

МИКРОМАНИПУЛЯЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

Р.В. Скиданов¹, С.Н. Хонина¹, В.В. Котляр¹

¹Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Аннотация

Экспериментально показана возможность захвата, перемещения и позиционирования микрообъектов с помощью бинарного динамического модулятора света. Описана методика формирования световых пучков для реализации перемещения микрообъектов с помощью динамического модулятора света.

Ключевые слова: оптический захват, динамический модулятор света.

Введение

В последнее время появляется все больше работ, посвященных использованию динамических модуляторов света [1-4]. Причем модуляторы используются как для простого формирования новых световых пучков [1,2], так и для экспериментов по оптическому микроманипулированию [3,4]. Как правило, в работах, описывающих системы оптической микроманипуляции, почти не рассматриваются фазовые функции, которые выводятся на динамический модулятор. В представленной работе основное внимание уделяется именно фазовым функциям, выводимым на модулятор, а также условиям, которым они должны удовлетворять.

1. Формирование траектории микрообъекта

Так как динамические модуляторы света имеют, как правило, невысокую дифракционную эффективность, для перемещения микрообъектов целесообразно использовать световой пучок с минимально возможными размерами, частица будет перемещаться вслед за этим пучком. Рассмотрим основные этапы формирования и условия, накладываемые на перемещение такого пучка.

С помощью динамического модулятора света формируется световой пучок с минимально возможными размерами. Для этого формируется бинарная дифракционная линза со смещенным фокусом, функция пропускания которой описывается формулой

$$\tau(x, y) = \text{sgn} \left\{ \exp \left[i \frac{k}{f} (x^2 + y^2) + i\omega_x x + i\omega_y y \right] \right\}, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние линзы, x, y – декартовы координаты, k – волновое число, ω_x, ω_y – пространственные частоты. Частоты ω_x, ω_y определяют смещение фокуса рабочего пучка. Функция пропускания линзы, формируемая на модуляторе, меняется дискретно таким образом, чтобы расстояние между двумя последовательными положениями пучка было менее половины размера захваченного объекта. Для сферического микрообъекта с радиусом r можно записать условие

$$\sqrt{(\Delta\omega_x)^2 + (\Delta\omega_y)^2} \frac{f}{k} < \frac{r}{2}. \quad (2)$$

Кроме этого условия еще необходимо дополнительное условие на интервал времени между двумя последовательными сменами фазовой функции

$$\Delta t > \frac{\sqrt{(\Delta\omega_x)^2 + (\Delta\omega_y)^2} f}{kv}, \quad (3)$$

где v – средняя скорость движения микрообъекта для данного пучка при заданной мощности, эта скорость определяется экспериментальным путем. Так, для сферического микрообъекта диаметром 5мкм, находящегося в воде при температуре 25°C при мощности пучка 500мВт, эта скорость составляет 3,5-4мкм/с.

Для формирования траектории микрообъекта в форме квадрата со стороной 20х20мкм была составлена последовательность фазовых функций (рис. 1), удовлетворяющих условиям (2), (3).

2. Эксперимент

Для проведения эксперимента была использована оптическая схема, приведенная на рис.2. В качестве динамического модулятора света был использован модулятор CRL OPTO с матрицей размером 1360х1024. В оптической схеме, представленной на рис.2, может быть использован как динамический модулятор света M_1 , так и ДОЭ, реализованный на оптической подложке (DOE).

С использованием приведенного на рис.1 набора масок был проведен эксперимент, в ходе которого была захвачена полистироловая микрочастица диаметром 5мкм и перемещена по квадратной траектории. Для перемещения микрочастицы на динамический модулятор подавалась последовательность фазовых масок, представленных на рис. 1, с интервалом времени, задаваемым условием (3). К сожалению, при проведении экспериментов не удалось добиться одновременной визуализации и микрообъектов, и светового пучка, поэтому во всех экспериментах использовались светофильтры, полностью убирающие световой пучок. Стадии движения частицы с интервалом 2с представлены на рис.3.

Если приведенный выше набор фазовых масок дополнить фазовыми масками, реализующими положение светового пучка внутри квадрата с той же самой дискретизацией, что и по периметру, то можно будет реализовать любую траекторию внутри указанного квадрата.

Например, на рис. 4 представлены стадии движения микрообъекта по треугольной траектории через 1,5с.

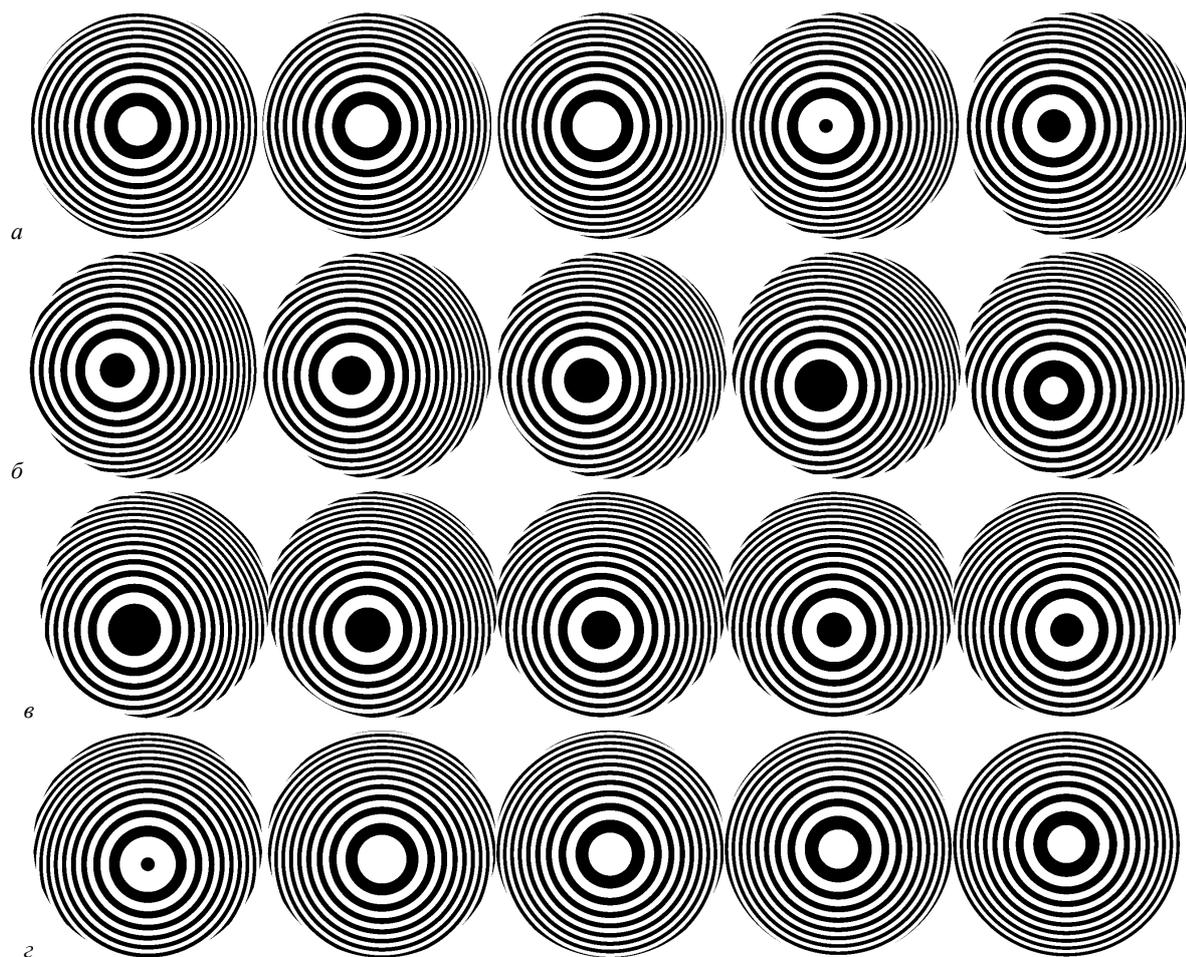


Рис. 1. Последовательность фазовых масок для реализации траектории движения микрообъекта в форме квадрата (черный – 0, серый π)

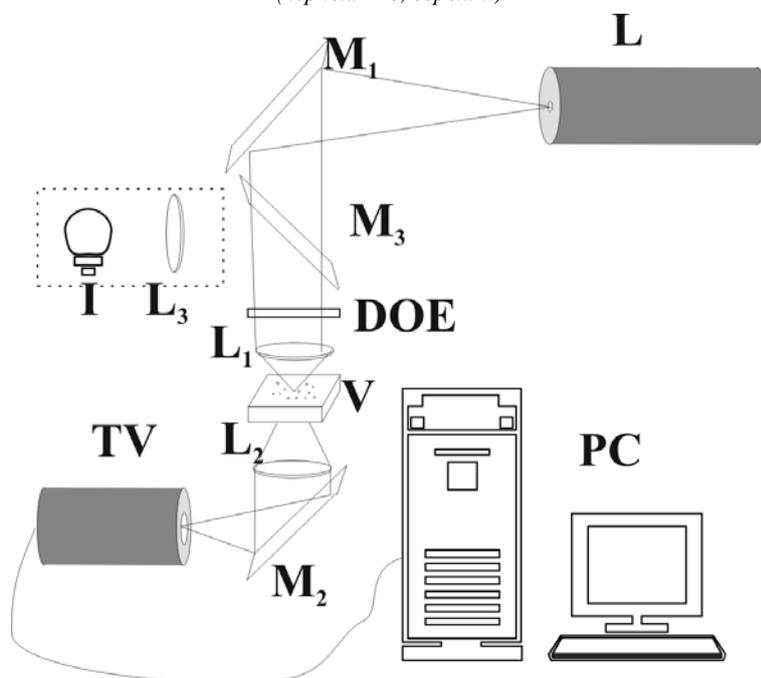


Рис.2. Оптическая схема, используемая для экспериментов. L – твердотельный лазер, M₁ – динамический модулятор света или первое поворотное зеркало, если для формирования пучка используется дифракционный оптический элемент (DOE), M₂, M₃ – поворотные зеркала, L₁-фокусирующий микрообъектив, L₂- микрообъектив для построения изображения рабочей области

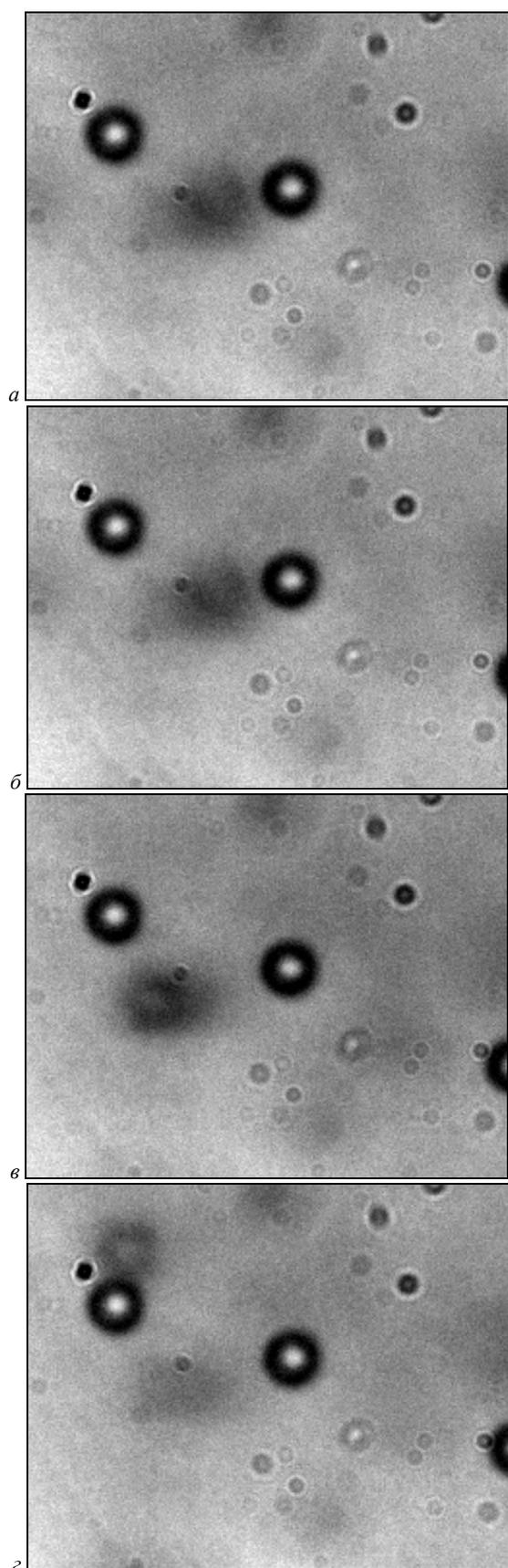


Рис. 3. Основные стадии движения полистироловой микрочастицы через интервал времени 2с при движении по квадратной траектории

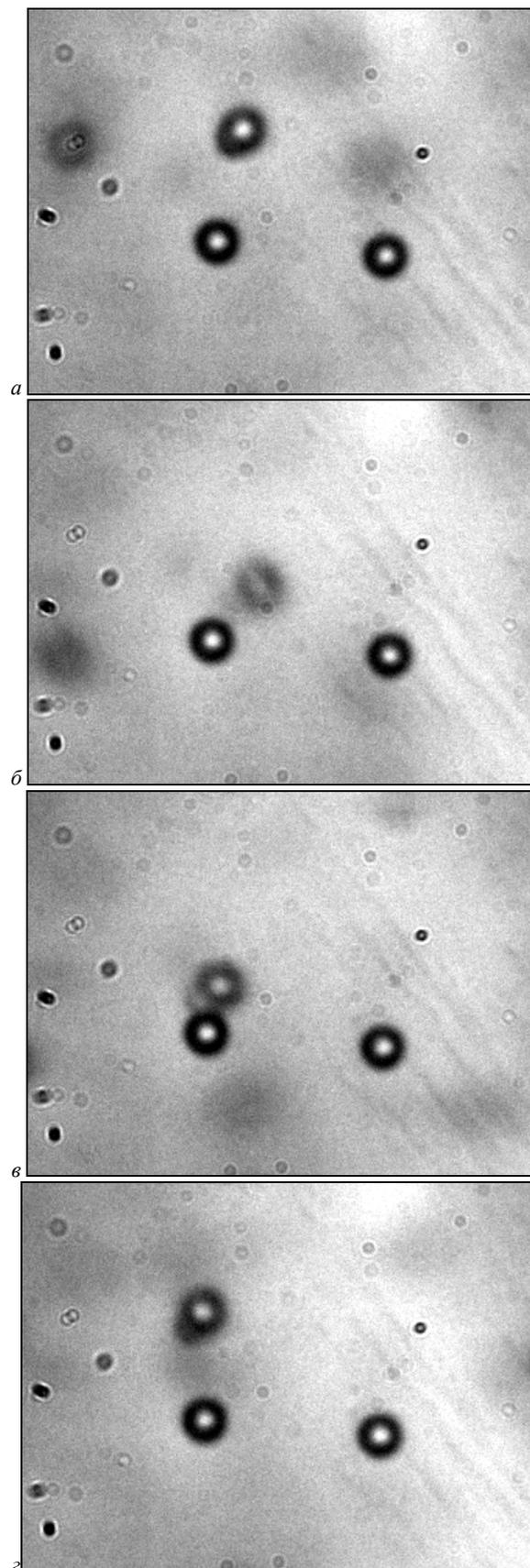


Рис. 4. Основные стадии движения полистироловой микрочастицы через интервал времени 1,5с при движении по треугольной траектории

Кроме захвата одиночных микрообъектов можно также захватывать группы микрообъектов. Так, для захвата двух микрообъектов достаточно на фазовую функцию наложить дополнительную несущую частоту. На рис. 5а представлена фазовая маска такого элемента, на рис. 5б - френелевская дифракция (интенсивность в поперечной плоскости) на этом элементе, на рис. 5в - такой же элемент со смещенными фокусами, на рис. 5г - френелевская дифракция на элементе со смещенными фокусами.

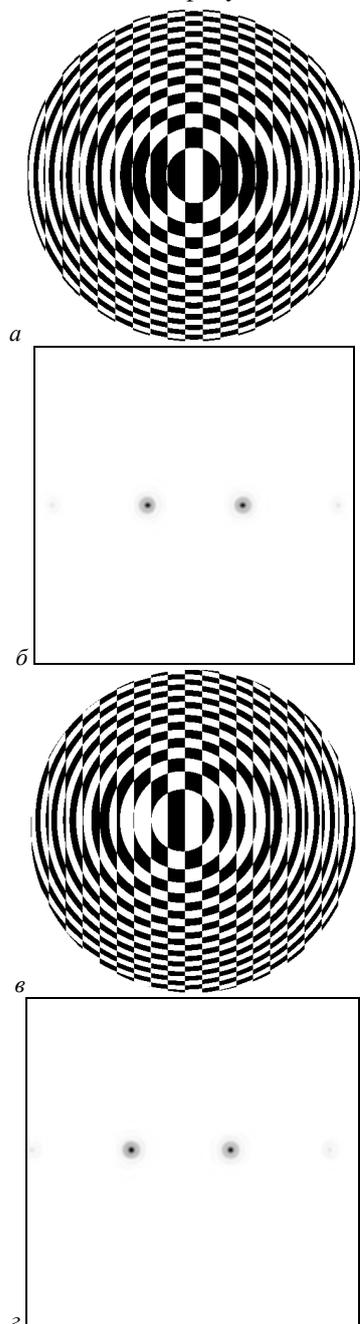


Рис. 5. Фазовая маска элемента для одновременного захвата двух микрообъектов (а), френелевская дифракция на этом элементе (б), фазовая маска элемента для одновременного захвата двух микрообъектов со смещенными фокусами (в), френелевская дифракция на элементе со смещенными фокусами (г)

Используя представленные на рис. 5 а, в фазовые маски, был проведен эксперимент по одновременному захвату и перемещению двух сферических микрообъектов диаметром 5мкм. Стадии движения двух микрочастиц с интервалом в 2,5с представлены на рис. 6.

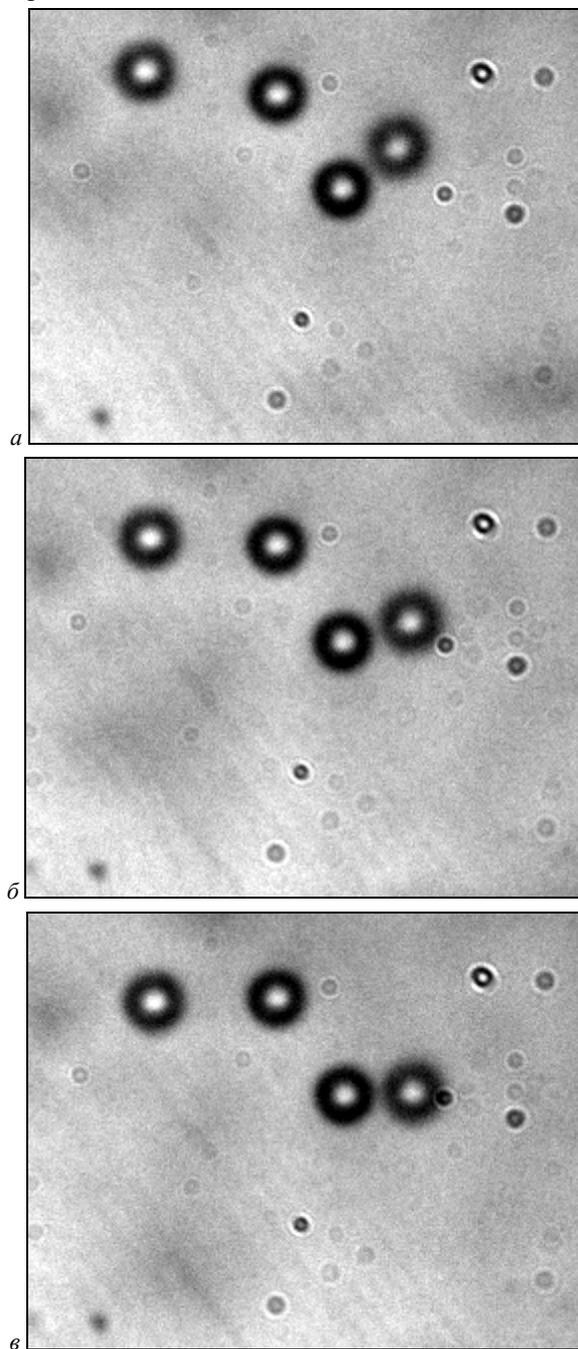


Рис. 6. Последовательные фазы движения двух полистироловых сферических микрообъектов диаметром 5мкм, с интервалом 2,5 с

В последнем эксперименте намеренно было не выполнено условие (2), при этом концентрация микрообъектов в кювете была на порядок выше, чем в предыдущих экспериментах. При этом микрообъект захватывался, но не перемещался, т.к. нарушалось

условие (2). Световой пучок при этом перемещался по разворачивающейся спирали. В результате этого перемещения удалось получить компактную группу микрообъектов, расположенных в области заданной

формы. На рис.7 представлен окончательный результат такого формирования. Задавая различные траектории движения пучка, можно формировать структуры из микрообъектов.

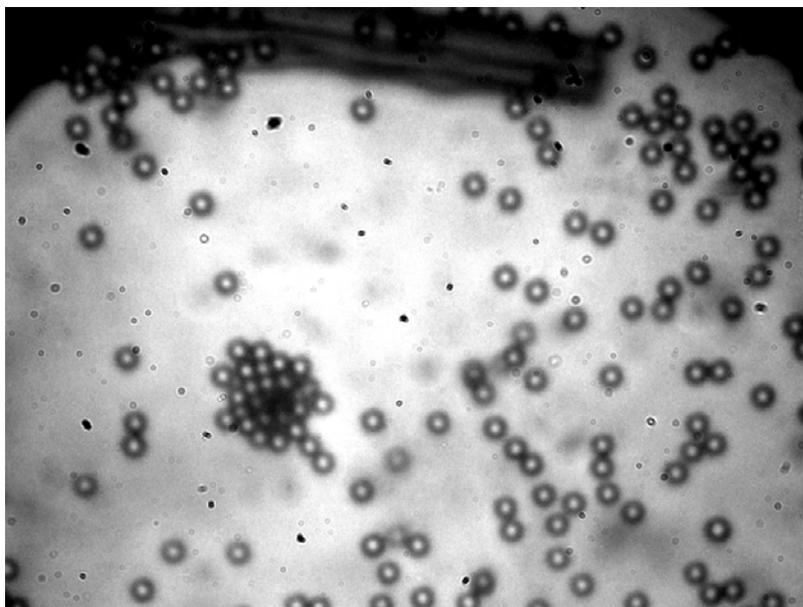


Рис. 7. Сформированная структура из полистироловых сферических микрообъектов

Заключение

В работе описана методика формирования световых пучков для управляемого перемещения микрообъектов. Рассмотрены эксперименты по такому перемещению. Также представлен эксперимент по формированию структуры из нескольких микрообъектов с помощью световых пучков, сформированных с помощью динамического модулятора света.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF RUX0-014-Sa-06), грантов РФФИ №№ 07-07-97600, 08-07-99007, гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-

3086.2008.9), а также при поддержке Фонда содействия отечественной науке.

Литература

1. **Davis J.A.** High diffraction efficiency from one- and two-dimensional Nyquist frequency binary-phase gratings Appl. / J.A. Davis, B.A. Slovick, C. S. Tuvey, D.M. Cottrell // Optics, -2008 -V. 47. -N. 15, -P. 2829 - 2834.
2. **Ohtake Y.** Universal generation of higher-order multiringed Laguerre-Gaussian beams by using a spatial light modulator / Y Ohtake // Opt. Lett., -2007 -V. 32, -N. 11, -P. 1411-1413.
3. **Gibson, G.** Holographic assembly workstation for optical manipulation / G Gibson // J. Opt. A: Pure Appl. Opt., -2008 -V. 10, -P. 1-6.
4. **Котляр, В.В.** Вращение лазерных пучков, не обладающих орбитальным угловым моментом / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер // Компьютерная оптика – 2007. -Вып. 31, -С. 35-38.

OPTICAL MICROMANIPULATION USING A BINARY DYNAMIC LIGHT MODULATOR

R.V. Skidanov¹, S.N. Khonina¹, V.V. Kotlyar¹

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia

Abstract

We discuss experiments on optical trapping of microobject with using spatial light modulator. Experimental results on the optical trapping of the spherical microobjects in several light beams are presented.

Keywords: optical trapping, spatial light modulator.

Acknowledgements: The work was partly supported by the Russian-American Basic Research and Higher Education Program (grant CRDF RUX0-014-Sa-06), the RFBR grants Nos. 07-07-97600, 08-07-99007, the grant of the President of the Russian Federation on the support of leading scientific schools (NSh- 3086.2008.9), and by the Russian Science Support Foundation.

Citation: Skidanov RV, Khonina SN, Kotlyar VV. Optical micromanipulation with using binary spatial light modulator [In Russian]. *Computer Optics* 2008; 32(4): 361-365.

References

- [1] Davis JA, Slovick BA, Tuvey CS, Cottrell DM. High diffraction efficiency from one- and two-dimensional Nyquist frequency binary-phase gratings *Appl. Optics* 2008; 47(15): 2829-2834.
- [2] Ohtake Y. Universal generation of higher-order multiringed Laguerre–Gaussian beams by using a spatial light modulator. *Opt. Lett.* 2007; 32(11): 1411-1413.
- [3] Gibson G. Holographic assembly workstation for optical manipulation. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2008; 10: 1-6.
- [4] Kotlyar VV, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA. Rotation of laser beams with zero of the orbital angular moment [In Russian]. *Computer Optics* 2007; 31: 35-38.