

ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ МИКРОЧАСТИЦ В СПЕЦИАЛЬНЫХ ЛОВУШКАХ

Порфирьев А.П., Скиданов Р.В.

Институт систем обработки изображений РАН

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

Аннотация

Показано, что с помощью полых кольцевых световых пучков (световых «бутылок») можно захватывать прозрачные микрообъекты сферической формы, согласованные по радиусу с радиусом пучка. Описана серия экспериментов по захвату прозрачных микрообъектов в массивах световых «бутылок». Введён критерий сравнения для эффективности оптического захвата. Представлены результаты эксперимента по захвату непрозрачных сферических микрочастиц в двойной световой «бутылке».

Ключевые слова: световая «бутылка», пучки Бесселя, бинарные дифракционные оптические элементы, прозрачные микрочастицы, непрозрачные микрочастицы.

Введение

Для оптического захвата непрозрачных микрообъектов необходимо формировать специальные световые пучки, которые содержат область нулевой интенсивности, окружённую со всех сторон световым полем. Такие пучки в западных статьях называют «light bottle» – в дословном переводе световая «бутылка» [1]. Эти ловушки позволяют удерживать непрозрачные микрообъекты как в жидкой среде [2, 3], так и в воздухе [4, 5]. Широкое распространение такие ловушки получили в задачах оптического захвата атомов и молекул [6–8]. Ввиду того, что микромеханические компоненты чаще изготавливают из непрозрачных материалов, такой тип ловушек необходим для конструирования из отдельных микрокомпонентов микроструктур и микросистем. Более того, формирование набора ловушек с определённым положением в пространстве может существенно ускорить процедуру сбора микромеханических систем.

В [9] была описана методика формирования группы световых «бутылок» для захвата непрозрачных микрообъектов. В настоящей работе описывается эксперимент по захвату микрообъектов в световых пучках, сформированных с помощью ДОЭ, которые были рассчитаны по описанной в [9] методике. Показано, что сформированные световые пучки пригодны, в том числе для захвата прозрачных микрообъектов.

1. Возможность захвата прозрачных микрообъектов в световых «бутылках»

Сформированные световые «бутылки» предназначены для захвата непрозрачных микрочастиц, но, как показывает расчёт по методу, предложенному в [10], вполне могут удерживать и прозрачный микрообъект. Попробуем оценить это аналитически. Для простоты рассмотрим одномерный случай с вертикальным падением пучка на сферический микрообъект.

Суммарный импульс светового пучка

$$\vec{P} = \frac{E}{c} \vec{A}, \tag{1}$$

где E – энергия в световом пучке, c – скорость света, \vec{A} – единичный вектор, задающий направление распространения света.

Если нужно рассчитать силу, то энергия делится на время действия t :

$$F = \frac{E}{tc} (1+k) = \frac{W}{c} [1+\chi], \tag{2}$$

где W – суммарная мощность светового пучка, падавшего на поверхность.

Исходя из (1), давление света при перпендикулярном падении на материальный объект описывается простой формулой

$$p = \frac{I}{c} (1+\chi), \tag{3}$$

где I – интенсивность, χ – коэффициент отражения поверхности.

В случае, если световой пучок попадает на преломляющий объект сложной формы, расчёт сил несколько усложняется (рис. 1)

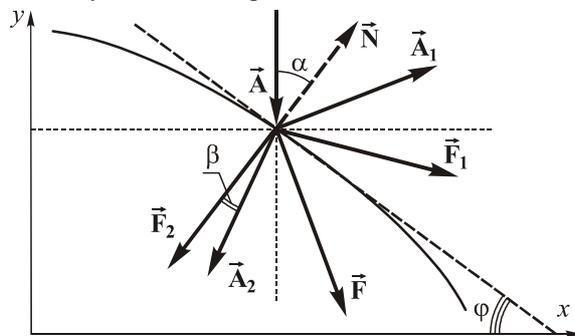


Рис. 1. Преломление луча на поверхности с учётом френелевского отражения

Предположим для простоты без потери общности, что изначально на преломляющую поверхность падает вертикально одиночный луч света с мощностью P . В результате образуются два луча: отражённый с мощностью P_1 и преломлённый с мощностью P_2 . Отражённый луч является причиной возникновения силы светового давления, которая может быть определена по формуле

$$\vec{F}_p = -2\chi \frac{W}{c} \cos \alpha \vec{N}, \tag{4}$$

где угол α – угол падения, W – мощность падающего пучка, \vec{N} – вектор нормали к поверхности в точке па-

дения луча, $\chi = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}$ – коэффициент отражения

Френеля для случая s-поляризации света. S-поляризация выбрана не случайно: все эффекты захвата, которые будут описаны ниже, наиболее ярко проявляются именно в случае s-поляризации, хотя для p-поляризации они также присутствуют. Формула (4) получается из (1) по закону сохранения импульса.

Преломлённый луч даёт градиентную силу (по закону сохранения импульса)

$$\vec{F}_g = 2(1 - \chi) \frac{W}{c} \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \frac{\vec{A}_1 - \vec{A}_2}{|\vec{A}_1 - \vec{A}_2|}, \quad (5)$$

где \vec{A}_1 – единичный вектор, задающий направление распространения отражённого пучка, \vec{A}_2 – единичный вектор, задающий направление распространения преломлённого пучка, β – угол преломления.

Суммарная сила \vec{F} получается векторным сложением силы светового давления \vec{F}_p и градиентной силы \vec{F}_g

$$\vec{F} = \vec{F}_p + \vec{F}_g. \quad (6)$$

Как видно из рис. 1, проекции сил \vec{F}_p и \vec{F}_g на ось x направлены в разные стороны. Это означает, что проекция суммарной силы \vec{F} может быть направлена как в ту, так и в другую сторону. При небольших значениях ϕ – угла касательной к поверхности в точке падения к оси x, проекция \vec{F}_p на ось x меньше, чем проекция \vec{F}_g на ось x, и проекция суммарной силы на ось x положительная. Но с ростом ϕ коэффициент отражения растёт, и, начиная с некоторого угла, знак проекции силы \vec{F} на ось x меняется, т.е. преобладает сила давления света, выталкивающая частицу из пучка. Следовательно, пучки типа световая «бутылка» можно использовать для захвата прозрачных микрочастиц. При правильно подобранном радиусе пучка сферическая прозрачная микрочастица будет захвачена в центре световой «бутылки».

Рассмотрим аналитически случай сферической микрочастицы.

$$F_{gx} = 2(1 - k) \frac{P}{c} \sin \frac{\phi - \beta}{2} \cdot \frac{\sin(\phi - \beta)}{\sqrt{\sin^2(\phi - \beta) + (-1 + \cos(\phi - \beta))^2}} = 2(1 - k) \frac{P}{c} \sin \frac{\phi - \beta}{2} \frac{\sin(\phi - \beta)}{\sqrt{2(1 - \cos(\phi - \beta))}} =$$

$$= 2(1 - k) \frac{P}{c} \sin \frac{\phi - \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi\right)}{2} \frac{\sin\left(\phi - \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi\right)\right)}{\sqrt{2\left(1 - \cos\left(\phi - \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi\right)\right)\right)}} \quad (10)$$

Окончательно, подставляя значение френелевского коэффициента отражения, получим формулу для проекции градиентной силы на ось x

Как видно из рис. 2., угол падения α совпадает с углом между вертикалью и направлением на точку входа луча в микрочастицу. Это угол ϕ , в данном случае совпадающий с углом ϕ на рис. 1. Таким образом, формула (4) преобразуется к виду.

$$\vec{F}_p = 2\chi \frac{W}{c} \cos \phi (-\vec{N}), \quad (7)$$

где $\vec{N} = (\sin \phi, \cos \phi)$.

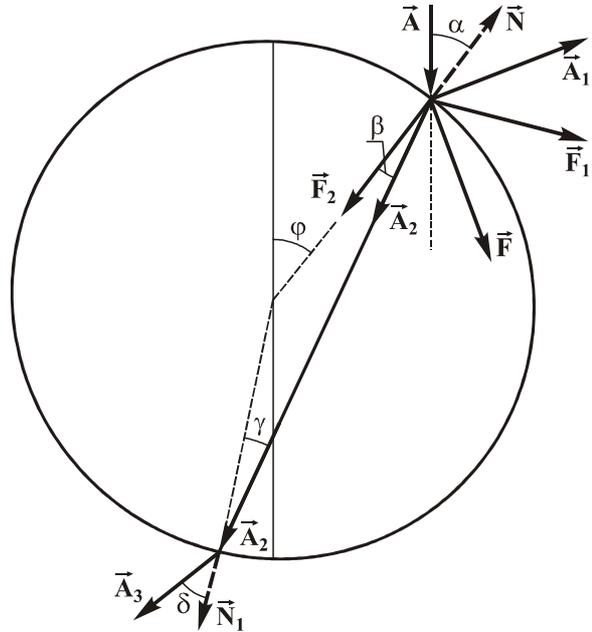


Рис. 2. Преломление луча света на сферической микрочастице

Для простоты рассмотрим только проекцию силы на ось x

$$F_{px} = -2\chi \frac{W}{c} \cos \phi \sin \phi = -\chi \frac{W}{c} \sin 2\phi. \quad (8)$$

Для силы \vec{F}_g проекцию на ось x можно записать исходя из векторов $\vec{A} = (0, -1)$, $\vec{A}_2 = (-\sin(\phi - \beta), -\cos(\phi - \beta))$ и соотношения

$$n_1 \sin \phi = n_2 \sin \beta, \quad (9)$$

где n_1 – показатель преломления среды, n_2 – показатель преломления микрочастицы.

После подстановки получаем

$$F_{gx} = 2 \left\{ 1 - \frac{\sin^2 \left[\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right]}{\sin^2 \left[\phi + \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right]} \right\} \frac{P}{c} \sin \frac{\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right)}{2} \cdot \frac{\sin \left(\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right)}{\sqrt{2 \left(1 - \cos \left(\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right) \right)}}. \quad (11)$$

Однако представленная в (11) формула рассчитывает градиентную силу только с учётом одного преломления, в то время как преломление будет осуществлено ещё на одной поверхности (рис. 2).

Конечно, кроме второго преломления, присутствует ещё и отражение на второй границе микрочастицы, но ввиду специфической геометрии задачи угол падения и отражения будет очень близок к вертикали и учёт второго отражения при высокой сложно-

сти почти ничего не добавляет в баланс сил. С учётом двух преломлений формула (5) преобразуется к виду

$$\vec{F}_g = 2(1-k) \frac{P}{c} \sin \frac{\alpha - \delta}{2} \cdot \frac{\vec{A} - \vec{A}_3}{|\vec{A} - \vec{A}_3|}. \quad (12)$$

После преобразований получаем окончательную формулу для градиентной силы

$$F_{1x} = 2 \left\{ 1 - \frac{\sin^2 \left[\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right]}{\sin^2 \left[\phi + \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right]} \right\} \frac{P}{c} \sin \frac{\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right)}{2} \cdot \frac{\sin \left[2 \left(\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right) \right]}{\sqrt{2 \left(1 - \cos \left[2 \left(\phi - \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \phi \right) \right) \right] \right)}}. \quad (13)$$

Для расчёта рассмотрим следующие параметры: $n_1 = 1,33$, $n_2 = 1,56$. Это показатели преломления воды и полистирола, соответственно. Просуммируем проекции сил \vec{F}_g и \vec{F}_p на ось x , нормируем сумму на максимальное значение и построим для неё график (рис. 3, сплошная линия).

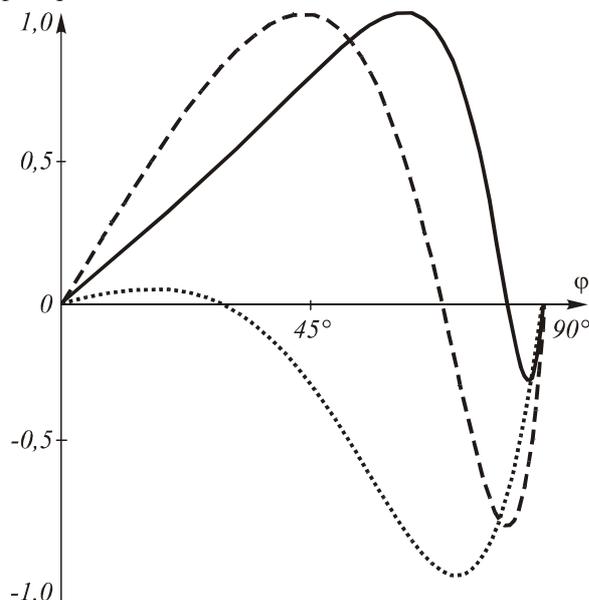


Рис. 3. График проекции суммарной силы, действующей на сферическую микрочастицу, в зависимости от значения центрального угла ϕ точки входа пучка: сплошная линия – для показателей преломления $n_1 = 1,33$, $n_2 = 1,56$, точечная линия – для показателей преломления $n_1 = 1$, $n_2 = 1,56$, штриховая линия – для показателей преломления $n_1 = 1,0$, $n_2 = 2,4$

Как видно из рис. 3., значение проекции силы меняет знак, если центральный угол ϕ равен примерно 83° , и достигает максимума, если угол ϕ равен примерно 87° . Это означает, что при диаметре

кольцевого светового пучка немного меньше диаметра сферической микрочастицы он будет удерживать прозрачную микрочастицу в своём геометрическом центре. Т.е. при правильно подобранном размере пучка получается универсальная ловушка для любых микрообъектов заданного размера. Радиус пучка по максимуму интенсивности будет связан с углом ϕ по формуле

$$R = r \sin \phi, \quad (14)$$

где r – радиус микрочастицы, R – радиус пучка по максимуму интенсивности. При указанных выше параметрах угол максимальной силы захвата $\phi = 87^\circ$ и радиусе микрочастицы $2,5 \text{ мкм}$, радиус пучка должен быть $2,49 \text{ мкм}$, т.е. радиусы пучка и микрочастицы практически совпадают. Максимальное значение удерживающей силы при этом примерно в 4 раза меньше, чем значение градиентной удерживающей силы (рис. 3, сплошная линия).

Следует заметить, что с увеличением разности показателей преломления значение этой силы растёт, а значение угла ϕ , при котором сила меняет знак, наоборот уменьшается. Так, при расположении полистироловой микрочастицы в воздухе $n_1 = 1,0$, $n_2 = 1,56$ максимальное значение только в 1,5 раза меньше максимального значения градиентной силы (рис. 3, точечная линия). А если взять, например, алмазную микрочастицу в воздухе $n_1 = 1,0$, $n_2 = 2,4$, то сила захвата давлением света будет превосходить градиентную силу почти в 10 раз (рис. 3, штриховая линия). Каждая сила на рис. 3. нормирована на своё максимальное значение.

2. Захват прозрачных микрообъектов в системе световых «бутылок»

Для экспериментальной проверки проведённых расчётов был осуществлен ряд экспериментов по оптическому захвату прозрачных полистироловых

микрошаров диаметром 5 мкм. Для проведения экспериментов была использована установка, оптическая схема которой представлена на рис. 4.

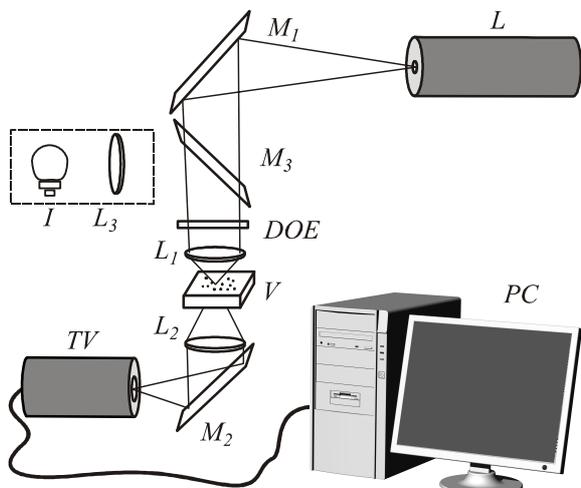


Рис. 4. Оптическая схема эксперимента по захвату полистироловых микрообъектов в пучке твердотельного лазера

В оптической схеме введены обозначения: L – твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и максимальной средней мощностью 2000 мВт; M₁, M₂, M₃ – поворотные зеркала; I – лампа осветителя; L₁ – фокусирующий микрообъектив (8×); L₂ – изображающий микрообъектив (20×); DOE – дифракционный оптический элемент; CCD – видеокамера; V – кювета с микрообъектами. В эксперименте была использована CCD камера MSDE с разрешением 1280×1024.

В экспериментах были использованы фазовые ДОЭ, рассчитанные и изготовленные по методу, описанному в [9], которые позволяют формировать от 1 до 6 световых «бутылок» одновременно.

На рис. 5 представлены распределения интенсивности в одиночной световой «бутылке» (а), двойной световой «бутылке» (б), тройной световой «бутылке» (в) и шестикратной световой «бутылке» (г).

Каждая из ловушек, представленных на рис. 6, была использована в экспериментах по оптическому захвату и перемещению прозрачных микрообъектов. Исходя из полученного ранее условия при расчёте по формуле (12) фокусное расстояние микрообъектива для фокусировки этих ловушек было подобрано так, чтобы диаметр (по максимуму интенсивности) кольцевых областей в световых «бутылках» был немного меньше 5 мкм. Для оценки силы захвата микрообъекта будем пользоваться законом Стокса

$$F = 6\pi r \eta v, \tag{15}$$

где F – сила вязкого трения, равная силе оптического захвата, r – радиус микрочастицы, η – вязкость жидкости, v – скорость перемещения. Вязкость воды будем считать равной 0,9 мПа·с. Для сравнения эффективности оптического захвата будем использовать величину отношения силы оптического захвата к мощности светового пучка в плоскости захвата микрочастицы.

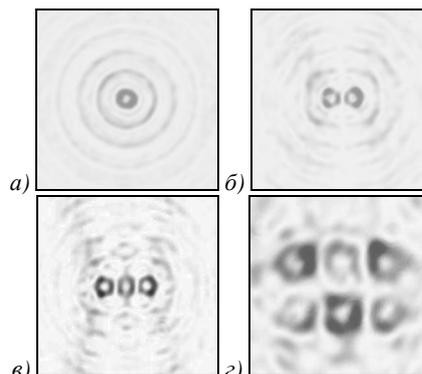


Рис. 5. Распределение интенсивности (негативные изображения) в рабочей области «бутылки» (а), двойной световой «бутылки» (б), тройной световой «бутылки» (в), шестикратной световой «бутылки» (г)

$$\sigma = \frac{FN}{W\epsilon}. \tag{16}$$

где F – сила захвата, W – мощность светового пучка, падающего на ДОЭ, N – количество ловушек в пучке, ε – дифракционная эффективность ДОЭ, формирующего пучок. Будем считать, что при наличии группы световых «бутылок» мощность равномерно делится между ними. На рис. 6 представлены стадии движения полистиролового микрошара в одиночной световой «бутылке» с интервалом времени 5 с.

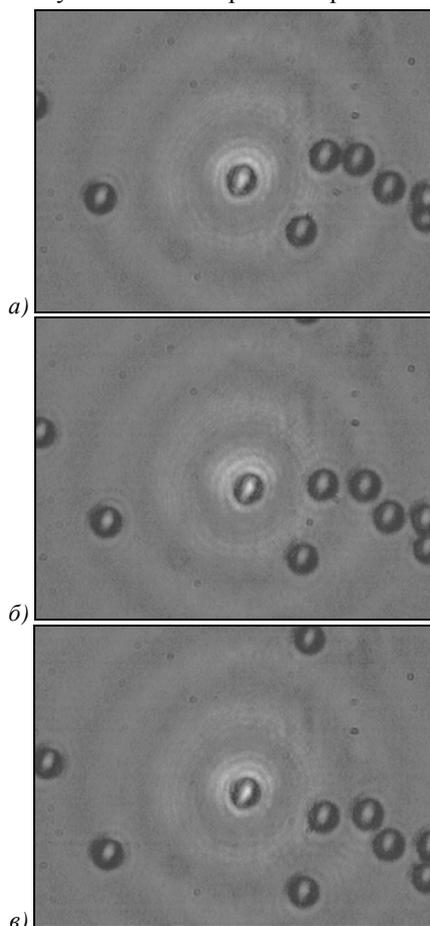


Рис. 6. Стадии движения полистиролового микрошара, захваченного в одиночной световой «бутылке»

Средняя скорость перемещения микрочастицы составила 0,6 мкм/с. Визуально на рис. 6 размер пучка кажется несколько большим, чем размер полистироловой частицы. На самом деле это не так. Световое кольцо, видимое вокруг микрочастицы, – это краевая область кольцевой ловушки, которая видна из-за ненулевой толщины светового кольца. Далее последовательно проводились эксперименты с оптическим захватом всё большего количества полистироловых микрочастиц. На рис. 7 представлены стадии движения двух полистироловых микрошаров, захваченных в двойной световой «бутылке».

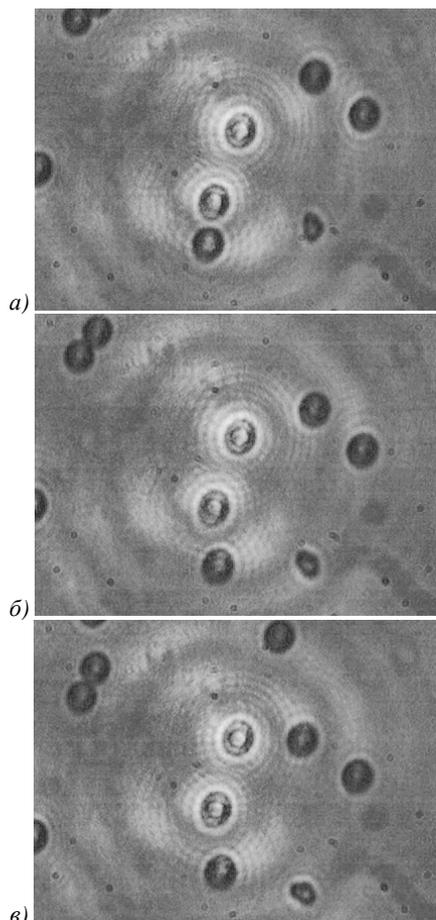


Рис. 7. Стадии движения двух полистироловых микрошаров, захваченных в двойной световой «бутылке»

Средняя скорость перемещения – 1 мкм/с. На рис. 8 представлены стадии движения трёх полистироловых микрошаров в тройной световой «бутылке» с интервалом между изображениями 10 с.

Скорость перемещения составила 0,7 мкм/с.

К сожалению, провести эксперимент, в котором перемещалось бы сразу 6 микрообъектов, не удалось: постоянно часть микрочастиц выпадала из ловушек, т.к. из-за разделения энергии между 6 ловушками абсолютное значение силы захвата оказалось особенно малым для прозрачных микрообъектов.

Поэтому приводятся изображения с захватом только трёх полистироловых микрошаров. Стадии движения через 8 с приведены на рис. 9.

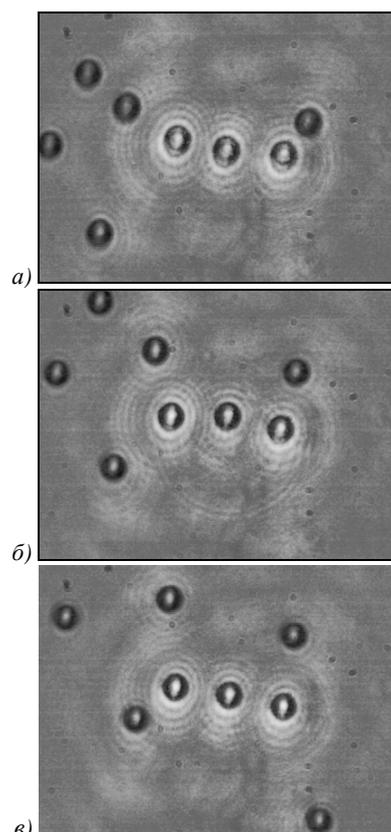


Рис. 8. Стадии движения трёх полистироловых микрошаров, захваченных в тройной световой «бутылке»

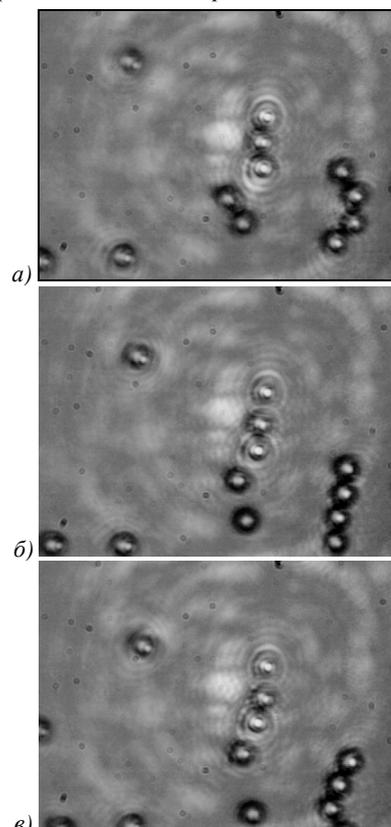


Рис. 9. Стадии движения трёх полистироловых микрошаров, захваченных в шестикратной световой «бутылке»

Средняя скорость движения составила 0,5 мкм/с. Расчёт по формуле (15) позволил вычислить значение сил, действующих на микрочастицы, а также значение параметра σ (табл. 1).

Таблица 1. Основные параметры ловушек и движения захваченных микрочастиц

N	V (мкм/с)	F (пкН)	ϵ	W (Вт)	σ (пкН/Вт)
1	0,6±0,04	25±2	59	1,4	31±2
2	1,0±0,04	42±2	50	1,9	90±5
3	0,7±0,04	30±2	54	1,9	87±5
6	0,5±0,04	21±2	43	1,9	157±8

Как видно из результатов экспериментов, световые «бутылки» вполне позволяют захватывать и перемещать прозрачные микрообъекты. Более того, с увеличением количества ловушек эффективность самого захвата возрастает. Но основное предназначение таких пучков – это захват и перемещение непрозрачных микрообъектов.

3. Оптический захват и перемещение металлических микрочастиц почти сферической формы

К сожалению, промышленно выпускаемые порошки металлов содержат микрочастицы чрезвычайно неправильной формы. Оптический захват таких микрочастиц, как правило, сопряжён с трудностями чисто технического характера. Для проведения экспериментов по захвату непрозрачных микрочастиц в системе световых «бутылок» желательно иметь непрозрачные микрочастицы с формой, близкой к сферической. Такие микрочастицы были получены путём создания электрической дуги между двумя оловянными электродами вблизи поверхности воды. Микрочастицы расплавленного металла при падении приобретали почти сферическую форму и застывали так при попадании в воду. Таким образом, удалось получить в воде взвесь шарообразных микрочастиц с размерами от 1 до 20 мкм. Для оптического захвата и перемещения оловянных микрочастиц была использована оптическая схема, представленная на рис. 4. Для фокусировки пучка с целью получения световой «бутылки» нужного размера был использован микрообъектив с увеличением 20x. Мощность пучка составила около 1 Вт. На рис. 10 представлены стадии перемещения с интервалом 4 с. одной микрочастицы из олова, диаметром около 3 мкм в двойной световой «бутылке». При этом микрочастица поочередно захватывалась и перемещалась в каждой из двух областей низкой интенсивности, что доказывает работоспособность обеих ловушек в пучке. К сожалению, описанный выше способ получения металлических микрочастиц дает относительно небольшую их концентрацию во взвеси и большой разброс по параметрам, поэтому захватить две примерно одинаковые по размерам микрочастицы практически невозможно.

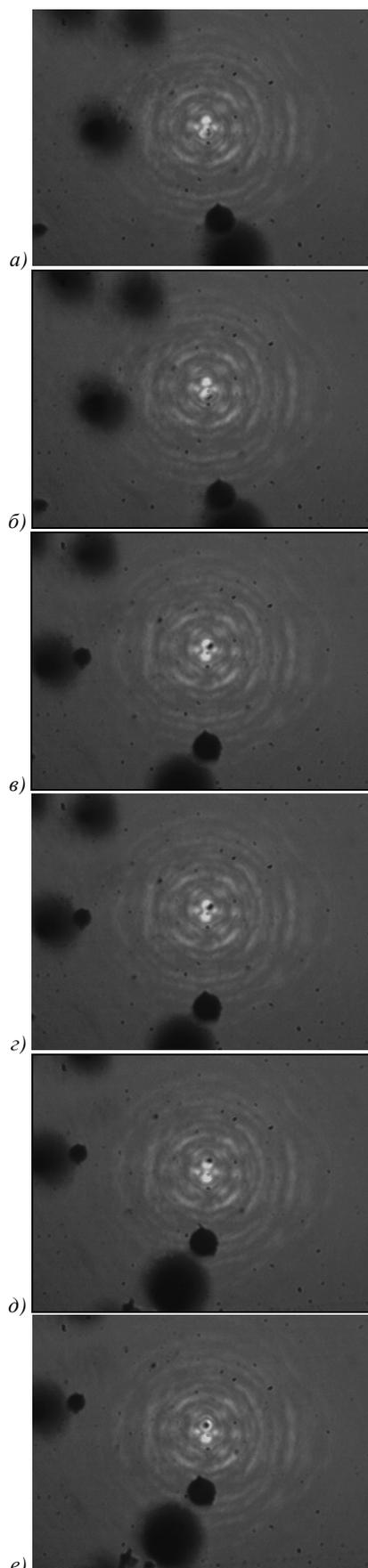


Рис. 10. Стадии перемещения оловянной микрочастицы диаметром 3 мкм в двойной световой «бутылке»

Средняя скорость перемещения составила 1,5 мкм/с., считая, что частица имеет форму, близкую к сферической, и используя формулу (15), получаем значение силы захвата 38 пкН ($\sigma = 138$ пкН/Вт). Значение параметра эффективности захвата σ почти вдвое превышает аналогичное значение при захвате прозрачной микрочастицы. Так что получился ожидаемый результат. Сила захвата непрозрачной (предположительно отражающей микрочастицы) оказалась существенно выше, чем сила захвата этой же ловушкой прозрачной микрочастицы.

Заключение

Полюе световые пучки представляют собой универсальные световые ловушки, которые позволяют захватывать как прозрачные, так и непрозрачные микрообъекты. Эффективность захвата прозрачных микрообъектов в таких световых ловушках меньше чем в гауссовом пучке, но в них свет практически не проходит внутрь микрообъекта, что очень важно, например, при захвате биологических микрообъектов.

Результаты экспериментов, приведённые в статье, показывают также возможность одновременного захвата и перемещения группы микрообъектов в системе световых «бутылок», как некоторой жёсткой конфигурации, что актуально в задачах сборки микромеханических систем.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № НШ-4128.2012.9, грантов РФФИ №№ 10-07-00109, 10-07-00553, а также Государственных контрактов № 02.740.11.0805, 07.514.11.4055, 07.514.11.4060 и № 14.740.11.0016.

Литература

1. **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. – N 4. – P. 191-193.
2. **Ahluwalia, B.P.S.** Micromanipulation of high and low indices microparticles using a microfabricated double axicon / B.P.S. Ahluwalia, X.-C. Yuan, S.H. Tao, W.C. Cheong, L.S. Zhang and H. Wang // J. Appl. Phys. – 2006. – V. 99. – P. 113104.
3. **Daria, V.C.** Dynamic array of dark optical traps / Vincent Ricardo Daria, Peter John Rodrigo and Jesper Gluckstad // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 84. – N 3. – P. 323-325.
4. **Zhang, P.** Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by Moire techniques / Zhang Peng, Ze Zhang, Jai Prakash, Simon Huang, Daniel Hernandez, Matthew Salazar, Demetrios N. Christodoulides and Zhigang Chen // Optics Letters. – 2011. – V. 36. – N 8. – P. 1491-1493.
5. **Shvedov, V.G.** Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, W.Z. Krolikowski, Y.S. Kivshar // Appl. Phys. A. – 2010. – V. 100(2). – P. 327-331.
6. **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. – V. 11(5). – P. 288-290.

7. **Isenhowe, L.** Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap / L. Isenhowe, W. Williams, A. Dally and M. Saffman // OPTICS LETTERS. – 2009. – V. 34. – N 8. – P. 1159-1161.
8. **Ozeri, R.** Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap / R. Ozeri, L. Khaykovich and N. Davidson // Phys. Rev. A. – 1999. – V. 59(3). – P. R1750-R1753.
9. **Порфирьев, А.П.** Формирование массива световых «бутылок», основанное на использовании суперпозиции пучков Бесселя / А.П. Порфирьев, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2012. – Вып. 36, № 1. – С. 80-90.
10. **Скиданов, Р.В.** Расчёт силы взаимодействия светового пучка с микрочастицами произвольной формы / Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2005. – Т. 28. С. 18-21.

References

1. **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. – N 4. – P. 191-193.
2. **Ahluwalia, B.P.S.** Micromanipulation of high and low indices microparticles using a microfabricated double axicon / B.P.S. Ahluwalia, X.-C. Yuan, S.H. Tao, W.C. Cheong, L.S. Zhang and H. Wang // J. Appl. Phys. – 2006. – V. 99. – P. 113104.
3. **Daria, V.C.** Dynamic array of dark optical traps / Vincent Ricardo Daria, Peter John Rodrigo and Jesper Gluckstad // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 84. – N 3. – P. 323-325.
4. **Zhang, P.** Trapping and transporting aerosols with a single optical bottle beam generated by Moire techniques / Zhang Peng, Ze Zhang, Jai Prakash, Simon Huang, Daniel Hernandez, Matthew Salazar, Demetrios N. Christodoulides and Zhigang Chen // Optics Letters. – 2011. – V. 36. – N 8. – P. 1491-1493.
5. **Shvedov, V.G.** Optical vortex beams for trapping and transport of particles in air / V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, W.Z. Krolikowski, Y.S. Kivshar // Appl. Phys. A. – 2010. – V. 100(2). – P. 327-331.
6. **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. – V. 11(5). – P. 288-290.
7. **Isenhowe, L.** Atom trapping in an interferometrically generated bottle beam trap / L. Isenhowe, W. Williams, A. Dally and M. Saffman // OPTICS LETTERS. – 2009. – V. 34. – N 8. – P. 1159-1161.
8. **Ozeri, R.** Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap / R. Ozeri, L. Khaykovich and N. Davidson // Phys. Rev. A. – 1999. – V. 59(3). – P. R1750-R1753.
9. **Porfirev, A.P.** Generation of optical bottle beams array by superposition Bessel beams / A.P. Porfirev, R.V. Skidanov // Computer optics. – 2012. – V. 36, N 1. – P. 80-90. – (In Russian).
10. **Skidanov, R.V.** Calculation of force of interaction of a light beam with microparticles of any form / R.V. Skidanov // Computer optics. – 2005. – V. 28. – P. 18-21. – (In Russian).

OPTICAL CAPTURE OF MICROPARTICLES IN SPECIAL TRAPS*A.P. Porfirev, R.V. Skidanov**Image Processing Systems Institute of the RAS,**S.P. Korolyov Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev***Abstract**

It is shown that by means of hollow ring light beams (light "bottles") it is possible to trapping transparent microobjects of the spherical form coordinated on radius with beam radius. A series of experiments on capture transparent microobjects in arrays of light "bottles" is described. The criterion of comparison for efficiency of optical capture is entered. Results of experiment on capture of non transparent spherical microparticles in double light "bottle" are presented.

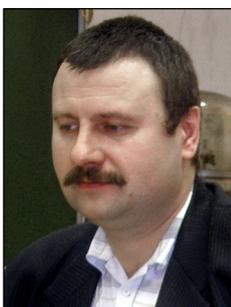
Key words: optical bottle beams, Bessel beams, superposition beams, binary diffractive optical element, experimental setup.

Сведения об авторах

Порфирьев Алексей Петрович, 1987 года рождения. Магистр прикладных математики и физики (2010), аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, стажёр-исследователь Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений. Область научных интересов – дифракционная оптика, оптическое микроманипулирование.

E-mail: lpofirev@rambler.ru.

Alexey Petrovich Porfirev (b. 1987). Master of applied mathematics and physics (2010), post-graduate student of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov probationer-researcher of the Image Processing System Institute of RAS. Research interests: diffractive optics, optical micromanipulation.



Скиданов Роман Васильевич, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает старшим научным сотрудником лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В. – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанопотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 90 статей, 4 монографии.

E-mail: romans@smr.ru.

Roman Vasilevich Skidanov (b. 1973) graduated with honours (1990) from the Samara State University (SSU), majoring in Physic. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State Aerospace University. He is the senior researcher laboratory of laser measurement at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 90 scientific papers, 4 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Поступила в редакцию 16 марта 2012 г.