. Lindsey, K. Costner, A. Monk, M. Pearson, B. Haymore, J. Peatross // *Nature.* – 2018. – Vol. 553. – P. 486-490.
- [11] Ahluwalia, B.P.S. Design and fabrication of a double-axicon for generation of tailorable self-imaged three-dimensional intensity voids / B.P.S. Ahluwalia, W.C. Cheong, X.-C. Yuan, L.-S. Zhang, S.-H. Tao, J. Bu, H. Wang // *Opt. Lett.* – 2006. – Vol. 31. – P. 987-989.
- [12] Esseling, M. Photophoretic trampoline—Interaction of single airborne absorbing droplets with light / M. Esseling, P. Rose, C. Alpmann, C. Denz // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – P. 131115.
- [13] Porfirev, A. “Optical mill”—A tool for the massive transfer of airborne light-absorbing particles “Optical mill” - A tool for the massive transfer of airborne light-absorbing particles // *Appl. Phys. Lett.* – 2019. – Vol. 115(20). – P. 201103.
- [14] Liu, F. Photophoretic trapping of multiple particles in tapered-ring optical field / F. Liu, Z. Zhang, Y. Wei, Q. Zhang, T. Cheng, X. Wu // *Opt. Express.* – 2014. – Vol. 55. – P. 23716-23723.

Advanced photophoresis-based laser trapping in air

A.P. Porifrev^{1,2}, A.B. Dubman²

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. We demonstrate the use of structured laser beams for the realization of laser trapping and manipulation of light-absorbing particles in air — optical rotation of trapped microobjects, the massive transfer of microobjects from one cuvette to another, and guiding of microobjects trapped in different optical traps in parallel. We used agglomerations of carbon nanoparticles of various shapes and sizes (in the range from units to tens of micrometers) as the particles for experimental demonstrations. The use of such structured laser beams will make it possible to create advanced laser manipulation systems for trapping and analysis of light-absorbing airborne particles.