

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ЗАХВАТА МИКРОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БИНАРНОГО РАДИАЛЬНОГО ДОЭ

Качалов Д.Г.<sup>1</sup>, Павельев В.С.<sup>1,2</sup>, Хонина С.Н.<sup>1,2</sup>, Скиданов Р.В.<sup>1,2</sup>, Порфирьев А.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН

### Аннотация

Рассчитан, изготовлен и экспериментально исследован бинарный радиально-симметричный дифракционный оптический элемент (ДОЭ), формирующий световое распределение типа «световая бутылка». Экспериментально реализован оптический захват микрочастиц на основе использования созданного элемента. Показано, что сформированная ловушка может захватывать как прозрачные, так и непрозрачные микрообъекты и удерживать их с силой, достаточной для перемещения в вязкой среде.

**Ключевые слова:** дифракционный оптический элемент, фазовая функция, плазмохимическое травление, оптическое манипулирование, световое распределение типа «световая бутылка».

### Введение

«Световой бутылкой» называют такое распределение интенсивности лазерного излучения, в котором область нулевой интенсивности окружена световым барьером [1–3]. Одним из применений «световых бутылок» является захват холодных атомов, молекул и микрочастиц [4, 5]. Разрушительное действие нагрева на захваченные объекты является одной из основных проблем оптического захвата: даже помещение слабопоглощающих диэлектрических частиц в относительно прозрачную среду приводит к их повреждению при высоких оптических интенсивностях. Решением этой проблемы является захват в области с минимальной интенсивностью. Одним из способов формирования областей с минимальной интенсивностью является использование лазерных пучков с винтовой фазовой сингулярностью [6–9]. Такие пучки несут угловой момент, связанный с вихревой структурой волнового фронта даже при линейной поляризации света. В [6] экспериментально демонстрируется 3D захват менее плотных, чем окружающая среда частиц (полые стеклянные шарики диаметром 20 мкм в воде), с помощью одного, сильно сфокусированного кольцевого (полого) пучка. Захват происходит в осевой тёмной части пучка.

В [9] была показана возможность захвата и вращения частиц в вихревом пучке Бесселя, сформированном с помощью дифракционного спирального аксикона. Протяжённость такого полого пучка значительно превышает расстояние Рэлея для гауссовых пучков. Лазерные пучки с вихревой фазовой сингулярностью проще всего формируются с помощью дифракционных элементов, таких как спиральные фазовые пластинки [10–12]. Однако изготовление таких элементов достаточно сложно [13], а погрешности изготовления приводят к нарушению структуры волнового фронта. Технологии изготовления ДОЭ всё ещё несовершенны и хорошо отработаны лишь для изготовления бинарного (двухуровневого) микрорельефа, причём желательно, чтобы размеры зон значительно превышали длину волны (для оптического диапазона порядка микрона). Как показано в [5, 14] бинарные

дифракционные оптические элементы могут быть также использованы для формирования оптических вихрей. Однако применение методов бинарного кодирования [5] ведёт к формированию множества паразитных дифракционных порядков, что значительно снижает дифракционную эффективность элемента [15]. Данная работа посвящена расчёту, изготовлению и исследованию бинарного радиально-симметричного элемента, предназначенного для формирования распределения типа «световая бутылка» в единственном рабочем порядке (на оптической оси).

### 1. Расчёт дифракционного оптического элемента

Постановка задачи оптимизации ДОЭ, формирующего «оптическую ловушку» на расстоянии  $F_1$  от ДОЭ, представлена на рис. 1.

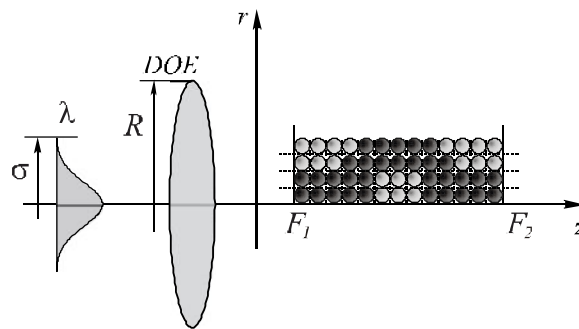


Рис. 1. Оптическая схема формирования «оптической ловушки»

Радиально-симметричный ДОЭ рассчитывался в рамках параксиального приближения. Область фокусировки была представлена в виде набора дифракционных пятен размером  $\Delta = \lambda f / (2R)$ , где  $\lambda$  – длина волны освещающего пучка,  $f$  – расстояние от плоскости установки оптического элемента,  $R$  – радиус ДОЭ. В области формирования заданного распределения яркость каждого дифракционного пятна выбиралась из соображения функционального применения данного ДОЭ – формирование затемнённой области на оптической оси, окружённой областями с высоким уровнем интенсивности. На рис. 1 более яркими пятнами обозначены участки высокой интенсивности, а менее яркими – участки низкой интенсивности.

Были выбраны следующие параметры оптимизации фазового ДОЭ: гауссов освещающий пучок с длиной волны  $\lambda=532$  нм и радиусом перетяжки  $\sigma=1,5$  мм, число уровней квантования микрорельефа  $M=2$ , число отсчётов вдоль радиуса  $N=200$ . Область формирования заданного светового распределения располагается вдоль оптической оси на расстоянии от  $F_1=100$  мм до  $F_2=104$  мм от плоскости установки элемента; область низкой интенсивности (внутренняя область оптической ловушки) имеет длину 1 мм (здесь и далее параметры фокальной области приведены для случая формирования заданного распределения в свободном пространстве) и ширину оптического провала в два дифракционных пятна. Для расчёта элемента использовался подход, предложенный в [16].

В ходе расчёта ДОЭ минимизировался функционал:

$$\Phi(\rho_j, z_i) = c_i \left| \exp \left( \frac{\bar{I}(\rho_j, z_i) - I(\rho_j, z_i)}{\bar{I}(\rho_j, z_i)} \right) - 1 \right|, \quad \text{если } \bar{I}(\rho_j, z_i) > 0$$

$$\Phi(\rho_j, z_i) = c_i \left( \exp \left( \frac{I(\rho_j, z_i)}{\bar{I}_{\text{ном}}} \right) - 1 \right), \quad \text{если } \bar{I}(\rho_j, z_i) = 0, \quad (1)$$

где  $I(\rho_j, z_i)$  – интенсивность, которую формирует ДОЭ в точке  $(\rho_j, z_i)$ ,  $\bar{I}(\rho_j, z_i)$  – эталонный уровень интенсивности в точке  $(\rho_j, z_i)$ ,  $z_i$  – расстояние на оптической оси от источника излучения,  $\rho_j$  – радиальное расстояние до центра дифракционного пятна,  $c_i$  – коэффициент, учитывающий спад уровня интенсивности по мере удаления от источника излучения. Оптимизация функционала (1) проводилась с помощью генетического алгоритма, успешно применявшегося ранее для расчёта ДОЭ, формирующего продольные распределения интенсивности [17,18]. Рассчитанная фазовая функция представлена на рис. 2. Белый цвет обозначает уровень фазы  $\pi$ , чёрный цвет – уровень фазы 0.

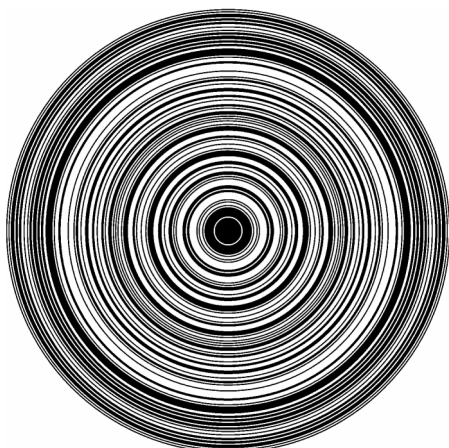


Рис. 2. Фазовая функция ДОЭ, формирующего световое распределение типа «оптическая ловушка»

На рис. 3 изображено двумерное распределение интенсивности, формируемое рассчитанным ДОЭ (результат моделирования, негативное изображение).

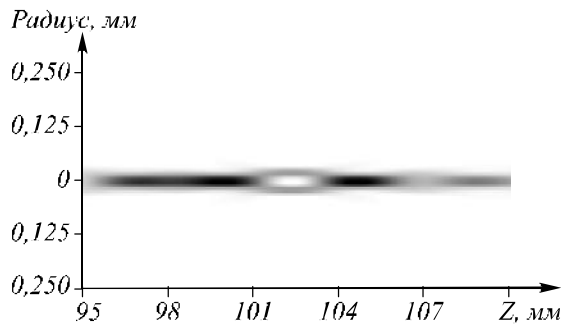


Рис. 3. Двумерное распределение интенсивности, формируемое рассчитанным ДОЭ (результат численного моделирования, негативное изображение)

Численное моделирование показало, что средняя дифракционная эффективность ДОЭ, формирующего оптическую ловушку, на всей протяжённости фокальной области вдоль оптической оси составило приблизительно 5%. На рис. 4 изображено распределение интенсивности первых четырёх дифракционных пятен от оптической оси, формируемых рассчитанным ДОЭ.

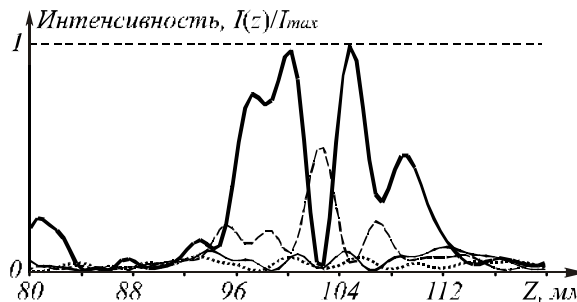


Рис. 4. Распределение интенсивности первых четырёх дифракционных пятен, формируемых рассчитанным ДОЭ (результат численного моделирования, сплошная линия – первое пятно, пунктирная линия – второе пятно)

## 2. Изготовление и экспериментальное исследование дифракционного оптического элемента

ДОЭ с фазовой функцией, приведённой на рис. 2, был изготовлен методом литографического плазмохимического травления. Запись фотошаблонов производилась на станции лазерной записи CLWS-200 путём создания защитной окисной плёнки окиси хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) на засвечиваемых участках с последующим удалением слоя хрома в жидкостном травителе. Точность позиционирования засвечивающего лазерного луча с длиной волны 488 нм составляла 20 нм, а минимальный размер элемента изображения составлял 0,6 мкм. С помощью созданных фотошаблонов на поверхности пластины из кварца типа КВ методом плазмохимического травления формировался рассчитанный бинарный микрорельеф. Результаты исследования сформированного фазового микрорельефа методом микроинтерферометрии белого света приведены на рис. 5. Можно отметить высокое качество формирования бинарного микрорельефа.

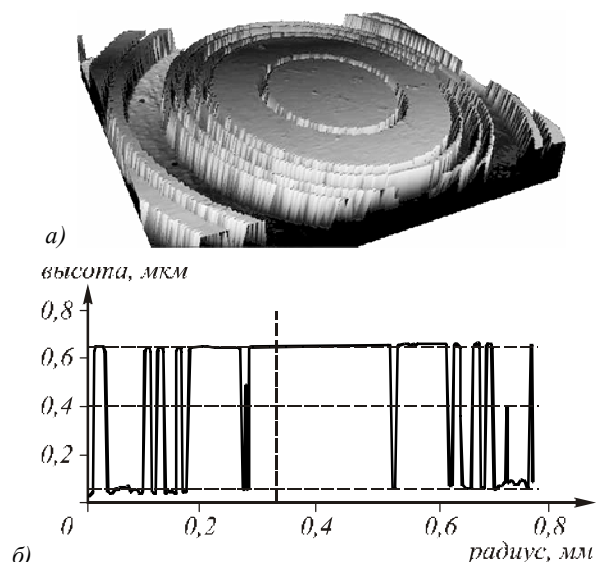


Рис. 5. Результаты исследования сформированного фазового микрорельефа методом микроинтерферометрии белого света

Для исследования свойств изготовленных элементов, предназначенных для формирования световых распределений типа «световая бутылка», использовалась установка, оптическая схема которой приведена на рис. 6.

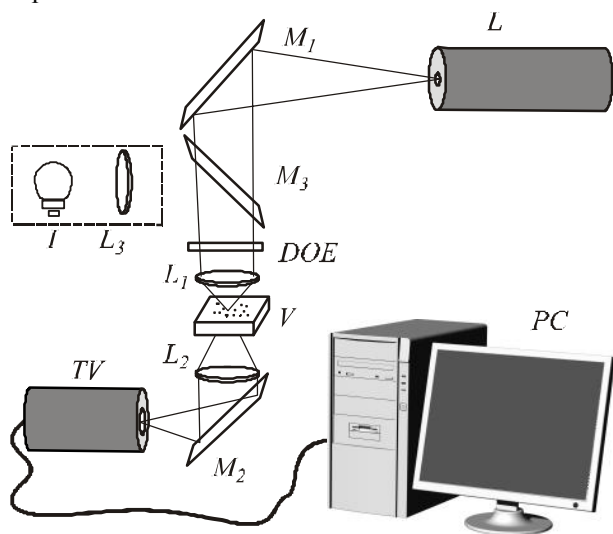


Рис. 6. Оптическая схема, используемая для экспериментов.

$L$  – твёрдый лазер (длина волны  $\lambda = 532$  нм),

$M_1$  – первое поворотное зеркало,  $M_2, M_3$  – поворотные зеркала,  $L_1$  – фокусирующий микробиоъектив,

$DOE$  – дифракционный оптический элемент,

$L_2$  – микробиоъектив для построения изображения рабочей области,  $V$  – кювета,  $TV$  – видеокамера,  $PC$  – компьютер

Луч лазера с помощью поворотного зеркала  $M_1$  попадает на ДОЭ. Затем полученный световой пучок фокусируется микробиоъективом  $L_1(8\times)$ . Захват и перемещение микробиоъектов осуществляется в кювете  $V$ . Изображение рабочей области строится микробиоъективом  $L_2(20\times)$ . Поворотное зеркало  $M_2$  направляет сформированное изображение на чувствительную область CCD-камеры. В качестве микробиоъектов применялись прозрачные микрошары из полистирола диамет-

ром 5 мкм. Мощность пучка на выходе из лазера составила около 2 Вт. Размер и положение пучка были подобраны таким образом, чтобы область высокой интенсивности попадала на край полистиролового микрошара. В этом случае за счёт френелевского отражения микрочастица удерживается в области минимальной интенсивности пучка, т.е. ведёт себя как непрозрачный объект. Это позволяет перемещать микрочастицу в центре ловушки вслед за пучком. Стадии движения с интервалом в 2 с приведены на рис. 7а, б, в. Средняя скорость перемещения составила около 8 мкм/с. Эта скорость перемещения даёт возможность оценить силу удержания микрочастицы в ловушке. Она составляет около 300 пкН. На рис. 7г, д, е показано перемещение в этой же ловушке двух полистироловых микрошаров, захваченных уже на максимуме интенсивности.

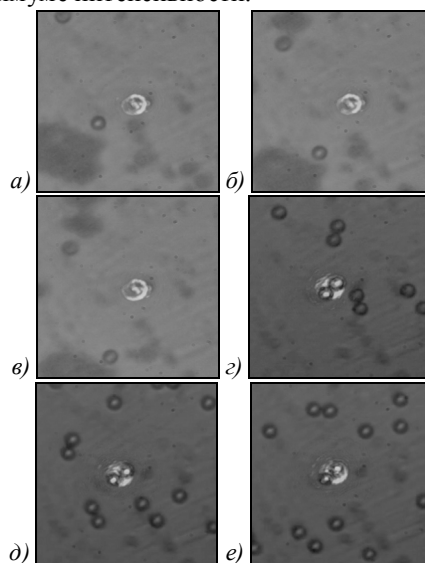


Рис. 7. Результаты экспериментов по манипуляции микрочастицами

Как видно из рис. 7, сформированная ловушка может захватывать как прозрачные, так и непрозрачные микрообъекты и удерживать их с силой, достаточной для перемещения в вязкой среде.

**Заключение**

Рассчитан, изготовлен, численно и экспериментально исследован бинарный радиально-симметричный дифракционный оптический элемент, формирующий распределение интенсивности типа «световая бутылка». Результаты натурного и вычислительного экспериментов находятся в хорошем соответствии. Экспериментально реализован оптический захват микрочастиц на основе использования созданного элемента. Показано, что сформированная ловушка может захватывать как прозрачные, так и непрозрачные микрообъекты и удерживать их с силой, достаточной для перемещения в вязкой среде. Анализ результатов численного и экспериментального исследования созданного элемента демонстрирует целесообразность применения элементов такого типа для решения задач манипуляции микрочастицами.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 02.740.11.0805), грантов РФФИ № 08-07-99007, 10-07-00109, гранта Президента Российской Федерации НШ-4128.2012.9.

**Литература**

1. **Ozeri, R.** Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap / R. Ozeri, L. Khaykovich, N. Davidson // *Phys. Rev. A*. – 1999. – Vol. 59(3). – P. R1750-R1753.
2. **Arlt, J.** Generation of beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt // *Opt. Lett.* – 2000. – Vol. 25(4). – P. 191-193.
3. **Yelin, D.** Generating an adjustable three-dimensional dark focus / D. Yelin, B.E. Bouma, G.J. Tearney // *Opt. Lett.* – 2004. – Vol. 29(7). – P. 661-663.
4. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Opt. Lett.* – 1986. – Vol. 11(5). – P. 288-290.
5. **Соифер, В.А.** Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порожденные дифракционной оптикой / В.А. Соифер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2004. – Т. 35(6). – С. 1368-1432.
6. **Gahagan, K.T.** Optical vortex trapping of particles / K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander // *Opt. Letters*. – 1996. – Vol. 21(11). – P. 827-829.
7. **Kuga, T.** Novel optical trap of atoms with a doughnut beam / T. Kuga, Y. Torii, N. Shiokawa, T. Hirano, Y. Shimizu, H. Sasada // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 78. – P. 4713-4716.
8. **Manek, I.** Generation of a hollow laser beam for atom trapping using an axicon / I. Manek, Yu.B. Ovchinnikov, R. Grimm // *Opt. Comm.* – 1998. – Vol. 147. – P. 67-70.
9. **Khonina, S.N.** Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen // *Journal of Modern optics*. – 2004. – Vol. 51(14). – P. 2167-2184.
10. **Khonina, S.N.** The phase rotor filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkaryev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // *J. Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39(5). – P. 1147-1154.
11. **Kotlyar, V.V.** Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Almazov, S.N. Khonina, V.A. Soifer, H. Elfstrom, J. Turunen // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2005. – Vol. 22(5). – P. 849-861.
12. **Kotlyar, V.V.** Diffraction of a plane, finite-radius wave by a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.A. Kovalev, V.A. Soifer, H. Elfstrom, J. Turunen // *Opt. Lett.* – 2006. – Vol. 31. – P. 1597-1599.
13. **Tsai, H.-Y.** Fabrication of spiral-phase diffractive elements using scanning-electron-beam lithography / H.-Y. Tsai, H.I. Smith and R. Menon, *J. Vac // Sci. Technol. B*. – 2007. – Vol. 25. – P. 2068-2071.
14. **Kotlyar, V.V.** Multi-order diffractive optical elements to process data / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina // *Perspectives in Engineering Optics*, Ed. by K. Singh, V.K. Rastogi, Publ. Anita Publications, Delhi. 2003. – P. 47-56.
15. **Khonina, S.N.** DOE-generated laser beams with given orbital angular momentum: application for micromanipulation / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer,

J. Turunen // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.

16. **Качалов, Д.Г.** Оптимизация бинарного ДОО для формирования «световой бутылки» / Д.Г. Качалов, К.А. Гамзков, В.С. Павельев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2011. – Том 35, № 1. – С. 70-76.
17. **Osipov, V.P.** Realization of binary radial diffractive optical elements by two-photon polymerization technique / V.P. Osipov, V.S. Pavelyev, D.G. Kachalov, A. Zukauskas, B.N. Chichkov // *Opt. Exp.* – 2010. – Vol. 18(25) – P. 25808-25814.
18. **Kachalov, D.G.** Application of the direct search in solving a problem of forming longitudinal distribution of intensity / D.G. Kachalov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev // *J. Mod. Opt.* – 2011. – Vol. 58, N 1. – P. 69-76.

**References**

1. **Ozeri, R.** Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap / R. Ozeri, L. Khaykovich, N. Davidson // *Phys. Rev. A*. – 1999. – Vol. 59(3). – P. R1750-R1753.
2. **Arlt, J.** Generation of beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt // *Opt. Lett.* – 2000. – Vol. 25(4). – P. 191-193.
3. **Yelin, D.** Generating an adjustable three-dimensional dark focus / D. Yelin, B.E. Bouma, G.J. Tearney // *Opt. Lett.* – 2004. – Vol. 29(7). – P. 661-663.
4. **Ashkin, A.** Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Opt. Lett.* – 1986. – Vol. 11(5). – P. 288-290.
5. **Soifer, V.A.** Optical Microparticle Manipulation: Advances and New Possibilities Created by Diffractive Optics / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina // *Physics of Particles and Nuclei*. – 2004. – Vol. 35(6). – P. 733-766. – (In Russian).
6. **Gahagan, K.T.** Optical vortex trapping of particles / K.T. Gahagan, G.A. Swartzlander // *Opt. Letters*. – 1996. – Vol. 21(11). – P. 827-829.
7. **Kuga, T.** Novel optical trap of atoms with a doughnut beam / T. Kuga, Y. Torii, N. Shiokawa, T. Hirano, Y. Shimizu, H. Sasada // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 78. – P. 4713-4716.
8. **Manek, I.** Generation of a hollow laser beam for atom trapping using an axicon / I. Manek, Yu.B. Ovchinnikov, R. Grimm // *Opt. Comm.* – 1998. – Vol. 147. – P. 67-70.
9. **Khonina, S.N.** Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, R.V. Skidanov, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen // *Journal of Modern optics*. – 2004. – Vol. 51(14). – P. 2167-2184.
10. **Khonina, S.N.** The phase rotor filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkaryev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // *J. Modern Optics*. – 1992. – Vol. 39(5). – P. 1147-1154.
11. **Kotlyar, V.V.** Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Almazov, S.N. Khonina, V.A. Soifer, H. Elfstrom, J. Turunen // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2005. – Vol. 22(5). – P. 849-861.
12. **Kotlyar, V.V.** Diffraction of a plane, finite-radius wave by a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, A.A. Kovalev, V.A. Soifer, H. Elfstrom, J. Turunen // *Opt. Lett.* – 2006. – Vol. 31. – P. 1597-1599.
13. **Tsai, H.-Y.** Fabrication of spiral-phase diffractive elements using scanning-electron-beam lithography / H.-Y. Tsai, H.I. Smith and R. Menon, *J. Vac // Sci. Technol. B*. – 2007. – Vol. 25. – P. 2068-2071.

14. **Koltyar, V.V.** Multi-order diffractive optical elements to process data / V.V. Koltyar, S.N. Khonina // Perspectives in Engineering Optics, Ed. by K. Singh, V.K. Rastogi, Publ. Anita Publications, Delhi. 2003. – P. 47-56.
15. **Khonina, S.N.** DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Turunen // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.
16. **Kachalov, D.G.** Optimization of binary DOE for “light trap” distribution forming / D.G. Kachalov, K.A. Gamazkov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina // Computer Optics. – 2011. – Vol. 35(1). – P. 70-76. –(In Russian).
17. **Osipov, V.P.** Realization of binary radial diffractive optical elements by two-photon polymerization technique / V.P. Osipov, V.S. Pavelyev, D.G. Kachalov, A. Zukauskas, B.N. Chichkov // Opt. Exp. – 2010. – Vol. 18(25) – P. 25808-25814.
18. **Kachalov, D.G.** Application of the direct search in solving a problem of forming longitudinal distribution of intensity / D.G. Kachalov, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev // J. Mod. Opt. – 2011. – Vol. 58, N 1. – P. 69-76.

## EXPERIMENTAL REALISATION OF MICROPARTICLE'S OPTICAL TRAPPING BY USE OF BINARY RADIAL DOE

*D.G. Kachalov<sup>1</sup>, V.S. Pavelyev<sup>1,2</sup>, S.N. Khonina<sup>1,2</sup>, R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>, A.P. Porfirev<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> *S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,*

<sup>2</sup> *Image Processing Systems Institute of the RAS*

### Abstract

The novel binary radial diffractive optical element (DOE) forming “light bottle” intensity distributions in the zero diffractive order has been designed and experimentally studied. The microparticle’s optical trapping is realized by use of manufactured DOE. It is shown that realized “light bottle” can be used for trapping transparent and non-transparent microparticles in viscous medium.

**Key words:** diffractive optical element, optical manipulation, “light bottle” distribution, phase function, plasmochemical etching.

### Сведения об авторах



**Качалов Денис Георгиевич**, инженер кафедры наноинженерии, м.н.с. научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: дифракционная оптика, методы стохастической оптимизации.

E-mail: [kachalov@ssau.ru](mailto:kachalov@ssau.ru).

**Denis Georgievich Kachalov**, engineer of Nanoengineering Department and researcher of Research and Educational Center “Nanotechnology” of Samara State Aerospace University named named after S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, methods of stochastic optimization.



**Павельев Владимир Сергеевич**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур.

E-mail: [pavelyev@smr.ru](mailto:pavelyev@smr.ru).

**Vladimir Sergeevich Pavelyev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering Department of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev, chief researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS.

*Сведения об авторе Хонина Светлана Николаевна – см. стр. 26 этого номера.*

*Сведения об авторах Скиданов Роман Васильевич и Порфирьев Алексей Петрович – см. стр. 90 этого номера.*

*Поступила в редакцию 30 декабря 2011 г.*