УДК 534.2

ПРИМЕНЕНИЕ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ФАЗОВОЙ И КРУГОВОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ ВОЛНОВОЙ ПЛАСТИН В ОПТИЧЕСКИХ ПИНЦЕТАХ

В.К. АБРААМЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

e-mail: valeri.abrahamyan@ysu.am

(Поступила в редакцию 11 марта 2015 г.)

При разработке оптических пинцетов могут быть использованы как дифракционные оптические элементы для систем управления лазерным лучом, так и фазовые пластины, которые позволяют модулировать распределение интенсивности в лазерном пучке для манипуляции силами захвата. Рассмотрена система, состоящая из аксиально-симметричной фазовой пластины – стеклянной подложки, покрытой аксиально-симметрично ориентированным жидкокристаллическим (ЖК) полимером, и круговой дифракционной волновой пластины – стеклянной подложки, покрытой ЖК полимером с поляризационно-периодической ориентацией. На выходе системы получаются дифрагированные пучки в ± 1 порядках, распределение интенсивности в которых определяется состоянием поляризации света на входе системы. Рассмотрена возможность использования данной системы для захвата, прокручивания и перемещения частиц микро- и наноразмеров путем модификации формы и интенсивности пучков на выходе системы.

1. Введение

С помощью сильно сфокусированного светового пучка можно стабильно удерживать микроскопические частицы в трех измерениях. Первое описание оптических пинцетов приведено в работах [1,2]. Основными компонентами оптических пинцетов являются лазер, расширитель пучка, оптика для позиционирования пучка на образце, объектив микроскопа и конденсор для формирования ловушки на плоскости образца, датчик положения для измерения смещения пучка и источник света микроскопа, соединенный с ПЗС (прибор с зарядовой связью) камерой.

В тех случаях, когда диаметр захваченной частицы значительно больше, чем длина волны света, явление захвата можно объяснить с помощью геометрической оптики. Отдельные пучки света, излучаемого лазером, будут преломляться при прохождении через диэлектрическую частицу. В результате луч выходит в направлении, отличном от исходного. Поскольку свет имеет импульс, то изменение направления означает изменение импульса. Согласно третьему закону Ньютона, импульсы падающего и прошедшего через частицу света должны быть равны по модулю и противоположны по знаку.

Большинство оптических ловушек работает на основе светового пучка с гауссовым распределением (ТЕМ₀₀мода) профиля интенсивности. В этом случае, если частица смещается от центра пучка, результирующая сила возвращает ее в центр ловушки, так как центральная область пучка с большей интенсивностью приводит к большему изменению импульса, чем менее интенсивные области вдали от центра ловушки.

Захват частиц можно осуществить также с использованием лазерных пучков высоких порядков, таких как пучки Эрмита–Гаусса (TEM_{xy}), Лагерра–Гаусса (TEM_{pl}) и Бесселя. Оптические пинцеты на основе пучка Лагерра–Гаусса способны равномерно захватывать оптически отражающие и поглощающие частицы. Пучки Эрмита–Гаусса обладают четко определенным орбитальным моментом, который может вращать частицы [3,4]. Бесселевы пучки нулевого и более высокого порядков также обладают способностью равномерного захвата [5].

В общем случае поляризационные вортексы первого или более высоких порядков могут быть использованы для создания векторных бесселевых пучков. Одним из последних направлений исследований по применению бесселевых пучков является увеличение области захвата частиц и кинематика оптического пинцета. Уникальной особенностью этих полей является формирование пропеллерообразной диаграммы направленности по интенсивности, для которой число винтов и угол вращения пропеллера по отношению к анализатору зависят от состояния поляризации вортекса, используемого для создания этих полей [6].

Настоящая работа посвящена разработке оптических элементов на основе ЖК, которые позволяют реализовать поляризационные вортекс пучки, используя аксиально-симметричную фазовую пластину (АСФП) и круговую дифракционную волновую пластину (КДВП). Предложен новый метод формирования различных видов вортекса с использованием АСФП и КДВП. Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптических пинцетов.

2. Теоретическая модель и результаты моделирования

Вортекс фазовая пластина, быстрая оптическая ось которой вращается вокруг своего центра, представляет собой компоненту с равномерным смещением фазового фронта. КДВП [7,8] описываются как периодические профили пространственно изменяющейся оптической анизотропии. В отличие от обычных фазовых или амплитудных решеток, этот особый тип анизотропных дифракционных элементов локально изменяет состояние поляризации проходящего света. Указанные элементы недавно были изготовлены нами с использованием жидкокристаллических полимеров (ЖКП) – материалов, которые сочетают в себе двулучепреломление ЖК и механические свойства полимеров.

Функционирование АСФП и КДВП основано на пространственном круговом распределении молекул ЖК. АСФП – это пространственное распределение вращения молекул ЖК вокруг одной оси в двумерном пространстве, а КДВП – в одномерном пространстве, когда молекулы ЖК периодически распределены по микронной шкале.

Два основных варианта аксиально-симметричного распределения – азимутальная и радиальная поляризации, а также периодически-поляризационно распределенная ориентация представлены на рис.1.



Рис.1. Ориентация молекул ЖК: (а) – радиальная, (б) – азимутальная, (в) – периодически-поляризационно распределенная.

Обсудим перспективы применения этих элементов в оптических пинцетах. Рассмотрим теоретическую модель и некоторые экспериментальные результаты по изготовлению вортекс структур высокого порядка. Переход от радиально-симметричного к азимутальному распределению позволит получить аксиально-симметричный оптический элемент высокого порядка.

Такая структура может быть сформирована, если позиция быстрой оси фазовой пластины является функцией азимутального угла ф:

$$\theta(\phi) = \alpha \phi + \delta , \qquad (1)$$

где α – число оборотов быстрой оси и δ – угловая ориентация быстрой оси при $\phi = 0$.

Таким образом, вортекс структура первого порядка есть результат перехода от радиального к азимутальному распределению при одном повороте азимутального угла, когда быстрая ось совершает один полный оборот вокруг себя. Вортекс структуры более высоких порядков получаются при многократных переходах, и порядок зависит от числа переходов.

Рассмотрим систему с последовательным использованием АСФП и КДВП. Для моделирования распределения электрического поля и распределения интенсивности света была использована матрица Джонса (рис.2).

Преобразование света на АСФП и КДВП может быть представлено как



Рис.2. Матрица Джонса для случая последовательного применения АСФП и КДВП.

$$E_{\pm 1} = T_{\pm 1} \left(\frac{\pi x}{\Lambda} \right) E'_0,$$

$$E'_0 = R(m, \phi) E_0,$$
(2)

где E_0 , E'_0 и $E_{\pm 1}$ – электрические поля световых волн, соответственно входящей, выходящей из АСФП и выходящей из КДВП, ϕ – полярный угол, m – порядок аксиально-симметричной волновой пластины, $R(m, \phi)$ – двумерная матрица Джонса для АСФП и $T(\pi x/\Lambda)$ – матрица Джонса для КДВП.

$$T_{\pm 1} = \frac{1}{\Lambda} \int_{0}^{\Lambda} T(x) e^{\pm j \frac{2\pi x}{\Lambda}} dx,$$

$$R(m, \phi) = \begin{pmatrix} \cos(m\phi) & \sin(m\phi) \\ \sin(m\phi) & -\cos(m\phi) \end{pmatrix}.$$
(3)

Представив *E*'₀ как сумму световых пучков с левой *L*'₀ и правой *R*'₀ круговыми поляризациями

$$L'_{0} = E'_{0x} - iE'_{0y},$$
$$R'_{0} = E'_{0x} + iE'_{0y},$$

можно показать, что на выходе системы генерируются только ±1 дифракционные порядки (толщина элементов должна удовлетворять условию полуволновой пластины) [9]

$$E_{-1RC} = iL'_{0},$$

$$E_{+1LC} = iR'_{0}.$$
(4)

Вортекс структуры для 1, 2, 3 и 4 порядков показаны на рис.За. Как видно из результатов моделирования, когда между скрещенными поляризаторами расположены вортекс структуры 1, 2, 3 и 4 порядков, соответственно возникают бесселевы пучки в виде 2, 4, 6 и 8 пропеллеров (рис.Зб).

При последовательном использовании КДВП с вортексом, когда обеспечивается задержка $\lambda/2$, согласно уравнению (4), на выходе системы в ±1 дифракционных порядках наблюдаются пучки с правой и левой круговыми

поляризациями. В этом случае пучки в дифракционных порядках имеют форму пропеллера с взаимно обратным распределением интенсивности (рис.3в). Именно этот способ формирования пучка предлагается использовать в оптических пинцетах.



Рис.3. (а) – Вортекс структуры 1, 2, 3 и 4 порядков, (б) – результаты моделирования со скрещенными поляризаторами, (в) – на выходе КДВП.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для изготовления рассматриваемых структур на основе ЖКП с пространственным изменением ориентации [10,11] использован метод фотоориентирования. АСФП структуры записаны при непрерывном вращении плоскости поляризации падающего света, выходящего из узкой щели. КДВП записана по поляризационно голографическому методу [12,13]. Как правило, наноструктурированные ЖК объекты получают, используя эти два метода, т.к. в этом случае поворот директора ЖК осуществляется локально.

Слой фотоориентируемого полимера ROP 103/2CP (Rolic) был нанесен на подложку методом центрифугирования, просушен, после чего было проведено ориентирование при освещении линейно-поляризованным лучом УФ лазера. Использовался He–Cd лазер с длиной волны $\lambda = 325$ нм, выходной мощностью 50 мВт и расширением пучка 25 мм. Ориентируемый слой экспонировался сквозь узкую щель, расположенную между подложкой и полуволновой пластиной $\lambda/2$ (или поляризатором), как показано на рис.4а. Пластина $\lambda/2$ и щель (или подложка) в течение процесса экспозиции постоянно вращались для создания непрерывного изменения ориентации по отношению к азимутальному положению на подложке.



Рис.4. (а) – Установка для экспозиции аксиально-симметричной ориентации, (б) – голографическая установка для получения поляризационно распределенной ориентации.

Мода вортекс фазовой пластины определяется соотношением частоты вращения полуволновой пластины $\omega_{\lambda/2}$ и щели ω_s . При $\omega_{\lambda/2} = 4\omega_s$, $\omega_{\lambda/2} = 2\omega_s$, $\omega_{\lambda/2} = (3/4)\omega_s$, $\omega_{\lambda/2} = \omega_s$ формируются вортекс структуры 1, 2, 3 и 4 порядков, соответственно. На подложку методом центрифугирования был нанесен ЖК преполимер (ROF 5102, Rolic), который затем термически стабилизировалась и был полимеризован под воздействием УФ излучения в среде азота. Образцы были изготовлены на стеклянных подложках (стекло марки B6) диаметром 25 мм. Процесс изготовления КДВП такой же, за исключением экспозиции, когда ориентирование производится интерференцией лазерных лучей с левой и правой круговыми поляризациями, полученными с помощью волновой пластины $\lambda/4$. Оптическая схема записи КДВП приведена на рис.4б. Были изготовлены АСФП с вортекс структурами 2 и 4 порядка и КДВП.

На рис.5 приведена оптическая схема для исследования системы, состоящей из последовательно расположенных АСФП и КДВП. Объект исследования расположен между поляризатором и анализатором, входящий пучок – гауссова TEM₀₀ мода. Поворотом анализатора получаются изображения профилей пучка в ±1 и 0 порядках (рис.6). Наличие нулевого порядка связано с неидеальностью







Рис.6. Пропеллерообразный выход системы АСФП и КДВП в зависимости от положения анализатора: (а) – вортекс 2-го порядка и КДВП, (б) – вортекс 4-го порядка и КДВП.

структуры КДВП, обусловленой процессом записи. Как видно из рисунка, когда анализатор расположен параллельно поляризации входящего пучка, нулевой порядок интенсивности не модулируется, так как поляризация света, проходящего через нулевой порядок КДВП, не меняется. КДВП селективна по отношению к левой и правой круговым поляризациям, происходит модуляция и в ±1 дифракционных порядках КДВП наблюдаются пропеллеры.

Распределение интенсивности в ±1 порядках в зависимости от угла анализатора не меняется. Это означает, что в процессе модуляции круговая поляризация сохраняется. В случае, когда анализатор расположен под углом ±45°, в нулевом порядке наблюдаются линейные компоненты относительно главных осей АСФП. В случае скрещенных поляризаторов наблюдаются компоненты с круговыми поляризациями.

Поскольку на выходе АСФП–КДВП системы распределение интенсивности в полученных дифракционных порядках не зависит от позиции анализатора, то возможно создать систему без анализатора для применения в качестве пинцета.

Проведено также исследование системы с АСФП и КДВП без анализатора (рис.7). Когда входящий пучок линейно поляризован, дифракционные порядки



Рис.7. Зависимость изображения на выходе системы АСФП и КДВП без анализатора от поляризации входного пучка: (а) – вортекс 2-го порядка и КДВП, (б) – вортекс 4-го порядка и КДВП.

на выходе КДВП, за исключением 0 порядка, являются пропеллерообразными (число пропеллеров зависит от порядка АСФП).

Согласно предварительным теоретическим оценкам, распределения интенсивностей в ± 1 дифракционных порядках взаимно противоположны. При вращении поляризации входящего пучка света в ± 1 дифракционных порядках наблюдается непрерывное вращение пропеллеров. Если поляризация на входе меняется на круговую, то пропеллеры исчезают и в одном из ± 1 дифракционных порядков получается ТЕМ₀₀ гауссова мода.

В зависимости от левой или правой круговой поляризации входящего пучка получается дифракционный порядок с правой или левой круговой поляризацией, соответсвенно. Такое управление интенсивностью света дает возможность легко изменять момент силы захватывающего сфокусированного пучка.

4. Заключение

Теоретически и экспериментально исследована система, состоящая из последовательно расположенных АСФП и КДВП. Полученные результаты могут быть использованы при разработке оптических пинцетов. Бесселевы пучки в форме пропеллера, получающиеся в дифракционных порядках на выходе КДВП, позволяют создать угловой момент для вращения частиц, захваченных пинцетом. Показано, что распределение интенсивности в форме пропеллера может быть преобразовано в гауссову TEM₀₀ моду в зависимости от состояния поляризации входящего пучка.

Автор благодарит А. Маргаряна, Д. Оганесяна, Н. Акопян, Т. Саргсяна, П. Гаспаряна и А. Мовсесяна за полезные обсуждения и ценные замечания.

Работа выполнена в рамках проекта GIPP/ISTC A-1951.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. A. Ashkin. Phys. Rev. Lett., 24, 156 (1970).
- 2. A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu. Opt. Lett., 11, 288 (1986).
- 3. J.E. Curtis, D.G. Grier. Phys. Rev. Lett., 90, 133901 (2003).
- 4. M. Padgett. Proc. of SPIE, 3930, 130 (2000).
- 5. D. McGloin, V. Garces-Chavez, K. Dholakia. Optics Letters, 28, 657 (2003).
- 6. A. Niv, G. Biener, V. Kleiner, E. Hasman. Optics Letters, 29, 238 (2004).
- 7. L. Nikolova, T. Todorov. Opt. Acta, 31, 579 (1984).
- 8. J. Tervo, J. Turunen. Opt. Lett., 25, 785 (2000).
- 9. H. Sarkissian, B. Park, N. Tabirian, B. Zeldovich. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 451, 1 (2006).
- 10. A.K. Spilman, T.G. Brown. Appl. Opt., 46, 61 (2007).
- 11. M. Schadt, H. Seiberle, A. Schuster, S.M. Kelly. J. Appl. Phys., 34, L764 (1995).
- S.R. Nersisyan, N.V. Tabiryan D.M. Steeves, B.R. Kimball. Nonlinear Optical Physics & Materials, 18, 1 (2009).
- 13. H.L. Margaryan, V.M. Aroutiounian, D.L. Hovhannisyan, N.H. Hakobyan, V.K. Abrahamyan. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 559, 214 (2012).

ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՀԱՄԱՉԱՓՈՒԹՅԱՄԲ ՓՈՒԼԱՅԻՆ ԵՎ ՇՐՋԱՆԱՅԻՆ ԴԻՖՐԱԿՏԱՅԻՆ ԱԼԻՔԱՅԻՆ ԹԻԹԵՂՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՊԻՆՑԵՏՆԵՐՈՒՄ

Վ.Կ. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ

Oպտիկական պինցետներ պատրաստելիս կարող են օգտագործվել ինչպես դիֆրակցիոն օպտիկական տարրեր՝ որպես լազերային փնջի ուղղության ղակավարման համակարգ, այնպես էլ փուլային թիթեղներ, որոնք հնարավորություն են տալիս մոդուլացնել լազերային փնջի ինտեսիվության բաշխվածությունը բռնիչ ուժերի փոփոխման համար։ Դիտարկված է համակարգ, որը բաղկացած է առանցքային համաչափությամբ փուլային թիթեղից՝ ապեկե տակդիր, ծածկված հեղուկ բյուրեղ (ՀԲ) պոլիմերային թաղանթով, և պտտական դիֆրակցիոն ցանցից՝ ապակե տակդիր, ծածկված ՀԲ պոլիմերով՝ բևեռացումային պարբերական կողմնորոշմամբ։ Համակարգի ելքում, ստացվում են դիֆարակցված փնջեր ±1 կարգերում, որոնցում ինտենսիվության բաշխումը որոշվում է համակարգի մուտքում լույսի բևեռացման վիձակով։ Դիտարկված է տվյալ համակարգի օգտագործման հնարավորությունը միկրո և նանո չափերի մասնիկների սևեռումը, պտտումը և տեղաշարժումը իրականցանելու համար, համակարգի ելքում լուսային փնջի ձևի և ինտենսիվության փոփոխության միջոցով։

APPLICATION OF AXIALLY SYMMETRIC PHASE PLATE AND CIRCULAR DIFFRACTION WAVEPLATE IN OPTICAL TWEEZERS V.K. ABRAHAMYAN

Diffractive optical elements as laser beam steering systems and the phase plates, which allow to modulate the intensity distribution of the laser beam for manipulating trapping forces can be used for the development of the optical tweezers. The system, consisting of an axial symmetric phase plate – glass substrate coated by axially symmetric oriented liquid crystal (LC) polymer, and a circular diffraction waveplate – glass substrate, coated by LC polymer with polarization patterned orientation, is considered. Diffracted beams are obtained at the output of the system in ± 1 order, the intensity distribution in which is determined by the state of light polarization at the system input. The possibility of using this system for trapping, scrolling and moving the particles of micro- and nanosizes by modification of the shape and intensity of beams at the system output is considered.