

ЛАЗЕРНОЕ МАНИПУЛИРОВАНИЕ, ОСНОВАННОЕ НА ДЕЙСТВИИ ФОТОФОРЕТИЧЕСКИХ СИЛ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

А.П. Порфирьев^{1,2}, А.С. Шипилов¹

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

В работе продемонстрировано лазерное манипулирование светопоглощающими частицами в воздухе с помощью пространственного модулятора света. Используя возможности модулятора света, продемонстрирована возможность независимого динамического контроля положения отдельных захваченных частиц. Продемонстрирована возможность осуществления передачи частиц, захваченных в области одной из сформированных ловушек, в другие.

Ключевые слова: оптическое манипулирование, пространственный модулятор света, фотофоретические силы, светопоглощающие частицы.

Введение

Как известно, различные первичные биологические аэрозольные частицы, к которым относятся бактерии, грибковые споры, растительная пыльца, небольшие фрагменты растений или грибов и вторичные биологические аэрозольные частицы, такие как, например, образованные путем озono-инициированной полимеризации терпенов, являются возможными переносчиками ряда заболеваний человека (например, сибирской язвы) или растений (например, заболевание «ржавчиной») [1, 2]. Кроме того такие аэрозоли являются аллергенами (например, пыльца), а также влияют на климат, поглощая и/или переизлучая свет, меняют структуру облаков, структуры осадков, действуя в качестве ядер конденсации. Всё это приводит к необходимости разработки новых эффективных методов для быстрого анализа атмосферных аэрозолей.

В настоящее время для целей обнаружения биологических аэрозолей, их анализа и определения используются различные оптические методы, такие как оптические и электронные микроскопы [3], рентгеновская спектроскопия, флуоресцентная микроскопия, спектроскопия, рамановская спектроскопия и комбинации рамановской и изображающей спектроскопии [4]. Данные способы были разработаны для частиц в образцах воздуха, которые пропускаются через измерительный прибор с потоком воздуха.

Стоит отметить, что существует потребность в приборах, которые могли бы быть использованы для анализа отдельных аэрозолей в режиме реального времени. В этом случае рамановское (комбинационное рассеивание) будет более информативным. Ключевая проблема в измерениях рамановского спектра для взвешенных в воздухе частиц заключается в том, что данный вид рассеивания настолько слабый, поэтому существует необходимость стабильно удерживать анализируемые частицы в течении времени измерения. Поэтому способы, в которых воздух с исследуемыми образцами пропускается через измерительный прибор, в данном случае не являются подходящими.

Для решения проблемы удержания частиц можно использовать технику оптического захвата, основанную на использовании фотофоретических сил [5-7]. Фотофоретические силы на несколько порядков превышают силы светового давления, поэтому для захвата частиц в газообразных средах могут быть использованы лазеры с малой мощностью [8, 9]. Использование техники голографических оптических пинцетов, для реализации которой широко используются пространственные модуляторы света, позволяет осуществлять одновременное параллельное манипулирование множеством микрообъектов [10]. Техника оптического пинцета позволяет перемещать захваченные образцы в область измерения, и динамически осуществлять смену исследуемых образцов.

Таким образом, комбинация пространственного модулятора света для формирования множественных световых ловушек и спектрографической измерительной техники для спектральных измерений позволит осуществлять параллельный анализ множества аэрозолей, захваченных в исследуемом объёме. Возможность использования маломощных лазеров и компактных гиперспектральных камер, разрабатываемых в настоящее время [11-13], позволит создавать компактные приборы, которые дадут возможность проводить анализ исследуемых образцов практически в режиме реального времени.

1. Метод формирования массива световых ловушек

Как известно, в случае положительного фотофорезиса светопоглощающие частицы, взвешенные в воздухе, движутся по направлению от источника света, в случае отрицательного фотофорезиса – в сторону по направлению к источнику света [14]. Поэтому до недавнего времени считалось невозможным осуществить захват светопоглощающих частиц в воздухе с помощью одного пучка, имеющего Гауссовый профиль. В [7] авторы смогли показать с помощью теоретических выкладок и экспериментов по захвату, что такой захват становится возможен, если частица имеет несферическую форму. Используя сфокусированный Гауссов пучок можно добиться трёхмерного захвата частиц.

В работе [15] была продемонстрирована возможность захвата светопоглощающих частиц в воздухе с помощью пучка Гаусса-Эрмитта ТЕМ₁₀. В этом случае формировалось два световых пика, в каждый из которых удалось захватить отдельную частицу.

Для формирования массива световых ловушек можно использовать так называемый «метод суперпозиции призм и линз». В этом случае функция пропускания элемента будет иметь вид:

$$T(x, y) = \sum_{n=1}^N \exp\left(-\frac{k[x^2 + y^2]}{2f_n}\right) \exp(i[x\omega_{xn} + y\omega_{yn}]), \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, f_n – расстояние на котором формируется n -ая ловушка, ω_{xn} и ω_{yn} пространственные частоты n -ой ловушки.

Как видно функция пропускания элемента имеет комплексную форму. В случае небольшого числа формируемых ловушек амплитудную компоненту можно просто проигнорировать и использовать чисто фазовый элемент. При большом числе сформированных ловушек для получения фазового элемента можно использовать различные методы кодирования амплитуды [16].

2. Экспериментальное исследование оптического захвата с использованием пространственного модулятора света

Для формирования заданных конфигураций световых ловушек мы использовали пространственный модулятор света PLUTO VIS (рис. 1). Выходной пучок твердотельного лазера ($\lambda = 532$ нм, максимальная выходная мощность 1500 мВт) расширялся с помощью системы, состоящей из микрообъектива MO_1 ($8\times$, $NA = 0,2$) и линзы L_1 ($f_1 = 250$ мм), чтобы полностью покрывать дисплей модулятора. Лазерный пучок, отражённый от модулятора и получивший фазовую модуляцию, с помощью системы линз L_2 ($f_2 = 350$ мм) и L_3 ($f_3 = 150$ мм) направляется во входной зрачок микрообъектива MO_2 ($16\times$, $NA = 0,3$), который фокусирует его в области внутри кюветы C и формирует требуемую конфигурацию световых ловушек. Наблюдение захваченных в ловушки частиц возможно благодаря рассеянному на них свету. Для наблюдения «сбоку» была использована комбинация видеокамеры Cam (TOUPCAM UNCCD00800KPA, разрешение 1024×768 пикселей) и микрообъектива MO_3 ($8\times$, $NA=0,2$).

В экспериментах мы использовали агрегации частиц углерода, поперечные размеры которых находились в области единиц и десятков микрометров. Данные частицы имеют ярко выраженную несферическую форму и поэтому идеально подходят для экспериментов такого рода.

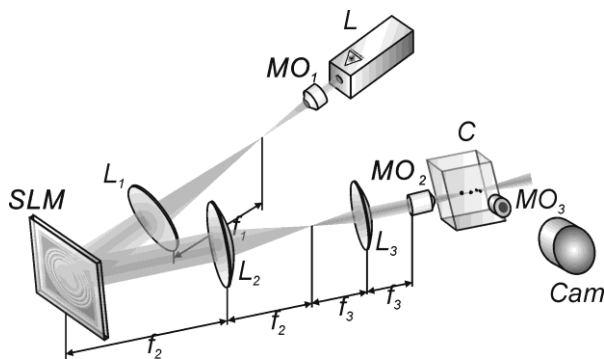


Рис.1. Оптическая схема эксперимента: L - твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм), MO_1 -микрообъектив ($8\times$, $NA = 0.2$), MO_2 - микрообъектив ($8\times$, $NA = 0.2$), L_1 , L_2 , и L_3 - линзы с фокусными расстояниями $f_1 = 250$ мм, $f_2 = 350$ мм, и $f_3 = 150$ мм, MO_3 - микрообъектив ($8\times$, $NA = 0.2$), SLM пространственный модулятор света (PLUTO VIS), Cam видеокамера (TOUPCAM UNCCD00800KPA, разрешение 1024×768 пикселей)

На рис. 2 показаны результаты экспериментов по динамическому контролю положения каждой из захваченных частиц с помощью пространственного модулятора света. Меняя выводимую на дисплей модулятора фазу, рассчитываемую согласно (1), мы можем изменять положение сформированных пиков интенсивности независимо друг от друга. Так, в данных экспериментах мы перемещаем одну из трёх сформированных ловушек вдоль оси z. При этом частицы, захваченные в области вблизи каждой из ловушек,

перемещаются вслед за ними. Таким образом, модулятор света может быть использован для динамического контроля положения захваченных в воздухе светопоглощающих микрообъектов, как и в случае с манипулирование диэлектрическими микрообъектами в жидкости [10]. Разница заключается только в механизмах захвата: если в случае с диэлектрическими частицами в жидкости на первый план выходят градиентные силы и силы светового давления, то в случае с светопоглощающими частицами в воздухе ключевую роль играют фотофоретические силы.

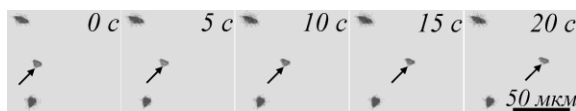


Рис.2. Эксперимент по перемещению частиц, захваченных в различных ловушках, независимо друг от друга. Чёрной стрелочкой отмечена перемещаемая частица

На рис. 3 представлены стадии движения частицы которая последовательно перемещается из одной сформированной ловушки в другую, и затем в третью. Для этого мы последовательно подвели к той световой ловушке, в которой удерживается частицы (ловушка №1), новую сформированную ловушку (ловушка №2), после чего «отключали» ловушку №1, что приводило к захвату частицы ловушкой №2. После этого мы перемещали частицу с помощью ловушки №2. Аналогичные операции были выполнены при передаче частицы из ловушки №2 в ловушку №3.

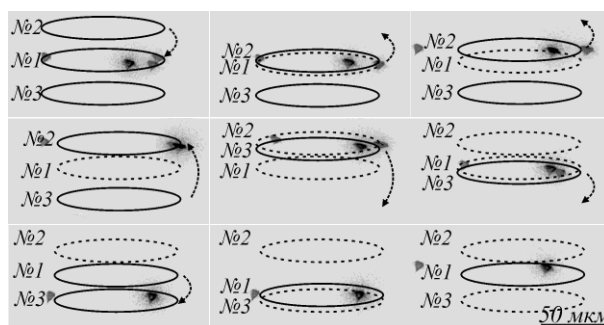


Рис.3. Эксперимент по последовательной передаче захваченной частицы из одной ловушки в другую. Пунктирные контуры обозначают «выключенные ловушки», сплошные контуры – «включённые ловушки», пунктирная стрелочка обозначает направление движения соответствующей ловушки

3. Заключение

В работе продемонстрирована возможность осуществления динамического контроля положения захваченных в воздухе светопоглощающих частиц с помощью пространственного модулятора света. Использование модулятора света дало возможность осуществления независимого контроля положения отдельных сформированных ловушек, что повышает гибкость процесса манипулирования. Кроме того продемонстрирована возможность осуществления передачи захваченных частиц из одних ловушек в другие путём «отключения» одной из ловушек.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №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. Weber, R.W. Pollen identification / R.W. Weber // *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*. – 1998. – Vol. 80. – P. 141–147.
4. Tripathi, A. Bioaerosol analysis with Raman chemical imaging microspectroscopy / A. Tripathi A., R.E. Jabbour // *Analytical Chemistry*. – 2009. – Vol. 81. – P. 6981–6990.
5. 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.
6. 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. Santaripa // *Applied Physics Letters*. – 2014. – Vol. 104(11). – P. 113507.
7. Zhang, 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. Shvedov, V.G. 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.
9. Порфирьев, А.П. Манипулирование светопоглощающими частицами в воздухе с помощью массивов световых «бутылок» / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38. – № 4. – С. 722-726.
10. Grier, D. G. A revolution in optical manipulation / D.G. Grier // *Nature*. – 2003. – V. 424(6950). – P. 810-816.
11. Казанский, Н.Л. Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76.
12. Скиданов, Р.В. Гиперспектрометр на основе дифракционной решетки с переменной высотой штрихов / Р.В. Скиданов, А.А. Морозов // *Вестник РФФИ*. – 2015. – Т. 4(88). – С. 89-95.
13. Скиданов, Р.В. Изображающий спектрометр на основе дискретного интерференционного фильтра / Р.В. Скиданов, А.А. Морозов, А.П. Порфирьев, В.А. Бланк // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 716-720.
14. Ehrenhaft, F. Die Photophorese / F. Ehrenhaft // *Annals of Physics*. – 1918. – Vol. 56. – P. 81-132.
15. Porfirev, A.P. Optical trapping and manipulation of light-absorbing particles by means of a Hermite–Gaussian laser beam / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // *Journal of Optical Technology*. – 2015. – Vol. 82(9). – P. 587-591.
16. Khonina, S.N. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Päivänranta, J. Turunen // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2009. – Vol. 11(6). – P. 065702.