

# ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИХ ЧАСТИЦ, ВЗВЕШЕННЫХ В ВОЗДУХЕ, С ПОМОЩЬЮ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ РАЗНОГО ТИПА

А.П. Порфирьев

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

В работе продемонстрирован оптический захват агломераций наночастиц углерода в воздухе под действием фотофоретических сил. Для захвата были использованы световые пучки трёх типов: сфокусированный пучок Эрмита-Гаусса  $TEM_{10}$ , световой пучок типа световая «бутылка» и полый световой пучок, являющийся суперпозицией пучков Бесселя. Приведены экспериментальные результаты захвата каждым из типов пучков. Произведено описание особенностей захвата частиц в каждом из представленных типов световых пучков.

## Введение

Оптическое манипулирование с помощью лазерного излучения впервые было продемонстрировано А. Эшкиным [1] и в настоящее время широко применяется в областях биофотоники и микромеханики для манипулирования микро- и нанообъектами [2-5]. Осуществление оптического манипулирования возможно как в жидких средах, так и в газообразных. Захват прозрачных микрообъектов в жидкости обычно осуществляется за счёт действия градиентной силы сильносфокусированного лазерного пучка [6], в то время как захват светопоглощающих микрообъектов в воздухе происходит за счёт действия фотофоретических сил [7]. В случае положительного фотофорезиса поглощающие частицы движутся по направлению от источника света, в случае отрицательного фотофорезиса – по направлению к нему.

В настоящей работе представлено сравнение оптического манипулирования светопоглощающими агломерациями наночастиц углерода с помощью лазерных пучков трёх типов: 1) сфокусированного пучка Эрмита-Гаусса  $TEM_{10}$ ; 2) светового пучка типа световая «бутылка», который представляет собой область минимума или нуля интенсивности, окружённую областями максимума интенсивности по всем направлениям [8]; 3) полого светового пучка, который сохраняет на оси нуль интенсивности при распространении, и представляет собой световую трубку. Каждый из этих типов пучков обладает определёнными особенностями, которые позволяют осуществлять различные виды манипулирования.

## Оптическое манипулирование с помощью пучка Эрмита-Гаусса $TEM_{10}$

Структура пучка Эрмита-Гаусса в поперечном сечении описывается функцией Эрмита-Гаусса вида:

$$E_{nm}(x, y) = \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] H_n\left(\frac{x}{\sigma}\right) H_m\left(\frac{y}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где  $H_n$  многочлен Эрмита  $n$ -го порядка,  $\sigma$  - ширина фундаментальной гауссовой моды,  $(x, y)$  – декартовы координаты.

Такой пучок является инвариантным при распространении в пространстве (с точностью до масштаба). На рис. 1 показан профиль поперечной интенсивности пучка Эрмита-Гаусса ( $TEM_{10}$ ). Как видно из рисунка профиль интенсивности такого пучка представляет собой два пика интенсивности.

В работе [9] рассматривался захват светопоглощающих частиц с помощью одного сфокусированного гауссова пучка, и была продемонстрирована возможность стабильного захвата, если частицы имеют несферическую форму. Это возможно благодаря действию фотофоретической силы, возникающей из-за тепловой аккомодации, коэффициент которой

существенно зависит от состояния поверхности. Таким образом, пучки Эрмита-Гаусса могут быть использованы аналогичным образом для множественного захвата частиц в отдельных формируемых пиках интенсивности.

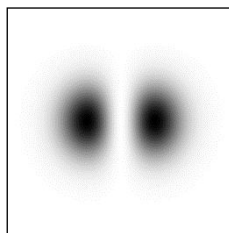


Рисунок 1 – Профиль интенсивности пучка Эрмита-Гаусса TEM<sub>10</sub> (негатив)

Для проведения экспериментов по оптическому захвату и транспортировке светопоглощающих микрообъектов в воздухе был использован TEM<sub>10</sub> пучок твердотельного лазера с длиной волны 457 нм (максимальная выходная мощность 2 Вт). В качестве манипулируемых микрообъектов были использованы агломерации углеродных наночастиц, поперечные размеры которых составляли от нескольких микрометров до десятков микрометров (рис. 2). Видно, что частицы имеют несферическую форму.

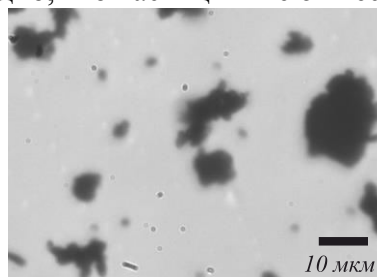


Рисунок 2 – Агломерации наночастиц углерода, использованные в эксперименте

В ходе экспериментов после распыления из шприца внутрь кюветы сверху микрочастицы осаждались под действием силы тяжести, и часть из них попадала в область лазерного пучка, что приводило к их захвату. Перемещение захваченных частиц осуществлялось за счёт перемещения фокусирующей оптики, которую можно было перемещать в трёх взаимноперпендикулярных направлениях. В результате при движении сфокусированного пучка захваченные микрочастицы двигались вслед за ним.

На рис. 3 представлены стадии движения двух агломераций углеродных наночастиц, каждая из которых была захвачена в различных максимумах интенсивности сгенерированного пучка Эрмита-Гаусса TEM<sub>10</sub>. В этом случае было осуществлено контролируемое перемещение захваченных микрообъектов.

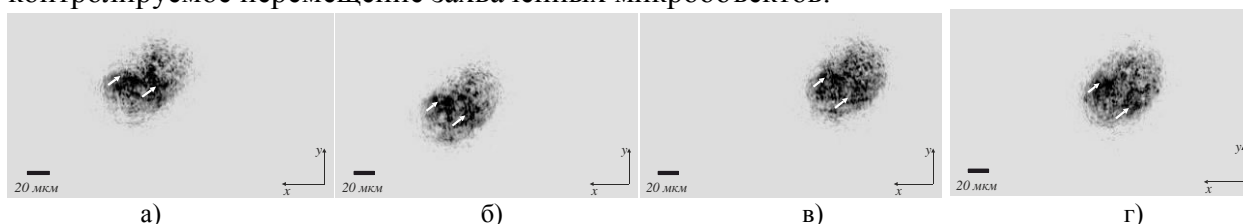


Рисунок 3 – Захват и перемещение двух агломераций микрочастиц (отмечены белыми стрелочками) с помощью лазерного пучка TEM<sub>10</sub> (негативные изображения): перемещение частиц в плоскости XY

### **Оптическое манипулирование с помощью светового пучка типа световая «бутылка»**

Так как световые «бутылки» представляют собой область минимума интенсивности, окружённую со всех сторон областями максимума интенсивности, при их использовании возможным становится стабильный захват светопоглощающих частиц любой формы. Для формирования одиночной световой «бутылки» был использован метод, основанный на формировании суперпозиции пучков Бесселя, предложенный в работе [10].

В экспериментах с данным типом пучков также были использованы частицы, представленные на рисунке 2. На рис. 4 показан типичный случай захвата одной такой агломерации углеродных частиц с помощью одиночной световой «бутылки». Видно, что захваченная частица не покидает область световой ловушки при её перемещении в пространстве. Так как камера, производившая съёмку по направлению пучка была зафиксирована во время экспериментов, то при перемещении светового пучка частица исчезала из зоны видимости, и поэтому на соответствующих изображениях на рис. 4,г,е мы видим только изображение светового пучка. Перемещение световой ловушки в пространстве достигалось благодаря перемещению фокусирующей оптики, как и в экспериментах с пучком Эрмита-Гаусса  $TEM_{10}$ . В эксперименте нам удалось переместить частицу вдоль оси пучка на расстояния около 340 мкм. Расчетное значение мощности, идущей на формирование самой световой «бутылки» составляло около 16 мВт.

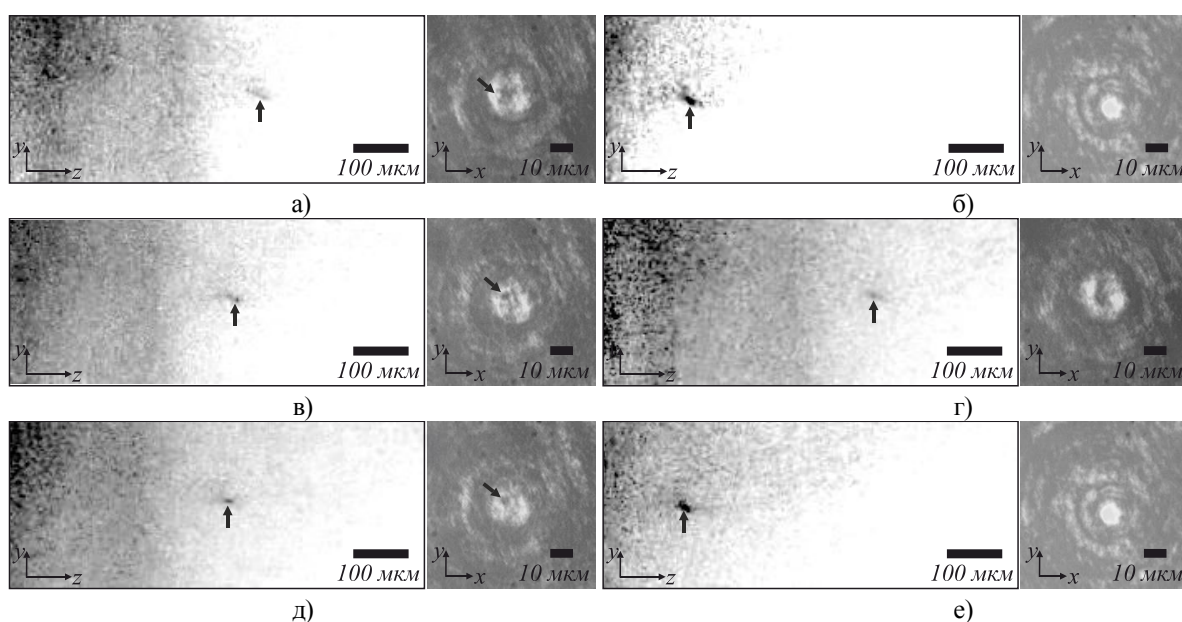


Рисунок 4 – Экспериментальная демонстрация захвата и перемещения агломерации наночастиц углерода с помощью одиночной световой «бутылки»: левый ряд – «вид сбоку», изображения, полученные с камеры, снимающей вдоль распространения пучка; правый ряд – изображения поперечных распределений интенсивности, полученные камерой, снимающей по направлению распространения пучка. Чёрная стрелочка указывает на перемещаемый объект

### Оптическое манипулирование с помощью полого светового пучка типа световая трубка

Полые световые пучки представляют собой световые пучки с нулевой осевой интенсивностью вдоль оси распространения. Благодаря конфигурации полого светового пучка он является универсальной световой ловушкой как для прозрачных, так и для непрозрачных микрочастиц при захвате в жидких средах [11]. При фокусировке такие пучки становятся своеобразными световыми конусами без вершины, которые могут быть использованы для трёхмерного удержания светопоглощающих частиц в воздухе внутри этой конической структуры [12].

Для формирования таких полых световых пучков, которые имеют заданную форму поперечного сечения, могут быть использованы методы, описанные в [13]. Меняя форму поперечного сечения таких пучков, можно изменить форму области, внутри которой будут перемещаться захваченные частицы. На рис. 5 представлены стадии движения отдельной агломерации наночастиц углерода внутри сфокусированного полого светового пучка, поперечное распределение интенсивности которого имеет форму контура правильного пятиугольника. Видно, что частица за всё время наблюдения перемещается внутри области размером примерно 200x200 мкм и не покидает её.

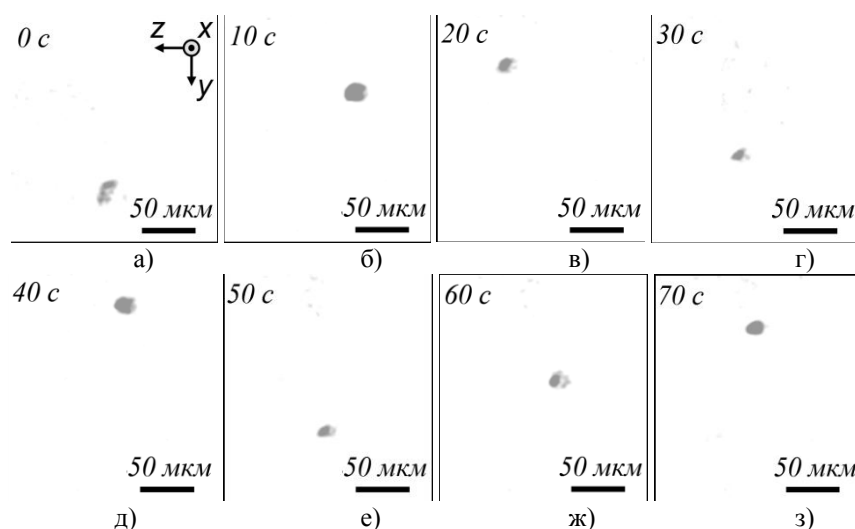


Рисунок 5 – Стадии движения агломерации углеродных наночастиц, захваченной в область минимума интенсивности полого светового пучка, распределение интенсивности в поперечном сечении которого имеет форму контура правильного пятиугольника. Представлены негативные изображения

### Заключение

В работе представлены эксперименты по оптическому захвату и манипулированию светопоглощающими частицами с помощью трёх разных типов световых пучков. Показано, что:

- 1) с помощью пучков Эрмита-Гаусса можно добиться множественного стабильного захвата несферических частиц в отдельных сформированных пиках интенсивности;
- 2) с помощью световых пучков типа световые «бутылки» можно добиться стабильного захвата и перемещения таких же частиц на расстояния, в сотни раз превышающие их собственные размеры;
- 3) с помощью полых световых пучков заданной формы можно осуществить удержание светопоглощающих частиц внутри области заданной формы, размеры которой превышают в десятки раз размеры частицы.

### Литература

1. Ashkin, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure / A. Ashkin // *Physical Review Letters*. – 1970. – V. 24(4). – P. 156-159.
2. Grier, D.G. A revolution in optical manipulation / D.G. Grier // *Nature*. – 2003. – V. 424. – P. 810-816.
3. Скиданов, Р.В. Суперпозиция вихревых световых пучков для захвата и перемещения биологических микрообъектов / Р.В. Скиданов, М.А. Рыков // *Компьютерная оптика*. - 2013. - Т. 37, № 4. - С. 431-435.
4. Морозов, А.А. Вращение микротурбин в сложных вихревых пучках / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. - 2013. - Т. 37, № 2. - С. 203-207.
5. Kim, K. Simultaneous 3D visualization and position tracking of optically trapped particles using optical diffraction tomography / K. Kim, J. Yoon, Y.K. Park // *Optica*. - 2015. - V. 2(4). P. 343-346.
6. Chu, S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu // *Optics Letters*. - 1986. - V. 11(5). - P. 288–290.
7. 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. - V. 17(7). - P. 5743-5757.
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 // *Optics Letters*. – 2000. – V. 25(4). P. 191-193.
9. 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. V. 20(15). - P. 16212-16217.
10. Порфирьев, А.П. Формирование массива световых «бутылок», основанное на использовании суперпозиции пучков Бесселя / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. - 2012. - Т. 36, № 1. - С. 80-90.
11. Порфирьев, А.П. Оптический захват микрочастиц в специальных ловушках / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. - 2012. - Т. 36, № 2. - С. 211-218.

12. Порфирьев, А.П. Оптический захват микрочастиц в специальных ловушках / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. - 2012. - Т. 36, № 3. - С. 387-394.

13. Порфирьев, А.П. Простой способ формирования полых недифрагирующих световых пучков с распределением интенсивности в виде контура правильного многоугольника/ А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. - 2014. - Т. 38, № 2. - С. 243-248.