

Влияние мощности лазерного излучения на процесс лазерного захвата светопоглощающих микрочастиц в воздухе

А.П. Порфирьев^{а,б}, С.А. Фомченков^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе 34, Самара, Россия
^б Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, 443001, ул. Молодогвардейская 151, Самара, Россия

Аннотация

В работе экспериментально исследуется влияние изменения мощности лазерного пучка с Гауссовым профилем распределения интенсивности на процесс движения светопоглощающих микрочастиц, попавших в область пучка. Манипулирование такими частицами осуществляется за счёт действия фотофоретических сил. Показана возможность контролируемого перемещения захваченных в сформированные световые ловушки агломераций наночастиц углерода как по направлению распространения лазерного пучка, так и в противоположном направлении.

Ключевые слова: лазерный захват; светопоглощающие частицы; фотофорезис; световые ловушки

1. Введение

В последнее десятилетие в области лазерного манипулирования всё большую популярность приобретают исследования так называемых «притягивающих» лучей (tractor beams) [1]. Как известно, силы светового давления направлены в сторону распространения света [2]. В случае использования для захвата «притягивающих» лучей частица, попавшая в область сформированного лазерного пучка, начинает двигаться по направлению к источнику света. Одна из первых экспериментальных реализаций такого рода пучков была выполнена с использованием двух пучков Бесселя [3]. В последствии были разработаны новые типы «притягивающих» лазерных лучей, которые позволили осуществлять контроль положения различных микрообъектов как в жидкой среде [4], так и в воздухе [5]. В большинстве случаев происходит перемещение объектов микромасштаба на расстояния в десятки микрометров, но в ряде работ рассматривается возможность осуществления такого манипулирования на расстояния десятков сантиметров [5, 6]. При этом стоит отметить, что в зависимости от типа частиц и типа среды, в которой перемещается частица, различаются механизмы, которые лежат в основе действия «притягивающих» лучей. Например, в случае с прозрачными частицами в жидкости на первый план выходят силы светового давления и градиентные силы [2, 7], в случае со светопоглощающими частицами в воздухе – тепловые силы, например, фотофоретические силы, лежащие в основе явления фотофорезиса [8]. Как известно, величина фотофоретических сил может быть на 4-5 порядков выше величины сил светового давления [9]. Это даёт возможность использовать лазерное излучение небольшой мощности (порядка долей и единиц мВт).

Область применения «притягивающих» лучей достаточно широка. Так, они позволяют осуществлять бесконтактный отбор проб частиц для анализа в условиях космоса, что является крайне актуальной задачей в связи с усиленным развитием программ по изучению ближайших к Земле планет (например, Марса), а также научно-исследовательских миссий по изучению комет и спутников планет-гигантов. Кроме того, такие типы световых ловушек интересны для медицинских исследований и разработок в области нанотехнологий, а также для разработки новых инструментов мониторинга и анализа взвешенных в воздухе аэрозольных частиц, которые не только оказывают большое влияние на радиационный баланс Земли и глобальный климат за счёт рассеивания/поглощения света [10, 11], но и являются возможными переносчиками множества заболеваний [12, 13].

В настоящей работе представлены результаты исследования возможности осуществления контролируемого перемещения светопоглощающих несферических микрообъектов, захваченных в лазерный пучок с Гауссовым профилем интенсивности, как по направлению распространения света («отталкивающий» луч), так и по направлению к источнику излучения («притягивающий» луч). В данном случае контроль положения частицы будет осуществляться за счёт динамического изменения мощности пучка без изменения каких-либо конструктивных деталей использованной оптической схемы. Исследование влияния мощности лазерного пучка на положение захваченной микрочастицы было ранее показано в работах [14, 15], но не были показаны различия в положении частиц, захваченных перед и после фокальной плоскости.

2. Экспериментальное исследование

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Выходной пучок твердотельного лазера L (длина волны $\lambda = 532$ нм, максимальная выходная мощность $P_{max} = 800$ мВт) с помощью светоделительного кубика BS разделялся на два пучка – один из них направлялся через линзу L_1 (фокусное расстояние $f_1 = 150$ мм) на измеритель мощности P , другой с помощью микрообъектива MO_1 (увеличение $\times 16$, числовая апертура $NA = 0,30$) фокусировался во внутреннюю область кюветы C , в которую распрысались агломерации наночастиц углерода (см. рис. 1б). Для наблюдения процесса

захвата и движения частиц была использована видеокамера CAM (UHCCD00800KPA, TOUPCAM, разрешение 1024×768 пикселей, размер пикселя 1,67 мкм), которая позволяла фиксировать изображения рассеянного на захваченных частицах света, сформированные микрообъективом MO_2 (увеличение $\times 8$, числовая апертура $NA = 0,20$).

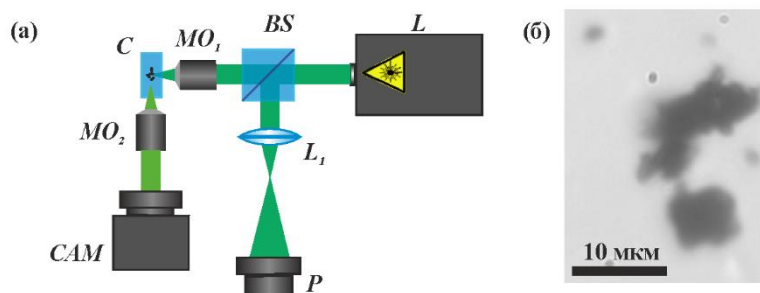


Рис. 1. (а) Оптическая схема эксперимента: L – твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм, $P_{max} = 800$ мВт), BS – светоделительный кубик, L_1 – линза ($f_l = 150$ мм, P – измеритель мощности, MO_1 – микрообъектив ($\times 16$, $NA = 0,30$), C – кювета с частицами, CAM – видеокамера (UHCCD00800KPA, TOUPCAM, 1024×768 пикселей, размер пикселя 1,67 мкм), MO_2 – микрообъектив ($\times 8$, $NA = 0,20$). (б) Захватываемые агломерации частиц углерода.

Система управления лазерной установкой позволяла изменять выходную мощность лазерного пучка в пределах от 0 Вт до P_{max} . Для ввода микрочастиц внутрь лазерного пучка с Гауссовым профилем распределения интенсивности был использован шприц с диаметром выходного отверстия около 700 мкм. Частицы, вылетевшие из шприца, устремлялись во внутреннюю область кюветы под действием начальной внешней силы F_O и силы тяжести G (рис.2а). Попав в область вблизи фокуса лазерного пучка, частицы начинали поглощать излучения, что приводило к их нагреву. Возникающие фотофоретические силы F_{PPAT} (из-за градиента температур на поверхности частицы) и F_{PPAa} (из-за неоднородности коэффициента тепловой accommodation из-за несферичности формы частиц) и силы светового давления F_R , приводили к замедлению частицы (рис.2б) и её захвату внутри лазерного пучка (рис.2в). При этом происходил захват частиц как в области до, так и в области после фокуса. Механизм такого типа захвата впервые был предложен в работе [14], а затем дополнен в работе [16].

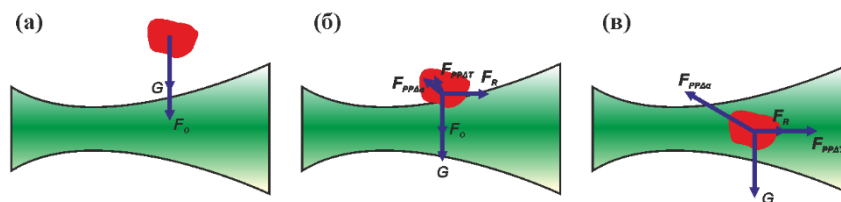


Рис. 2. Механизм захвата несферической светопоглощающей микрочастицы в лазерном пучке с Гауссовым профилем распределения интенсивности.

3. Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 представлен пример осуществления операции динамического контроля положением взвешенных в воздухе частиц, захваченных в лазерном пучке. Как видно, при начальной мощности на входе микрообъектива MO_1 300 мВт в области вблизи фокуса пучка зафиксировано несколько частиц. При постепенном снижении мощности пучка происходит их перемещение (рис. 3а-в):

1) часть частиц (те, которые захвачены в области перед фокусом пучка) начинают двигаться по направлению к фокусу пучка и соответственно в сторону по направлению движения пучка;

2) другие частицы (те, которые захвачены в области после фокуса пучка) также начинают двигаться в сторону фокуса пучка. Но теперь это движение приводит к их перемещению по направлению к источнику излучения, и, таким образом, для них реализуется концепция «притягивающего» луча.

При сильном снижении мощности пучка часть частиц вылетает из области лазерного пучка, что объясняется тем, что для них сила тяжести начинает превышать остальные силы (рис. 3г). При достижении мощности примерно 50 мВт мы начали повышать мощность излучения. Это приводило к тому, что теперь частицы, захваченные в области перед фокусом пучка, начинают двигаться по направлению от фокуса пучка и соответственно в сторону по направлению к источнику излучения (рис. 3г-е).

Как было сказано выше, при уменьшении мощности пучка частицы с большой относительной массой покидают пучок, частицы же с меньшей массой начинают притягиваться в области с повышенной интенсивностью (т.е. в область фокуса), и получают новое квазистабильное положение равновесия, которое можно нарушить путём изменения мощности пучка или под действием внешних сил (например, под действием сильных воздушных потоков). Таким образом и реализуется концепция активно переключаемого «притягивающего/отталкивающего» луча. Стоит отметить, что такой тип лучей может быть использован как для перемещения слабопоглощающих, так и для перемещения сильнопоглощающих частиц несферической формы.

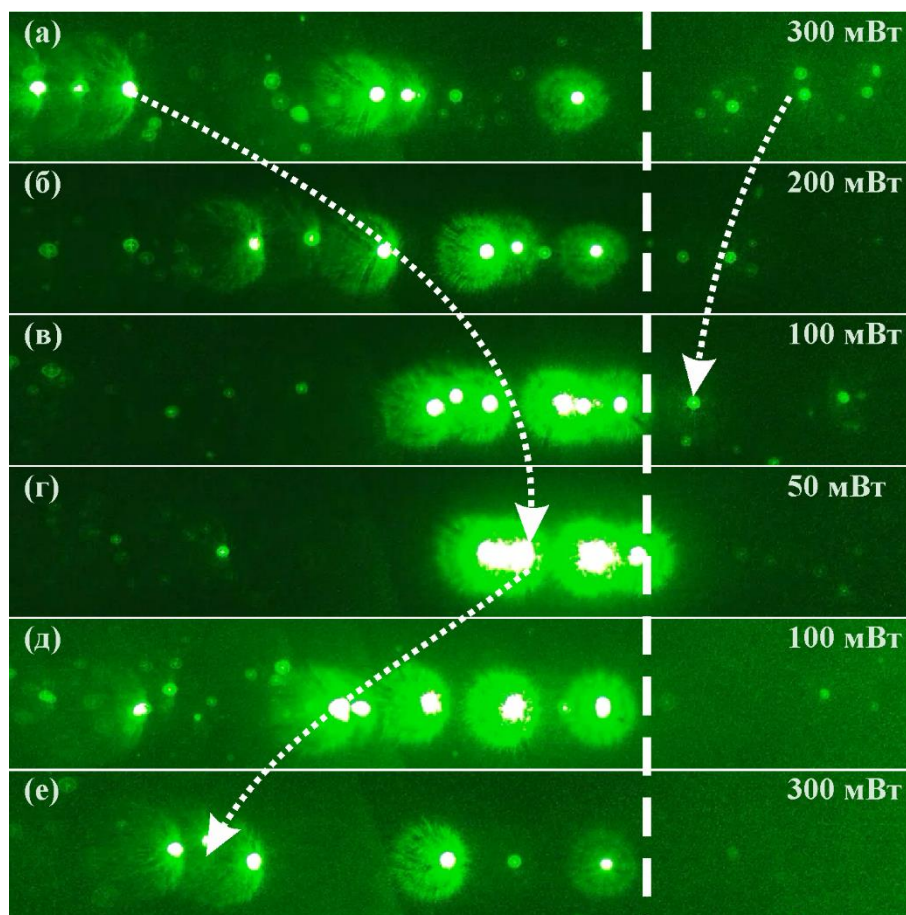


Рис. 3. Стадии движения захваченных микрочастиц в лазерном пучке при изменении мощности излучения.

4. Заключение

В работе экспериментально исследовано влияние изменения мощности лазерного пучка с Гауссовым профилем распределения интенсивности на процесс движения светопоглощающих микрочастиц, попавших в область пучка. В основе механизма такого лазерного захвата лежало явление фотофорезиса. При этом размер частиц варьировался в диапазоне от единиц до десятков микрометров. На основе данной процедуры была предложена и реализована концепция активно переключаемого «притягивающего/отталкивающего» луча. В то же время остаётся нерешённой проблема повышения стабильности захвата микрообъектов, что приводит к вылету некоторых частиц из лазерного пучка при снижении мощности излучения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, гранта Президента РФ поддержки молодого кандидата наук (МК-2390.2017.2), а также грантов РФФИ (16-47-630546, 16-47-630677, 17-42-630008).

Литература

- [1] Chen, J. Optical pulling force / J. Chen, J. Ng, Z. Lin and C. T. Chan. // Nat. Photon. – 2011. – Vol. 5. – P. 531–534. DOI:10.1038/nphoton.2011.153.
- [2] Ashkin, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure / A. Ashkin // Phys. Rev. Lett. – 1970. – Vol. 24. – P. 156. DOI:10.1103/PhysRevLett.24.156.
- [3] Ruffner, D.B. Optical conveyors: A class of active tractor beams / D.B. Ruffner and D.G. Grier // Phys. Rev. Lett. – 2012. – Vol. 109. – P. 163903. DOI:10.1103/PhysRevLett.109.163903.
- [4] Brzobohatý, O. Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a ‘tractor beam’ / O. Brzobohatý, V. Karásek, M. Šiler, L. Chvátal, T. Čížmár and P. Zemánek // Nat. Photon. – 2013. – Vol. 7. – P. 123–127. DOI:10.1038/nphoton.2012.332.
- [5] Shvedov, V. A long-range polarization-controlled optical tractor beam / V. Shvedov, A.R. Davoyan, C. Hnatovsky, N. Engheta and W. Krolikowski // Nat. Photon. – 2014. – Vol. 8. – P. 846–850. DOI:10.1038/nphoton.2014.242.
- [6] Lin, J. Optical pulling of airborne absorbing particles and smut spores over a meter-scale distance with negative photophoretic force / J. Lin, A.G. Hart, and Y.-q. Li // Appl. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 106. – P. 171906. DOI:10.1063/1.4919533.
- [7] Ashkin, A. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu // Opt. Lett. – 1986. – Vol. 11. – P. 288–290. DOI:10.1364/OL.11.000288.
- [8] Desyatnikov, A.S. Photophoretic manipulation of absorbing aerosol particles with vortex beams: theory versus experiment / A.S. Desyatnikov, V.G. Shvedov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Yu.S. Kivshar // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17. – P. 8201–8211. DOI:10.1364/OE.17.008201.
- [9] Lewittes, M. Radiometric levitation of micron sized spheres / M. Lewittes, S. Arnold and G. Oster // Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 40. – P. 455–457. DOI:10.1063/1.93146.

- [10] Charlson, R.J. Climate forcing by anthropogenic aerosols / R.J. Charlson, S.E. Schwartz, J.M. Hales, R.D. Cess, J.A. Coakley, Jr., J.E. Hansen, and D.J. Hoffman // *Science*. – 1992. – Vol. 255. – P. 423-430. DOI:10.1126/science.255.5043.423.
- [11] Wilcox, L.J. The influence of anthropogenic aerosol on multi-decadal variations of historical global climate / L.J. Wilcox, E.J. Highwood // *Environ. Res. Lett.* – 2013. – Vol. 8. – P. 024033. DOI:10.1088/1748-9326/8/2/024033.
- [12] Pöschl, U. Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects / U. Pöschl // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2005. – Vol. 44. – P. 7520-7540. DOI:10.1002/anie.200501122.
- [13] Ramanathan, V. Atmosphere: Aerosols, climate, and the hydrological cycle / V. Ramanathan, P.J. Crutzen, J.T. Kiehl, D. Rosenfeld // *Science*. – 2001. – Vol. 294. – P. 2119-2124. DOI:10.1126/science.1064034.
- [14] 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, and Z. Chen // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20. – P. 16212-16217. DOI:10.1364/OE.20.016212.
- [15] Ling, L. Measurement of Raman spectra of single airborne absorbing particles trapped by a single laser beam / L. Ling and Y.-q. Li // *Opt. Lett.* – 2013. – Vol. 38. – P. 416-418. DOI:10.1364/OL.38.000416.
- [16] Wang, C. Laser pushing or pulling of absorbing airborne particles / C. Wang, Z. Gong, Y.-L. Pan, and G. Videen // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – Vol. 109. – P. 011905. DOI:10.1063/1.4955476.