СВЕТОВЫЕ ПОЛЯ С НЕНУЛЕВЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО МИКРОМАНИПУЛИРОВАНИЯ

© 2007 К.Н. Афанасьев, А.В. Коробцов, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

В настоящее время все более широкое применение в науке и технике находят методы лазерной манипуляции микроскопическими объектами. Использование пучков с ненулевым угловым моментом расширяет возможности манипуляции. В работе проанализированы различные варианты реализации световых полей с ненулевым угловым моментом: спиральных пучков; световых полей, полученных при использовании только фазовой части от спирального пучка и световых полей, полученных с использованием итерационного алгоритма. Проведены вычисления величины передаваемого импульса световой волны вдоль направления перемещения микрочастицам латекса. Выполнены эксперименты по перемещению микрочастиц по сформированным траекториям: спирали Архимеда, границе квадрата.

Введение

Для расширения возможностей лазерного микроманипулирования представляют интерес световые поля с ненулевым угловым моментом. Используя вихревой характер таких полей и задавая нужное распределение интенсивности, можно перемещать частицы по заданным траекториям [1], накладывать неоднородные деформации на частицы удлиненной формы, что важно, например, для изучения механических свойств биообъектов. С нашей точки зрения наиболее перспективным для формирования таких полей является подход, основанный на оптике спиральных пучков [2]. Характерным свойством таких пучков является то, что они сохраняют форму при распространении и фокусировке с точностью до масштаба и вращения. Пространственная структура спиральных пучков может быть весьма разнообразной, например, в форме плоских кривых. Наиболее распространенный способ их формирования заключается в использовании комбинации амплитудного и фазового транспарантов. Однако, для динамического управления процессом манипулирования, например, с помощью жидкокристаллических пространственных модуляторов света, представляет интерес формирование световых полей с ненулевым угловым моментом с помощью фазовых элементов.

В данной работе рассматривается три способа формирования световых полей с ненулевым угловым моментом: спиральных пучков; световых полей, полученных при использовании только фазовой части от спирального пучка и световых полей, полученных с использованием итерационного алгоритма. Проведены вычисления величины передаваемого импульса световой волны вдоль направления перемещения микрочастицам латекса. Выполнены эксперименты по перемещению микрочастиц по сформированным траекториям: спирали Архимеда, границе квадрата.

Процедура расчета и формирования пучков с ненулевым угловым моментом

Спиральные пучки

Задача построения световых пучков в виде плоских кривых была решена в работе [3]. Эти поля являются структурно устойчивыми при распространении и фокусировке с точностью до масштаба и вращения, они были названы спиральными пучками. Кривая, для которой строится пучок, называется генерирующей.

Спиральные пучки могут быть получены при освещении плоской волной амплитудно-фазового транспаранта. Расчет амплитудно-фазового транспаранта осуществлялся на основе оптики спиральных пучков [4]. На рис. 1 изображены фазовый и амплитудный транспаранты, теоретические пространственные распределения фазы и интенсивности в Фурье-плоскости для спирального пучка в виде границы квадрата.



Рис. 1. Спиральный пучок в форме границы квадрата: амплитудный (а), фазовый (б) (черный цвет соответствует фазе 0, белый – 2π) транспаранты для формирования спирального пучка, распределения интенсивности (в) и фазы (г) в Фурье-плоскости.

Экспериментальная реализация спиральных пучков осуществлялась с помощью амплитудно-фазовых транспарантов. Для изготовления фазового транспаранта слой дихромированной желатины (ДХЖ) экспонировался однородной засветкой через полутоновой фотошаблон, находящийся в тесном контакте со слоем. Известно, что слои ДХЖ [5] плохо передают низкие пространственные частоты. С целью обеспечения максимальной линейности передачи профиля фазы к исходному фазовому распределению при расчетах добавлялся квадратичный фазовый множитель, позволяющий согласовать пространственную частоту регистрируемого распределения с передаточной функцией слоев ДХЖ. Полутоновой фотошаблон соответствующего фазового распределения и распределение интенсивности (амплитудный транспарант) изготавливались методом фотографирования, выведенного на экран 22" плоского монитора. При этом использовалась высокоразрешающая фотопленка с тщательным контролем фокусировки и увеличения.

Эксперименты показали, что если использовать только фазовую часть от спирального пучка, то формируемое распределение интенсивности существенно отличается от распределения интенсивности спирального пучка. Для манипуляций микрообъектами имеет значение скорость перемещения микрочастиц, которая обусловлена передаваемой поперечной составляющей импульса микрочастицам. Величина поперечной составляющей импульса для пучков, сформированных таким образом, меньше, чем для соответствующих спиральных пучков. На рисунке 2 приведены фазовый транспарант, распределения фазы и интенсивности для пучка в виде границы квадрата (используется фазовая часть от спирального пучка).

Пучки, сформированные только фазовыми транспарантами

Как уже было сказано выше, при использовании только фазовой составляющей для соответствующего спирального пучка требуемое распределение интенсивности возможно получить, но оно оказывается неоднородным, что отрицательно сказывается на процессе манипуляции. Для улучшения распределения интенсивности применялся итерационный алгоритм. Выбирая фазу такого спирального пучка в качестве нулевого



Рис. 2. Формирование светового поля при помощи только фазового транспаранта: Фазовый транспарант для формирования вихревого пучка в виде границы квадрата (а) (черный цвет соответствует фазе 0, белый- 2р), теоретические распределения интенсивности (б) и фазы (в) в Фурье-плоскости.

приближения, однородность распределения интенсивности можно улучшить итерационными методами. В оптических задачах обычно используют метод Герчберга-Сэкстона, позволяющий восстановить фазу комплексной функции по ее известному модулю и модулю ее Фурье-преобразования [6]. На каждом шаге алгоритма делаются прямое и обратное преобразования Фурье с предварительной заменой интенсивности во входной и выходной плоскостях на заданные.

Для улучшения однородности распределения интенсивности вдоль кривой в выходной плоскости было предложено несколько модифицировать алгоритм: в выходной плоскости достаточно только корректировать значение интенсивности вдоль кривой, делая ее более однородной на каждом шаге. При такой модификации алгоритм сходится через 5-10 итераций к фазовым элементам.

На рис. 3 приведены теоретические пространственные распределения интенсивности и фазы пучка в виде границы квадрата в Фурье-плоскости и фазовый транспарант.

Манипуляция микрообъектами пучками с ненулевым угловым моментом

На рис. 4 приведена экспериментальная установка для манипуляции микрообъектами.

В качестве объектов для микроманипуляций были выбраны помещенные в дистиллированную воду частицы цетилпиридинийбромида (ПАВ), а также микросферы латекса размером от 1,2 до 6,1 мкм. Поведение микрочастицы, захваченной световым полем, зависит от размеров, формы, показателя преломления, коэффициента поглощения частицы, от ее взаимодействия с окружающим раствором, а также от пространственного распределения интенсивности и фазы светового поля в области локализации частицы. Если поперечный размер светового поля ловушки меньше, чем размер частично поглощающей частицы, то передача орбитального (обусловленный наклоном волнового фронта) углового момента от светового поля частице приводит к вращению последней. При размерах частицы, много меньших поперечника светового



а





Рис. 3. Фазовый транспарант (а) и теоретические пространственные распределения интенсивности (б) и фазы(в) пучка в Фурье-плоскости



Рис. 4. Установка для лазерного манипулирования:

аргоновый лазер (I=0,49 мкм);
– коллиматор;
– дифракционный оптический элемент;
4 – собирающая линза;
5 – диэлектрическое зеркало;
6 – ПЗС камера;
7 – микрообъектив;
8 – кювета с частицами

распределения, она перемещается в световом поле в соответствии с его амплитудно-фазовым распределением. При преломлении света в частице возникает сила, стремящаяся «втянуть» её в область максимальной интенсивности ("градиентная сила"). Импульс, переданный частице за счет поглощения и отражения света, обуславливает возникновение действующей на частицу силы, направление и величина которой зависят как от интенсивности, так и от направления волнового вектора световой волны в области локализации частицы (рис. 5.). Последнее дает возможность организовать движение микрочастицы в световом поле по сложным траекториям.

Результаты

В экспериментах по перемещению микрочастиц по сложным траекториям было выявлено, что скорость движения микрочастицы зависит от положения частицы на траектории. Это хорошо согласуется с тем, что градиент фазы вдоль траектории не постоянен для данных световых полей.

В самом деле, интенсивность светового поля вдоль всей траектории квадрата приблизительно постоянна, но угол наклона волнового фронта изменяется при движении вдоль траектории. Это ведет к тому, что поперечная составляющая импульса, передаваемого световой волной микрочастице, зависит от того, в какой точке траектории находится частица. На рисунке 5 представлены усредненные значения сил, обусловленных наклоном волнового фронта, действующих на частицу при движении вдоль стороны квадрата. Значения сил рассчитывались при суммарной мощности пучка в 50 мВт, поперечном размере пучка в плоскости манипулирования 20 мкм и диаметре микрочастицы 1,2 мкм.

Рассчитанный суммарный передаваемый импульс вдоль траектории для спиральных пучков был больше, чем для их "фазовых" аналогов при одинаковых значениях суммарной энергии в выходной плоскости. Эксперименты по манипуляции микрообъектами также показали, что скорость перемещения частиц по траектории в случае спирального пучка выше, чем в случае пучка, сформированного исключительно фазовым транспарантом (при одинаковом значении интенсивности), что хорошо согласуется с распределением градиента фазы вдоль кривой.

Таким образом, в работе эксперимен-





Рис. 5. Усредненное значение силы, действующей на частицу при движении вдоль стороны квадрата, обусловленной наклоном волнового фронта:

а – для спирального пучка, б – для пучка, сформированного фазовым транспарантом от спирального пучка,
в – для пучка, сформированного фазовым транспарантом, рассчитанным итерационным алгоритмом.

тально продемонстрировано, что, используя методы оптики спиральных пучков, можно эффективно формировать световые поля со сложной пространственной структурой и ненулевым угловым моментом. Их использование в лазерных манипуляторах позволяет перемещать частицы по различным, наперед заданным, траекториям. При этом спиральные пучки имеют преимущественную способность при необходимости максимизировать скорость движения частицы по траектории при минимальной плотности энергии, падающей на частицу. В то же время "фазовые" аналоги спиральных пучков облегчают возможность динамического формирования необходимых распределений интенсивности и имеют существенно более высокую энергетическую эффективность.

Заключение

Рассчитанный суммарный передаваемый импульс вдоль траектории для спиральных пучков был больше, чем для их "фазовых" аналогов при одинаковых значениях суммарной энергии в выходной плоскости. Эксперименты по манипуляции микрообъектами также показали, что скорость перемещения частиц по траектории в случае спирального пучка выше, чем в случае пучка, сформированного исключительно фазовым транспарантом (при одинаковом значении интенсивности). Спиральные пучки имеют преимущество, заключающееся в их способности при необходимости максимизировать скорость движения частицы по траектории при минимальной плотности энергии, падающей на частицу. В то же время, "фазовые" аналоги

спиральных пучков облегчают возможность динамического формирования необходимых распределений интенсивности и имеют существенно более высокую энергетическую эффективность.

Работа выполнена в рамках гранта 04-02-96508 РФФИ, гранта CRDF (RUP1-2623-SA-04), грантов для студентов, аспирантов и молодых ученых Самарской области 2006 года 78E2.4 Д, 271E2.4 К и при частичной поддержке УНК ФИАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kotova S.P., Korobtsov A.V., Losevsky N.N., Mayorova A.M., Rakhmatulin M.A., Volostnikov V.G. Experiments on microscopic objects movement along various fixed trajectories caused by spiral beams // Proc. SPIE. 2005. V.5773.
- 2. Abramochkin E., Volostnikov V. Spiral-type beam // Optics Communication. 1993. V 102.
- 3. *Abramochkin E., Volostnikov V.* Spiral-type beams: optical and quantum aspects // Optics Communication. 1996. Vol. 125.
- 4. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Спиральные пучки света // Успехи физических наук. Т. 174. №12.
- Ерко А.М., Малов А.Н. Оптимизация параметров обработки слоев дихромированного желатина для записи оптической информации // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. 1980, Т. 25. №3.
- 6. *Под ред. Болтса Г.П.* Обратные задачи в оптике // М.: Машиностроение, 1984.
- 7. Эшкин А. Давление лазерного излучения // Успехи физических наук. 1973. Т. 110.

LIGHT FIELDS WITH NONZERO ANGULAR MOMENTUM FOR LASER MICRIMANIPULATION

© 2007 K.N. Afanasiev, A.V. Korobtsov, S.P. Kotova, N.N. Losevsky

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

Methods of laser manipulation with microscopic objects are getting still wider application in science and engineering. The range of manipulation use is enlarged owing to the beams with nonzero angular momentum. Different variants of generating light fields with nonzero angular momentum are analyzed in this paper: spiral beams; light fields, obtained with the spiral beam phase mask only and those obtained with the use of iterative algorithm. The calculations of the light wave linear momentum value transferred to the latex particles along the trajectory are carried out. The experiments on micro-particles movement along the formed Archimedes-spiral and square-contour trajectories are fulfilled.