

МАНИПУЛИРОВАНИЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИМИ ЧАСТИЦАМИ В ВОЗДУХЕ С ПОМОЩЬЮ МАССИВОВ СВЕТОВЫХ «БУТЫЛОК»

Порфирьев А.П., Скиданов Р.В.

Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

Аннотация

В работе продемонстрирован оптический захват и перемещение агломераций наночастиц углерода как с помощью одиночных световых «бутылок», так и с помощью массивов таких ловушек. Для формирования световых ловушек были использованы дифракционные оптические элементы (ДОЭ), рассчитанные с помощью метода, в основе которого лежит использование суперпозиции пучков Бесселя. Благодаря структуре таких ловушек удалось осуществить трёхмерное перемещение захваченных микрообъектов.

Ключевые слова: оптическое манипулирование, светопоглощающие частицы, световые «бутылки», фотофорезис, фотофоретические силы, трёхмерный оптический захват.

Введение

Анализ свойств взвешенных в воздухе частиц (аэрозоль) представляет большой интерес для исследований, связанных с загрязнением воздуха, здоровьем человека, глобальным изменением климата [1–2], поэтому существует необходимость в создании новых подходов для изучения и наблюдения аэрозолей.

Для наблюдения и изучения аэрозолей в последнее время активно применяются подходы, использующие лазерное излучение [3–8]. Первые эксперименты по лазерному манипулированию впервые были проведены А. Эшкиным [9]. Как известно, светопоглощающие частицы, попавшие в область лазерного пучка, со стороны лазерного пучка испытывают не только силы светового давления, но и фотофоретические силы, порядок которых превосходит силы светового давления [10]. Фотофоретические силы являются причиной движения частиц под действием светового излучения. В случае положительного фотофорезиса частицы отталкиваются от областей максимума интенсивности. В этом случае для их локализации в некоторой области пространства могут быть использованы световые ловушки типа световые «бутылки» [11], которые представляют область минимума интенсивности, окружённую со всех сторон областями максимума интенсивности. Для формирования световых «бутылок» с целью их использования для фотофоретического захвата рассматривались различные подходы, основанные на так называемой *moiré*-технике [12], использовании сферической абберации [13] и комбинации двух соосных конусообразных пучков [14]. Стоит отметить, что для осуществления стабильного захвата и перемещения необходимо соответствие размеров сформированных световых ловушек и захватываемых частиц. Это создаёт дополнительные трудности при захвате частиц, размер которых составляет единицы микрометров и меньше, в среде с их низкой концентрацией.

В данной работе мы представляем экспериментальные результаты по стабильному захвату и перемещению светопоглощающих частиц с помощью световых ловушек типа световые «бутылки», сформиро-

ванных с помощью разработанного нами ранее метода [15]. Метод позволяет рассчитывать массивы световых «бутылок», что даёт дополнительные возможности при захвате частиц и изучении их свойств. В частности, такой подход позволяет увеличить границы области захвата частиц без изменения размеров самих ловушек, что повышает вероятность захвата при низкой концентрации частиц.

Формирование массивов световых «бутылок»

Для формирования массивов световых «бутылок» нами был применён подход, основанный на использовании суперпозиции пучков Бесселя с различными несущими частотами [15–16]. В этом случае функция пропускания ДОЭ описывается выражением

$$\begin{aligned} \tau(r, \phi) = \\ = \sum_{p=1}^N C_p \operatorname{sgn} \left(J_{n_p} \left(k_r r \right) \right) \exp(i n_p \phi) \times \exp(i 2\pi \mathbf{v}_p \cdot \mathbf{r}), \end{aligned} \quad (1)$$

где C_p – комплексные коэффициенты, J_n – функция Бесселя n -го порядка; k_r – радиальная компонента волнового вектора $k = 2\pi/\lambda$; (r, ϕ) – полярные координаты; $\mathbf{v}_p = (v_{px}, v_{py})$ – вектор пространственных несущих частот; $\mathbf{r} = (r \cos \phi, r \sin \phi)$.

Использование пучков с различными несущими частотами даёт дополнительную степень свободы при расчёте фазовых функций элементов, формирующих заданные распределения светового поля. Принцип формирования заданного светового поля при использовании суперпозиции пучков показан на рис. 1. Распространяясь по различным направлениям, определяемым несущими частотами, световые пучки могут образовывать на некотором участке область минимума интенсивности, ограниченную световой областью заданной формы. Как было показано ранее, данный метод позволяет рассчитывать как световые «бутылки» сложной формы, так и массивы таких ловушек [17–18].

Для формирования световых пучков была использована оптическая схема, представленная на рис. 2. Лазерный пучок, преобразованный ДОЭ, с помощью микрообъектива O_1 ($3,7\times$, $NA=0,1$) фокусируется в область внутри стеклянной кюветы. Наблюдение осуществля-

лось с помощью микрообъектива O_2 ($16\times$, $NA=0,3$). Для анализа распределений интенсивности сформированных ловушек на различных расстояниях производилось перемещение микрообъектива O_2 вдоль оптической оси и съёмка изображений, сформированных на матрице камеры Cam_1 (MDCE-5, разрешение 1280×1024 пикселей). При этом микрообъектив O_1 оставался неподвижным. Экспериментально полученные распределения интенсивности представлены на рис. 3. Продольное распределение интенсивности было реконструировано по сечениям изображений поперечных распределений, снятых с помощью камеры Cam_1 . В случае формирования массива двух световых «бутылок» максимальная ширина ловушки составила около 5 мкм. Регулировка мощности выходного пучка лазера позволяла нам производить изменение интенсивности сформированных ловушек и таким образом изменять значения сил, действующих на захваченные внутри ловушек частицы.

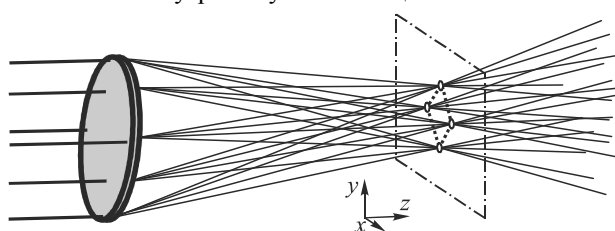


Рис. 1. Распространение суперпозиций пучков Бесселя в пространстве для формирования световой «бутылки», поперечное сечение которой имеет форму контура ромба

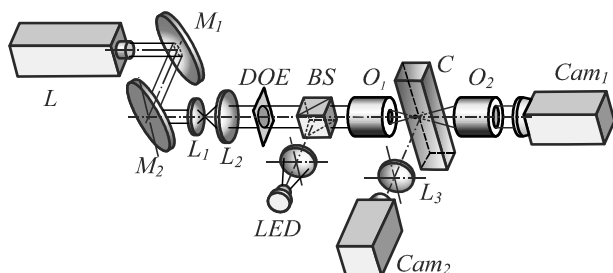


Рис. 2. Оптическая схема для формирования световых ловушек: L – твердотельный лазер ($\lambda=532$ нм), M_1, M_2 – зеркала, L_1, L_2, L_3 – линзы, DOE – ДОО, BS – делитель пучка, LED – освещающий светодиод, O_1 – фокусирующий микрообъектив, O_2 – изображающий микрообъектив, C – стеклянная кювета, Cam_1, Cam_2 – CCD-камеры

Экспериментальные результаты

В ходе экспериментов по захвату и перемещению светопоглощающих частиц для подсветки области захвата мы использовали свет от светодиода, для ввода которого был использован светоделительный кубик. Наблюдение осуществлялось в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с помощью двух CCD-камер. Камера Cam_1 (MDCE-5, разрешение 1280×1024 пикселей), матрица которой располагалась перпендикулярно относительно хода луча, осуществляла съёмку процесса манипулирования в поперечной плоскости пучка. Соответственно, камера Cam_2 (Microsoft LifeCam Studio, разрешение 1920×1080 пикселей) осуществляла съёмку процесса манипулирования в плоскости, параллельной распространению лазерного

пучка. В данном случае производилась съёмка рассеянного на частицах света. Для построения изображения на матрице камеры Cam_2 была использована линза L_3 с фокусным расстоянием 50 мм.

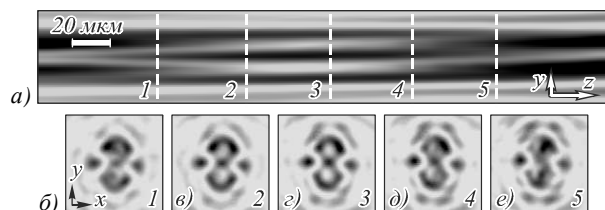


Рис. 3. Экспериментально полученные распределения интенсивности для случая формирования массива двух световых «бутылок»: «вид сбоку» для пучка (а); поперечная интенсивность для различных плоскостей, помеченных цифрами 1–5 (б–е)

Для демонстрации оптического захвата и транспортировки светопоглощающих частиц нами были использованы агломерации углеродных наночастиц. Характерные размеры агломераций, использованных в эксперименте, находились в диапазоне единиц и десятков микрометров (рис. 4). Захват таких частиц можно было наблюдать даже невооружённым глазом за счёт рассеянного от их поверхности света. Для осуществления захвата частиц в сформированные световые ловушки мы распыляли частицы сверху в область внутри кюветы. Под действием силы тяжести и тепловых потоков частицы осаждались на дно кюветы, испытывая броуновское движение. Некоторые из данных частиц обладали энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, образованного внешними границами световых «бутылок», и попадали в область минимума интенсивности внутри ловушек. Это приводило к их захвату и давало возможность осуществлять стабильное перемещение захваченных частиц в пространстве.

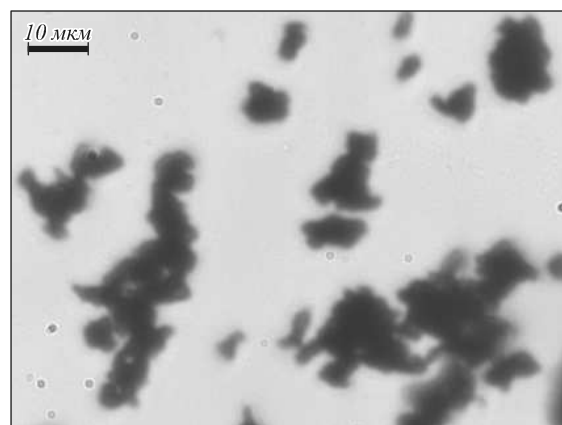


Рис. 4. Агломерации наночастиц углерода, использованные в эксперименте

На рис. 5 показан типичный случай захвата агломерации углеродных частиц с помощью одиночной световой «бутылки» в наших экспериментах. Из изображений, полученных с помощью камеры Cam_2 , видно, как захваченная частица не покидает область световой ловушки при её перемещении в пространстве. Так как камера Cam_1 была неподвижной, то при удалении частицы

от области фокусировки камеры она исчезала из зоны видимости, и поэтому на соответствующих изображениях на рис. 5б, з, е мы видим только изображение светового пучка. Перемещение световой ловушки в пространстве достигалось благодаря передвижению фокусирующего микрообъектива O_1 . Как видно из рис. 5, на изображениях «вида сбоку», т.е. полученных с помощью камеры Cam_2 , происходит смена фона, несмотря на то, что камера Cam_2 оставалась неподвижной. Это объясняется тем, что иногда при перемещении микрообъектива O_1 происходил контакт данного микрообъектива с кюветой, а, так как кювета не была жёстко закреплена, это вызывало её смещение вдоль оси z и, соответственно, смену фона на изображениях. Форма использованных в экспериментах ловушек типа световая «бутылка» позволяла осуществлять трёхмерный захват, это приводило к тому, что частицы, захваченные в таких ловушках, не покидают их из-за воздушных потоков или окружающих возмущений [7]. Поэтому такие смещения кюветы не приводили к вылету захваченной частицы из ловушки. Нам удалось перемещать частицу вдоль оси пучка на расстояния около 340 мкм (рис. 5). Данные значения были ограничены только ходом микрообъектива. Мощность излучения на выходе из лазера составила 1250 мВт, что при учёте потерь, возникающих на отражении от поверхности зеркал и линз, а также из-за использования светоделительного кубика даёт значение около 330 мВт в плоскости манипулирования перпендикулярной оси распространения пучка. Учитывая расчётную эффективность формирования световой ловушки [16] для мощности, идущей на формирование самой световой «бутылки», получаем значение около 16 мВт.

Использование массивов световых «бутылок» позволяет увеличить границы области захвата частиц без изменения размеров самих ловушек. Как было показано в [12], при несоответствии размеров сформированных световых ловушек и захватываемых микрообъектов невозможно добиться стабильного захвата частиц, так как они будут неконтролируемо перемещаться внутри ловушки. На рис. 6 показаны типичные результаты эксперимента по захвату и перемещению микрообъектов с помощью массива световых «бутылок». Видно, как происходит перемещение частицы, захваченной внутри одной из световых «бутылок», в плоскости xu , перпендикулярной оптической оси. При этом частица перемещалась на расстояния до 30 мкм вдоль каждой из координат. Как и в случае с одиночной световой «бутылкой», нам удалось добиться стабильного захвата агломерации углеродных наночастиц. Начальная мощность излучения составляла около 250 мВт, мощность, идущая на формирование данных световых ловушек, составила, по нашим оценкам, около 4 мВт.

К сожалению, из-за малых размеров сформированных световых ловушек, которые сравнимы с размером захваченной частицы, довольно трудно добиться одновременного захвата нескольких частиц в каждой из ловушек. Для решения таких проблем по загрузке частиц в область внутри световых ловушек

недавно было предложено использовать реконфигурируемые световые «бутылки», использующие изменение поляризации начального лазерного пучка для создания открывающихся и закрывающихся световых ловушек [19].

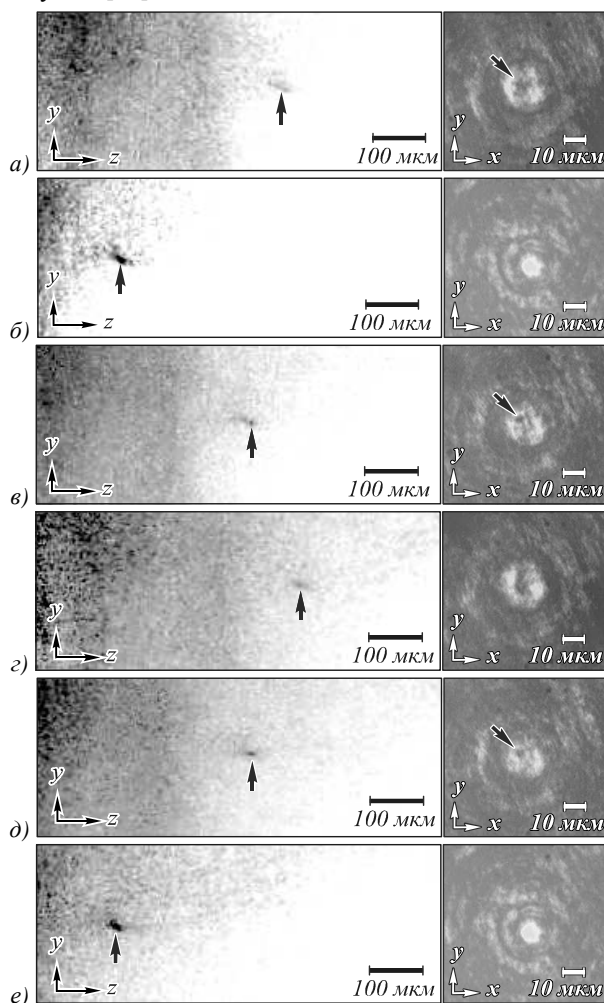


Рис. 5. Экспериментальная демонстрация захвата и перемещения агломерации наночастиц углерода с помощью одиночной световой «бутылки»: левый ряд – «вид сбоку», изображения, полученные с камеры Cam_2 ; правый ряд – изображения поперечных распределений интенсивности, полученные камерой Cam_1 . Чёрная стрелочка указывает на перемещаемый объект

Заключение и выводы

В работе продемонстрирована возможность стабильного захвата и перемещения в воздухе светопоглощающих агломераций наночастиц углерода несферической формы размером около 3 мкм как с помощью одиночных световых «бутылок», так и с помощью массивов световых «бутылок», сформированных благодаря методу, использующему суперпозиции пучков Бесселя. При этом был осуществлён полностью трёхмерный захват. В эксперименте нам удалось перемещать частицу вдоль оси пучка на расстояния около 340 мкм, в поперечной плоскости захваченная с помощью двойной световой «бутылки» частица перемещалась на расстояния 30 мкм.

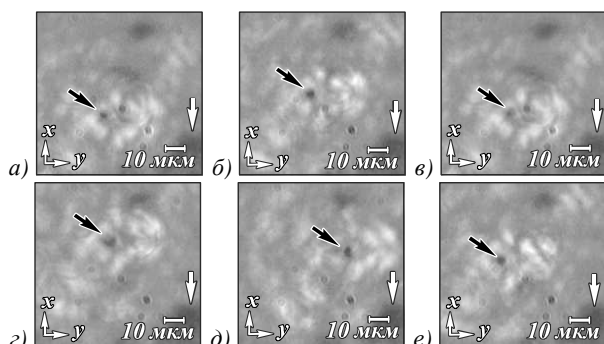


Рис. 6. Экспериментальная демонстрация захвата и перемещения агломерации наночастиц углерода с помощью массива двух световых «бутылок». Чёрная стрелочка указывает на перемещаемый объект, белая стрелочка – на неподвижный объект (расфокусированное изображение частицы, прилипшей к стенке стеклянной кюветы)

Чтобы изменить размер сформированных ловушек и таким образом поменять размер захватываемых частиц, в нашем эксперименте необходимо было менять микрообъектив. Это создавало трудности, связанные с невозможностью плавного изменения размеров световых ловушек во время экспериментов. Для решения этой проблемы ДОЭ можно заменить на пространственный модулятор света. Использование такого модулятора даст дополнительные возможности для динамического манипулирования. Возникающие в этом случае ограничения на мощность используемого лазерного пучка не будут критичными, потому что для захвата светопоглощающих частиц не требуются большие значения мощностей лазерного излучения. Так, в наших экспериментах оценочная мощность лазерного излучения, идущая на формирование самих световых ловушек, равнялась 4–16 мВт.

Результаты, описанные в работе, предоставляют новые возможности для осуществления контролируемого манипулирования светопоглощающими микрообъектами и, таким образом, могут быть полезны для различных приложений оптики и биологии, а также метеорологии.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

Литература

1. **Pöschl, U.** Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects / U. Pöschl // *Angewandte Chemie – International Edition*. – 2005. – Vol. 44(46). – P. 7520-7540.
2. **Ramanathan, V.** Atmosphere: Aerosols, climate, and the hydrological cycle / V. Ramanathan, P.J. Crutzen, J.T. Kiehl, D. Rosenfeld // *Science*. – 2001. – Vol. 294(5549). – P. 2119-2124.
3. **Desyatnikov, A.S.** Optical guiding of absorbing nanoclusters in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Yu.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(7). – P. 5743-5757.
4. **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 // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(10). – P. 8201-8211.

5. **Pan, Y.-L.** Trapping of individual airborne absorbing particles using a counterflow nozzle and photophoretic trap for continuous sampling and analysis / Y.-L. Pan, C. Wang, S.C. Hill, M. Coleman, L.A. Bereshev, J.L. Santarpia // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 104(11). – P. 113507.
6. **Lin, J.** Optical trapping and rotation of airborne absorbing particles with a single focused laser beam / J. Lin, Y.-Q. Li // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 104(10). – P. 101909.
7. **Chen, Z.** Observation of trapping and transporting airborne absorbing particles with a single optical beam / Z. Zhang, D. Cannan, J. Liu, P. Zhang, D.N. Christodoulides, Z. Chen // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(15). – P. 16212-16217.
8. **Ling, L.** Measurement of Raman spectra of single airborne absorbing particles trapped by a single laser beam / L. Ling, Y.-Q. Li // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38(4). – P. 416-418.
9. **Ashkin, A.** Acceleration and trapping of particles by radiation pressure / A. Ashkin // *Physical Review Letters*. – 1970. – Vol. 24(4). – P. 156-159.
10. **Oster, G.** Radiometric levitation of micron sized spheres / M. Lewittes, S. Arnold, G. Oster // *Applied Physics Letters*. – 1982. – Vol. 40(6). – P. 455-457.
11. **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 // *Optics Letters*. – 2000. – Vol. 25(4). – P. 191-193.
12. **Chen, Z.** Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by moiré techniques / P. Zhang, Z. Zhang, J. Prakash, S. Huang, D. Hernandez, M. Salazar, D.N. Christodoulides, Z. Chen // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(8). – P. 1491-1493.
13. **Hnatovsky, C.** Robust trapping and manipulation of airborne particles with a bottle beam / V.G. Shvedov, C. Hnatovsky, A.V. Rode, W. Krolikowski // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19(18). – P. 17350-17356.
14. **Pan, Y.-L.** Photophoretic trapping of absorbing particles in air and measurement of their single-particle Raman spectra / Y.-L. Pan, S.C. Hill, M. Coleman // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(5). – P. 5325-5334.
15. **Скиданов, Р.В.** Формирование массива световых «бутылок», основанное на использовании суперпозиции пучков Бесселя / Р.В. Скиданов, А.П. Порфирьев // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 80-90.
16. **Скиданов, Р.В.** Формирование массива полых пучков для осаждения и позиционирования микрочастиц / Р.В. Скиданов, А.П. Порфирьев // *Компьютерная оптика*. – 2012. – Т. 36, № 3. – С. 387-394.
17. **Porfirev, A.P.** Generation of an array of optical bottle beams using a superposition of Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52(25). – P. 6230-6238.
18. **Rykov, M.A.** Various superpositions of Bessel beams for capture and controlled rotation of microobjects / A.P. Porfirev, A.A. Morozov, M.A. Rykov, S.V. Ganchevskaya, R.V. Skidanov // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 9164. – P. 91643D.
19. **Krolikowski, W.** Optical vault: A reconfigurable bottle beam based on conical refraction of light / A. Turpin, V. Shvedov, C. Hnatovsky, Yu.V. Loiko, J. Mompart, W. Krolikowski // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(22). – P. 26335-26340.

References

1. **Pöschl, U.** Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects / U. Pöschl // *Angewandte Chemie – International Edition*. – 2005. – Vol. 44(46). – P. 7520-7540.
2. **Ramanathan, V.** Atmosphere: Aerosols, climate, and the hydrological cycle / V. Ramanathan, P.J. Crutzen, J.T. Kiehl, D. Rosenfeld // *Science*. – 2001. – Vol. 294(5549). – P. 2119-2124.

3. **Desyatnikov, A.S.** Optical guiding of absorbing nano-clusters in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Yu.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(7). – P. 5743-5757.
4. **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 // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(10). – P. 8201-8211.
5. **Pan, Y.-L.** Trapping of individual airborne absorbing particles using a counterflow nozzle and photophoretic trap for continuous sampling and analysis / Y.-L. Pan, C. Wang, S.C. Hill, M. Coleman, L.A. Bereshev, J.L. Santarpia // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 104(11). – P. 113507.
6. **Lin, J.** Optical trapping and rotation of airborne absorbing particles with a single focused laser beam / J. Lin, Y.-Q. Li // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 104(10). – P. 101909.
7. **Chen, Z.** Observation of trapping and transporting airborne absorbing particles with a single optical beam / Y. Zhang, D. Cannan, J. Liu, P. Zhang, D.N. Christodoulides, Z. Chen // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(15). – P. 16212-16217.
8. **Ling, L.** Measurement of Raman spectra of single airborne absorbing particles trapped by a single laser beam / L. Ling, Y.-Q. Li // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38(4). – P. 416-418.
9. **Ashkin, A.** Acceleration and trapping of particles by radiation pressure / A. Ashkin // *Physical Review Letters*. – 1970. – Vol. 24(4). – P. 156-159.
10. **Oster, G.** Radiometric levitation of micron sized spheres / M. Lewittes, S. Arnold, G. Oster // *Applied Physics Letters*. – 1982. – Vol. 40(6). – P. 455-457.
11. **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 // *Optics Letters*. – 2000. – Vol. 25(4). – P. 191-193.
12. **Chen, Z.** Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by moiré techniques / P. Zhang, Z. Zhang, J. Prakash, S. Huang, D. Hernandez, M. Salazar, D.N. Christodoulides, Z. Chen // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36(8). – P. 1491-1493.
13. **Hnatovsky, C.** Robust trapping and manipulation of airborne particles with a bottle beam / V.G. Shvedov, C. Hnatovsky, A.V. Rode, W. Krolikowski // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19(18). – P. 17350-17356.
14. **Pan, Y.-L.** Photophoretic trapping of absorbing particles in air and measurement of their single-particle Raman spectra / Y.-L. Pan, S.C. Hill, M. Coleman // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20(5). – P. 5325-5334.
15. **Skidanov, R.V.** Generation of optical bottle beams array by superposition Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Computer Optics*. – 2012. – Vol. 36(1). – P. 80-90.
16. **Skidanov, R.V.** Formation of the massif of hollow beams for sedimentation and positioning of microparticles / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Computer Optics*. – 2012. – Vol. 36(3). – P. 387-394. – (In Russian).
17. **Porfirev, A.P.** Generation of an array of optical bottle beams using a superposition of Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Applied Optics*. – 2013. – Vol. 52(25). – P. 6230-6238.
18. **Rykov, M.A.** Various superpositions of Bessel beams for capture and controlled rotation of microobjects / A.P. Porfirev, A.A. Morozov, M.A. Rykov, S.V. Ganchevskaya, R.V. Skidanov // *Proceedings of SPIE*. – 2014. – Vol. 9164. – P. 91643D.
19. **Krolikowski, W.** Optical vault: A reconfigurable bottle beam based on conical refraction of light / A. Turpin, V. Shvedov, C. Hnatovsky, Yu.V. Loiko, J. Mompart, W. Krolikowski // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21(22). – P. 26335-26340.

MANIPULATION OF LIGHT-ABSORBING PARTICLES IN AIR WITH OPTICAL BOTTLE ARRAYS

A.P. Porfirev, R.V. Skidanov

*Image Processing Systems Institute, Russian Academy of Sciences,
Samara State Aerospace University*

Abstract

We demonstrate optical trapping and movement of a carbon nanoparticle agglomeration with both a single optical bottle beam and arrays of such traps. Diffractive optical elements (DOE) designed by a method based on a superposition of the Bessel beams were employed for the generation of the optical traps. Due to the structure of the generated traps, we were able to carry out a three-dimensional movement of trapped microscopic objects.

Key words: optical manipulation, absorbing particles, optical bottle, photophoresis, photophoretic forces, 3D optical trapping.

Сведения об авторах

Сведения об авторе Порфирьев Алексей Петрович – см. стр. 657 этого номера.

Сведения об авторе Скиданов Роман Васильевич – см. стр. 618 этого номера.

Поступила в редакцию 3 октября 2014 г.