

Манипуляция микрообъектами с помощью пучков с ненулевым орбитальным моментом

В.Г.Волостников, С.П.Котова, Н.Н.Лосевский, М.А.Рахматулин

Показано, что возможности манипуляции микрообъектами могут быть существенно расширены за счет использования пучков с заданными в плоскости фокусировки распределениями интенсивности и орбитального момента. Приведены результаты экспериментов по передаче момента вращения таких пучков микрочастицам.

Ключевые слова: захват в ловушку, световые пучки с ненулевым орбитальным моментом, манипуляция микрообъектами.

Широко развиваемые в последнее время методы манипуляции микрообъектами с помощью лазерных пучков представляют большой интерес для различных задач биологии, медицины, построения микромеханизмов и управления ими. Уже осуществлены захват в оптическую ловушку и вращение частиц с использованием поляризованного света [1]. Известно, что в общем случае угловой момент световых пучков состоит из двух частей: «спиновой», обусловленной циркулярной поляризацией, и орбитальной, определяемой амплитудно-фазовым распределением светового поля. Очевидно, что расширение функциональных возможностей данного инструментария является весьма заманчивым, но для этого требуются методы и средства формирования пучков с заданными распределениями интенсивности и орбитального момента.

Задача может решаться при использовании специальных амплитудно-фазовых масок, располагаемых как вне, так и внутри резонатора лазера. Перспективным представляется формирование пучков с заданными пространственными характеристиками на основе методики создания спиральных пучков [2–5]. Эти пучки могут иметь весьма разнообразную структуру распределения интенсивности, которую они сохраняют при распространении и фокусировке. Вихревой характер распространения световой энергии в пучках обусловлен наличием у них ненулевого орбитального момента количества движения. Простейшими типами спиральных пучков являются моды Лагерра–Гаусса. В работах [6–8] было продемонстрировано вращение поглощающих частиц с помощью таких пучков.

В данной работе представлены эксперименты по захвату и вращению микроскопических частиц пучком с ненулевым орбитальным моментом, формируемым посредством дифракционного оптического элемента (ДОЭ) в виде вихревого аксикона, фокусирующего лазерное излучение в кольцо.

Схема экспериментальной установки по манипуляции микрообъектами с помощью пучков с ненулевым орбитальным моментом представлена на рис.1. В эксперименте мы использовали аргоновый лазер 1. Пучок с ненулевым орбитальным моментом формировался посредством так называемого вихревого аксикона, фокусирующего лазерное излучение в кольцо радиусом r_0 на расстоянии f_0 [5]. Фазовая характеристика такого элемента в полярных координатах r и θ имеет вид

$$\varphi_0(r) = -\frac{kr^2}{2f_0} + \frac{krr_0}{f_0} + m\theta,$$

где k – волновое число; m – целое число, отличное от нуля, которое определяет число изменений фазы на 2π при изменении θ на 2π . В нашем случае для формирования пучка был использован аксикон с $m = 2$, который обеспечивал распределения интенсивности и плотности углового момента (рис.2), аналогичные таковым для пучка Лагерра–Гаусса с удельным угловым моментом (на единицу энергии пучка) $m/\omega = 2/\omega$ (ω – круговая частота излучения).

Для формирования оптической ловушки лазерный пучок при помощи диэлектрического зеркала 10 направ-

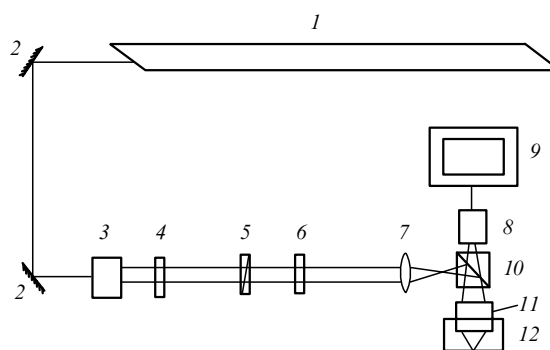


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – аргоновый лазер; 2 – зеркала; 3 – расширитель пучка; 4 – дифракционный оптический элемент; 5 – поляризатор; 6 – четвертьволновая пластинка; 7 – вспомогательная линза; 8 – видеокамера; 9 – монитор; 10 – диэлектрическое зеркало; 11 – микрообъектив; 12 – кювета с частицами.

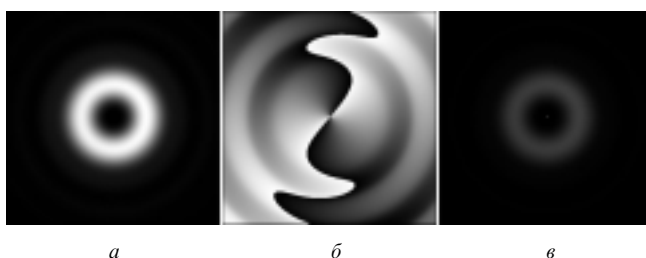


Рис.2. Пространственные распределения интенсивности (а), фазы (б) и плотности углового момента (в) в поперечном сечении пучка, сформированного с помощью вихревого аксикона. Изменение фазы от нуля до 2π соответствует изменению цвета от черного до белого.

лялся в поляризационный микроскоп МИН-8 с иммерсионным микрообъективом 11 (90° , $NA = 1.25$). Совмещение плоскости изображения и фокальной плоскости микрообъектива осуществлялось с помощью собирающей линзы 7 с фокусным расстоянием 0.1 м. Данная система позволяла формировать лазерный пучок с перетяжкой диаметром около 1.5 мкм. Максимальная мощность сфокусированного излучения, падающего на частицу, составляла 50 мВт. В качестве поглощающих частиц мы использовали частицы цетилпиридинийбромида, взвешенные в воде. Взвесь из таких частиц помещалась в кювету 12. Частота вращения частиц, захваченных в области фокуса лазерного пучка, измерялась для различных направлений поляризации и мощности падающего пучка.

Для линейно поляризованного пучка при отсутствии ДОЭ (т.е. для гауссова пучка) вращения частицы не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии эффекта вращения из-за несимметричности частицы. Введение же ДОЭ приводило к вращению частиц. Поворот ДОЭ на 180° в горизонтальной плоскости меняет знак орбитального момента пучка, и частицы вращаются в противоположном направлении. Так, частица размером 1.5×3 мкм вращалась против часовой стрелки с частотой 0.28 Гц, а при повороте маски направление вращения менялось и частота составляла 0.26 Гц. Это дополнительно свидетельствует о том, что вращение частиц обусловлено поглощением орбитального момента пучка.

Проводились также эксперименты по вращению частиц, когда поляризация пучка отличалась от линейной. Как уже отмечалось, циркулярно поляризованный пучок излучения обладает моментом вращения (так называемым спиновым моментом), и при его поглощении этот момент передается веществу. При сложении поляризационного и орбитального моментов пучка частица размером 2.5×4 мкм совершала оборот за 5 с, а при вычитании – за 15 с. Эти результаты соответствуют параметрам используемого оптического элемента с $m = 2$. На рис.3 представлены фотографии вращающейся частицы. Данная частица совершила полный оборот за 2 мин 46 с.

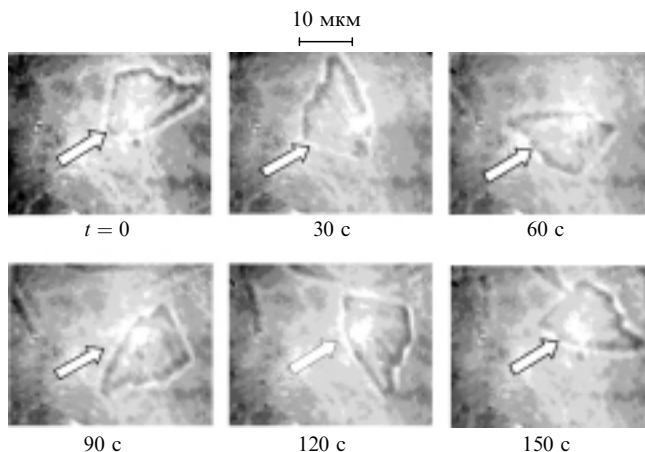


Рис.3. Вращение частицы пучком с ненулевым орбитальным моментом.

Таким образом, в работе описаны результаты экспериментов по передаче орбитального момента пучка поглощающим частицам микронных размеров. Для создания пучка с ненулевым орбитальным моментом был использован дифракционный оптический элемент в виде вихревого аксикона.

Работа выполнена при поддержке Губернского гранта № 21Г/2001 и ФЦП «Интеграция» (проект 2.1-235).

Работа выполнена при поддержке Губернского гранта № 21Г/2001 и ФЦП «Интеграция» (проект 2.1-235).

1. Friese M.E.J., Nieminen T.A., Heckenberg N.R., Rubinsztein-Dunlop H. *Opt. Lett.*, **23**, 1 (1998).
2. Abramochkin E., Volostnikov V. *Opt. Commun.*, **102**, 336 (1993).
3. Abramochkin E., Volostnikov V. *Opt. Commun.*, **74**, 144 (1989).
4. Abramochkin E., Volostnikov V. *Opt. Commun.*, **125**, 302 (1996).
5. Abramochkin E., Volostnikov V. *Computer Opt.*, **10-11**, 95 (1992).
6. Simpson N.B., Dholakia K., Allen L., Padgett M.J. *Opt. Lett.*, **22**, 1 (1997).
7. Padgett M.J., Allen L. *Phys. World*, № 9, 35 (1997).
8. Friese M.E.J., Enger J., Rubinsztein-Dunlop H., Heckenberg N.R. *Phys. Rev. A*, **54**, 2 (1996).