ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОМАНИПУЛЯЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНЫХ ФОКУСАТОРОВ

Скиданов Р.В.¹, Порфирьев А.П.²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений, ² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

Аннотация

Рассчитаны ДОЭ, позволяющие формировать заданное распределение амплитуды и фазы. Эти ДОЭ предназначены для использования в задачах оптической микроманипуляции. Рассмотрены эксперименты по оптическому захвату микрообъектов с использованием указанных выше элементов. Представлены результаты эксперимента по оптическому захвату сферических микрообъектов в нескольких световых пучках с заданным распределением фазы.

Ключевые слова: оптический захват, фокусатор, распределение фазы.

Введение

Дифракционные оптические элементы, позволяющие формировать заданное распределение интенсивности либо в одной плоскости, либо в пространстве, известны довольно давно [1-10]. Предназначение этих элементов – фокусирующая оптика в технологических системах, поэтому дальнейшее усовершенствование этого вида ДОЭ пошло по пути увеличения дифракционной эффективности и точности формирования заданного распределения.

В то же время очевидно, что фокусаторы могут быть использованы в задачах оптической микроманипуляции. С их помощью можно сформировать и переместить устойчивую структуру из микрочастиц. Существует некоторое количество работ, посвященных экспериментам с такими фокусаторами. В последнее время появляется все больше работ, посвященных использованию динамических модуляторов света [11-13], которые могут в том числе формировать набор световых пучков, образующих в совокупности область заданной формы. Есть и работы, в которых фокусаторы формировали заданную интенсивность и при этом световое поле обладало и некоторой заранее известной фазой [14]. В [14] световой пучок имел вихревую фазу с заданным угловым орбитальным моментом, т.е. фактически фокусатор формировал вихревое световое поле с заданной интенсивностью. Вихревой характер формируемого поля означает, что на распределение интенсивности накладывается ряд ограничений, которые не позволяют формировать световое поле с произвольным распределением интенсивности. В настоящей работе рассматривается метод расчета фокусаторов, которые позволяют формировать заданное амплитудно-фазовое распределение практически без ограничений на форму этого распределения. Также рассматриваются эксперименты по микроманипуляции в световых полях, сформированных такими фокусаторами.

1. Формирование светового поля с заданным распределением интенсивности и фазы

Оптически более плотная, чем окружающая среда, микрочастица перемещается в световом поле в направлении градиента интенсивности. Поэтому, если фокусатор формирует световое поле в виде некоторой кривой, микрочастицы будут втягиваться в это световое поле и удерживаться им. Если световое поле будет иметь также градиент фазы, направленный вдоль сформированной кривой, то микрочастица после втягивания в этот световой пучок продолжит движение вдоль линии. Направление этого движения - в сторону возрастания фазы в пучке.

Поэтому задача расчета фокусатора формулируется следующим образом. Необходимо рассчитать фокусатор, формирующий произвольную кривую с фазой, которая линейно изменяется вдоль этой кривой. При этом необходимо сформировать бинарный фазовый элемент, т.к. технология изготовления многоуровневых элементов в настоящее время не отработана.

2. Метод расчета фокусаторов

Для расчета амплитуды и фазы в плоскости ДОЭ использовалось обратное преобразование Фурье. После этого осуществлялось кодирование амплитуды фазовой функцией с помощью метода, основанного на вариации ширины фазового скачка δ_x [15]. Эта процедура дает фазовую функцию элемента как сумму непрерывной исходной фазовой функции и бинарной фазовой функции, полученной в результате кодирования амплитуды.

После этого осуществляется кодирование полученной фазовой функции для приведения ее к полностью бинарному виду.

$$\phi_b(x, y) = \arg\left(\phi^*(x, y) \cdot e^{-i\alpha x} + \phi(x, y) \cdot e^{i\alpha x}\right), \qquad (1)$$

где α – частота несущей, ϕ – исходная фаза, ϕ_b – новая бинарная фаза.

Рассчитанные таким образом ДОЭ позволяют формировать заданную траекторию движения микрообъектов. При этом, задавая величину градиента фазы, можно регулировать скорость движения.

3. Расчет фокусаторов и эксперимент

Согласно описанному выше методу было рассчитано несколько дифракционных оптических элементов, формирующих разные распределения. На рис. 1 представлены эталонные распределения интенсивности в виде двух линий. Фаза меняется вдоль линий на 2π и 4π соответственно. Такой ДОЭ может быть ис-

пользован в задаче сортировки микрообъектов по их размеру. Для этого достаточно пустить через световой пучок поток микрочастиц. Микрочастицы большего размера будут беспрепятственно проходить через световой пучок, микрочастицы меньшего размера будут захватываться пучком и сдвигаться в сторону.

Для получения заданного распределения был рассчитан ДОЭ, фаза которого представлена на рис. 2*a*.

Так как ДОЭ, представленный на рис. 2*a*, бинарный, он формирует два порядка. На рис. 2*б* и 2*b* представлены интенсивность и фаза одного из этих порядков.



Рис. 1. Интенсивность и фаза эталона для расчета ДОЭ (негативное изображение)



Рис. 2. Фаза ДОЭ (а), интенсивность (б) и фаза (в) сформированного светового пучка, полученные при моделировании дифракции на элементе (а, б - негативное изображение)

ДОЭ, представленный на рис. 2*a*, был изготовлен методом фотолитографии на стеклянной подложке. Элемент был изготовлен с разрешением 2 мкм. Размер элемента 4 мм. Показатель преломления материала подложки 1,51. Был проведен эксперимент по формированию пучка этим элементом и оптической микроманипуляции полистироловыми шариками диаметром 5 мкм.

На рис. 3 представлена оптическая схема, которая была использована в эксперименте.



Рис. 3. Оптическая схема, используемая для экспериментов. L – твердотельный лазер, M₁ – первое поворотное зеркало, M₂, M₃ – поворотные зеркала, L₁ – фокусирующий микрообъектив, L₂- микрообъектив для построения изображения рабочей области

Луч лазера с помощью поворотного зеркала M_1 попадает на ДОЭ. Затем полученный световой пучок фокусируется микрообъективом L_1 (20×). Захват и перемещение микрообъектов осуществляется в кювете V. Изображение рабочей области строится микрообъективом L_2 (16×). Поворотное зеркало M_2 направляет сформированное изображение на чувствительную область CCD камеры. На рис. 4 представлено это экспериментально полученное распределение интенсивности и стадии движения полистироловых микрошаров.





Как видно из рис. 4, полистироловый микрошар втягивается в пучок и двигается вдоль линии против общего движения микрошаров в потоке жидкости. Также был рассчитан ДОЭ, который формирует световой пучок в форме креста, с фазой, которая линейно изменяется от центра к концам креста. На рис. 5*а* и 5*б* представлены эталонные распределения интенсивности и фазы соответственно. Фаза меняется от 0 до 2π . Такой ДОЭ должен захватывать микрообъекты и перемещать их в центр креста. Использование этого ДОЭ очень удобно для точного позиционирования микрообъектов. При перемещении такого пучка через среду с микрообъектами он будет захватывать микрообъекты и перемещать их в центр креста, затем микрообъект может быть оставлен в нужном месте путем либо кратковременного отключения пучка, либо кратковременного увеличения скорости перемещения пучка.



Рис. 5. Интенсивность и фаза эталона для расчета ДОЭ (негативное изображение)

Рассчитанная для формирования такого пучка фаза ДОЭ представлена на рис. 6а. Надо сказать, что с учетом необходимости кодирования амплитуды размерность этого ДОЭ довольно велика и составляет 4000×4000 точек. На рис. 6б и 6в представлены интенсивность и фаза сформированного этим ДОЭ пучка.

Как видно из рис. 6, сформированный пучок довольно хорошо соответствует эталону как по интенсивности, так и по фазе (отличие фазы в областях, где интенсивность практически нулевая, несущественно).

ДОЭ, представленный на рис. 6*a*, был реализован на стеклянной подложке. Элемент был изготовлен с разрешением 2 мкм. Размер элемента 4 мм. Показатель преломления материала подложки 1,51. Был проведен эксперимент по формированию пучка этим элементом и оптической микроманипуляции полистироловыми шариками диаметром 5 мкм. На рис. 7 представлены стадии движения полистироловых микрошаров, захваченных этим световым пучком.

Как видно из рис. 7, наблюдается движение от края креста к его центру, что полностью соответствует расчетам.



Рис. 6. Фаза ДОЭ (а), интенсивность (б) и фаза (в) сформированного светового пучка, полученные при моделировании дифракции на элементе (а, б – негативное изображение)



Рис. 7. Стадии движения полистиролового микрошара в световом пучке в виде креста с интервалом 1 с (а, б, в) (негативное изображение)

Заключение

В работе экспериментально реализован энергетически эффективный способ формирования лазерных пучков с заданным распределением интенсивности и фазы. Представлены результаты моделирования дифракции на рассчитанных элементах. Представлены результаты экспериментов по оптическому захвату и перемещению микрообъектов в таких пучках без перемещения самих пучков. Экспериментально доказана возможность использования таких пучков для захвата и перемещения микрообъектов.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF RUX0-014-Sa-06), грантов РФФИ №№ 10-07-00438, 10-07-00109, гранта Президента РФ № ИШ-7414.2010.9, программы поддержки молодых учёных МД-8026.2010.2, а также при поддержке «Фонда содействия отечественной науке».

Литература

- Голуб, М.А. Фокусировка излучения в заданную область пространства с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм / М.А. Голуб [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7, № 10. – С. 618-623.
- Гончарский, А.В. Решение обратной задачи фокусировки лазерного излучения в произвольную кривую / А.В. Гончарский [и др.] // ДАН СССР. – 1983. – Т. 273, № 3. – С. 605-608.
- Воронцов, М.А. К расчету фокусаторов лазерного излучения в дифракционном приближении / М.А. Воронцов, А.Н. Матвеев, В.П. Сивоконь // Компьютерная оптика. – 1987. – № 1. – С. 74-78.
- Агешин, С.Ф. Применение фокусаторов в задачах лазерной обработки материалов / С.Ф. Агешин, А,А. Азаров, В.В. Попов, И.Н.Сисакян // Компьютерная оптика. – 1988. – №. 3. – С. 91-93.
- Сисакян, И.Н. Технологические возможности применения фокусаторов при лазерной обработке материалов / И.Н. Сисакян В.П. Шорин, В.А. Сойфер, В.И. Мордасов, В.В. Попов // Компьютерная оптика. 1988. №. 3. С. 94-96.
- Воронцов, М.А. Синтез фокусаторов излучения в плоскую область в условиях нелинейных искажений световых пучков / М.А. Воронцов, А.В. Разгулин // Компьютерная оптика. – 1989. – № 5. – С. 25-28.
- Березный, А.Е. Фазовые элементы для фокусировки лазерного излучения в плоские многоугольные области / А.Е. Березный, И.А. Шимохин // Компьютерная оптика. – 1988. – № 6. – С. 24-27.
- Павельев, В.С. Итерационный расчет, реализация и исследование элемента, фокусирующего гауссов освещающий пучок в кольцевую фокальную область / В.С. Павельев В.А. Сойфер, М. Дюпарре, Р. Коваршик, Б. Людге, Б.Фукс // Компьютерная оптика. 1998. № 18. С. 111-114.
- Казанский, Н.Л. Применение фокусаторов излучения при формировании нанопористых структур твердокристаллических материалов / Н.Л. Казанский, С.П. Мурзин, В.И. Трегуб, А.В. Меженин // Компьютерная оптика. – 2007. – № 31. – С. 48-51.
- Cojoc, D. Multiple Optical Trapping by Means of Diffractive Optical Elements / D. Cojoc [and other] // J. Appl. Phys. – 2004. – N 43. – P. 3910-3915.
- Davis, J.A. High diffraction efficiency from one- and twodimensional Nyquist frequency binary-phase gratings / J.A. Davis, B.A. Slovick, C.S. Tuvey, and D.M. Cottrell // Appl. Optics. – 2008. – Vol. 47, N 15. – P. 2829-2834.
- Ohtake, Y. Universal generation of higher-order multiringed Laguerre–Gaussian beams by using a spatial light modulator / Y. Ohtake, T. Ando, N. Fukuchi, N. Matsumoto, H. Ito , and T. Hara // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, N 11. – P. 1411-1413.
- Gibson, G. Holographic assembly workstation for optical manipulation / G. Gibson [and other] // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2008. – Vol. 10. – P. 1-6.
- 14. Абрамочкин, Е.Г. Формирование вихревых световых полей с заданной формой интенсивности для задач лазерной манипуляции микрообъектами / Е.Г. Абрамочкин – Материалы XXVI школы по когерентной оптике и голографии «Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии», Иркутск: Папирус, 2008. – С. 203-207.
- Khonina, S.N. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11. – P. 1-7.

References

- Golub, M.F. Focusing of radiation in the given area of space with using computer designed holograms. / M.A. Golub [and other] // Letters in JTP, 1981. – Vol. 7, N 10. – P. 618-623. – (in Russian).
- Goncharskiy, A.V. Decision of the inverse problem of the focusing of the lazer radiation in free curve / A.V. Goncharskiy [and other] // RAS USSR. – 1983. – V. 273, N 3. – P. 605-608. – (in Russian).
- Voronzov, M.A. The calculation focusator of laser radiation in the diffraction theory / M.A. Voronzov, A.N. Matveev, V.P. Sivokon' // Computer Optics. – 1987. – N 1. – P. 74-78. – (in Russian).
- Ageshin, S.F. Using focusator's in problem of the lazer processing of material / S.F.Ageshin, A.A. Azarov, V.V. Popov, I.N. Sisakyan // Computer Optics. – 1988. – N 3. – P. 91-93. – (in Russian).
- Sisakyan, I.N. Technological possibilities of the using focusator's under lazer processing of material / I.N. Sisakyan V.P. Shorin, V.A. Soifer, V.I. Mordasov, V.V. Popov // Computer Optics. – 1988. – N 3. – P. 94-96. – (in Russian).
- Voronzov, M.A. Syntheses focusator's of radiations in flat area in condition of the nonlinear distortion light beams / M.A. Voronzov, A.V. Razgulin // Computer Optics. – 1989. – N 5. – P. 25-28. – (in Russian).
- Berezniy, A.E. Phase elements for focusing of the lazer radiation in flat polygonal areas / A.E. Berezniy, I.A. Shimohin // Computer Optics. – 1988. – N 6. – P. 24-26. – (in Russian).
- Pavelyev, V.S. Iterative calculation, realization and study of the element, focusing gausssian illuminating beam in ring focal area / V.S. Pavelyev, V.A. Soifer, M Duparre, R. Kovarshik, B. Ludge, B. Kley, S.V. Karpeyev // Computer Optics. – 1998. – N 18. – P. 111-114. – (in Russian).
- Kazansky, N.L. Using focusators radiations when shaping porous structures an solid state materials / N.L. Kazansky S.P. Murzin, V.I. Tregub, A.V. Megenin // Computer Optics. – 1998. – N 31. – P. 48-51. – (in Russian).
- Cojoc, D. Multiple Optical Trapping by Means of Diffractive Optical Elements / D. Cojoc [and other] // J. Appl. Phys. – 2004. – N 43. – P. 3910-3915.
- J.A. Davis, High diffraction efficiency from one- and twodimensional Nyquist frequency binary-phase gratings / J.A. Davis, B.A. Slovick, C.S. Tuvey, and D.M. Cottrell // Appl. Optics. – 2008. – Vol. 47, N 15. – P. 2829-2834.
- Ohtake, Y. Universal generation of higher-order multiringed Laguerre–Gaussian beams by using a spatial light modulator / Y. Ohtake, T. Ando, N. Fukuchi, N. Matsumoto, H. Ito, and T. Hara // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, N 11. – P. 1411-1413.
- Gibson, G. Holographic assembly workstation for optical manipulation / Gibson G. [and other] // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2008. – Vol. 10. – P. 1-6.
- Abramochkin, E.G. Forming of Helical-wave-front laser beams by light with given by form to intensities for problems of the lazer manipulate microobjects / E.G. Abramochkin – Materials XXVI schools on coherent optics and holographies "Holography: fundamental research, innovative projects and nanotechnologies", Irkutsk: Papirus, 2008. – P. 203-207. – (in Russian).
- Khonina, S.N. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N. Khonina // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11. – P. 1-7.

OPTICAL MICROMANIPULATION WITH USING BINARY FOCUSATOR

R.V. Skidanov¹, *A.P. Porfir'ev²* ¹ Image Processing Systems Institute of the RAS, ² S.P. Korolyov Samara State Aerospace University

Abstract

It is calculated DOE, allowing form given distribution of the amplitude and phases. These DOE are intended for use in problem optical micromanipulation. The presented experiments on optical trapping microobjects with use specified above element. The presented results of the experiment on optical trapping spherical microobjects in several light beams with given a sharing the phase.

Key words: optical trapping, focusator, distribution of the phase.

Сведения об авторах



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 Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Скиданов Р.В.– специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 60 статей, 3 монографии. Е-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 60 scientific papers, 3 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. E-mail: *romans@smr.ru*.



Порфирьев Алексей Петрович, 1987 года рождения, в 2008 получил степень бакалавра в Самарском государственном аэрокосмическом университете по специальности «Прикладная математика». Область научных интересов: дифракционная оптика.

Aleksey Petrovich Porfir'ev (b. 1987) He received his bachelor in Applied mathematics (2008) in SSAU. His research interests are currently diffractive optics.

Поступила в редакцию 25 марта 2010 г.