

**ОПТИМИЗАЦИЯ БИНАРНОГО ДОЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ «СВЕТОВОЙ БУТЫЛКИ»***Качалов Д.Г.<sup>1</sup>, Гамазков К.А.<sup>1</sup>, Павельев В.С.<sup>1,2</sup>, Хонина С.Н.<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН**Аннотация**

Предложена и исследована численная процедура оптимизации бинарных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), предназначенных для формирования световых распределений типа «световая бутылка». Предложенная численная процедура основана на модификации генетического алгоритма оптимизации функции многих переменных. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

**Ключевые слова:** генетический алгоритм, оптическая ловушка, бинарные дифракционные оптические элементы.

**Введение**

Оптической ловушкой типа «световая бутылка» (“light bottle”) называют такое распределение интенсивности лазерного излучения, в котором область нулевой интенсивности окружена световым барьером [1–3]. Одно из применений «световых бутылок» – захват холодных атомов или молекул [4].

Оптические ловушки основаны на силе, которая действует на атомы в поле со смещённой частотой излучения. В световом поле, настроенном выше резонанса, атомы выталкиваются из областей высокой интенсивности, в то время как при настройке ниже резонанса атомы притягиваются в эти области [5]. Во внерезонансных оптических ловушках используется настройка далеко от резонанса. Разрушительное действие нагрева на захваченные объекты является одной из основных проблем: даже помещение слабопоглощающих диэлектрических частиц в относительно прозрачную среду приводит к их повреждению при высоких оптических интенсивностях.

Альтернативой является захват в области с минимальной интенсивностью.

Одним из способов формирования областей с минимальной интенсивностью является использование лазерных пучков с винтовой фазовой сингулярностью. 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 (полюе стеклянные шарики 20 мкм в диаметре в воде) с помощью одного, сильно сфокусированного кольцевого (полого) пучка. Захват происходит в осевой тёмной части пучка. При этом частицы с высоким показателем преломления были захвачены тем же пучком в кольце с высокой интенсивностью.

В области лазерного охлаждения и захвата нейтральных атомов полые пучки также представляют интерес из-за отталкивающего (от областей высокой интенсивности) действия оптической дипольной силы в поле лазера, настроенного выше резонанса («синяя расстройка»), позволяющего ограничить движение атомов в тёмной внутренней части полого пучка и формировать пучки медленных атомов для реализации

возможностей атомной оптики. Такие ловушки имеют преимущество по сравнению с захватом в области высокой интенсивности лазерного поля, настроенного ниже резонанса («красная расстройка»), т.к. в этом случае минимизируются нежелательные эффекты, такие как нагрев при рассеянии фотонов и возмущения энергетических уровней световыми сдвигами.

В [7] ловушка с полым пучком Гаусса-Лагерра высшего порядка была реализована для атомов рубидия. В [8] описываются результаты по формированию полого пучка с помощью аксикона, дополненного сферической линзой (в фокальной плоскости которой получается узкое кольцо) для экспериментального исследования холодных атомов. Однако в этом случае резкое кольцо формируется только на узком продольном отрезке, так что захват будет слабым за пределами этого участка. В [9, 10] была показана возможность захвата и вращения частиц в вихревом бесселевом пучке, сформированном с помощью дифракционного спирального аксикона. Протяжённость такого полого пучка значительно превышает расстояние Рэлея для гауссовых пучков и тем более фокальную глубину.

Лазерные пучки с вихревой фазовой сингулярностью проще всего формируются с помощью дифракционных элементов, таких как спиральные фазовые пластинки [11–13]. Изготовление таких элементов достаточно сложно [14], а погрешности изготовления приводят к нарушению структуры волнового фронта [15].

Известны способы бинарного кодирования дифракционных элементов, предназначенных для формирования оптических вихрей [5, 16]. При наложении линейной несущей функции производятся несколько (два и более) вихревых пучков, распространяющихся под углами к оптической оси. В этом случае количество энергии в каждой ловушке уменьшается пропорционально количеству формируемых пучков [17].

Отметим, что ловушки, основанные на пучках с винтовой фазовой сингулярностью, вообще говоря, являются двумерными ловушками, т.к. теневая область ограничивается только поперечным световым барьером. При использовании же «световых бутылок» обеспечивается 3D-захват поглощающих и менее плотных, чем окружающая среда частиц.

В [1] формирование теневого фокуса осуществлялось с помощью введения фазового сдвига на  $\pi$  радиан центральной части фокусируемого гауссова пучка по отношению к периферии. Интенсивность «стенок» такой ловушки является довольно низкой.

В [2] рассматривалась интерференция мод Гаусса-Лагерра, фазовый сдвиг между которыми подобран так, чтобы при интерференции они взаимоуничтожались в общем фокусе. Суперпозиция формировалась с помощью амплитудной голограммы, которая характеризуется низкой дифракционной эффективностью.

Аналогичная интерференция, но пучков с различной кривизной, была рассмотрена в [3]. Для этого использовался интерферометр, что, безусловно, усложнит и делает оптическую систему микроманипулирования более громоздкой. Этим же недостатком обладают схемы с использованием двух оптических элементов – линзы и аксикона [18-20], хотя параметры ловушки можно динамически менять за счёт изменения расстояния между двумя этими элементами [19].

Требования компактности и простоты использования стимулируют развитие методов для синтеза одного оптического элемента, обеспечивающего заданное 3D распределение интенсивности. С помощью итерационных методов и методов кодирования [21-27] обеспечивается синтез высокоэффективных фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ), предназначенных для генерации заданной суперпозиции многомодовых лазерных пучков. В частности, суперпозиция соосных бесселевых пучков [26-27] позволяет формировать периодическую цепочку максимальных и минимальных значений интенсивности на оптической оси, т.е. продольный набор оптических «пузырьков». Таким образом, с помощью одного ДОЭ можно формировать определённую интерференционную картину как в поперечном, так и в продольном направлениях. Однако, как было указано выше, технологии изготовления ДОЭ всё ещё несовершенны и хорошо отработаны лишь для бинарных вариантов, причём желательно, чтобы размеры зон значительно превышали длину волны (для оптического диапазона порядка микрона).

Одним из подходов к расчёту бинарных ДОЭ, обеспечивающих заданное распределение интенсивности в некоторой плоскости, поперечной к оси распространения (например, фокальной) или вдоль оптической оси, является разбиение элемента на кольцевые зоны с постоянной фазой [28-33]. В этом случае, разумеется, можно управлять распределением только в одном из выбранных направлений.

В данной работе предлагается иной метод расчёта бинарных кольцевых фазовых ДОЭ, основанный на применении генетического алгоритма и обеспечивающий эффективное формирование светового распределения в виде заданной 3D картины, полученной вращением одномерных распределений в нескольких плоскостях [34, 35]. В отличие от итерационных методов, использующих для этого суперпозицию бесселевых пучков, рассматриваемый подход

одновременно учитывает ограничения на топологию дифракционного микрорельефа (в нашем случае – бинарный и радиально-симметричный), позволяет варьировать соотношение интенсивности светового барьера оптической ловушки в различных направлениях и управлять формой теневой области.

Полученные в [36-41] решения задачи расчёта радиально-симметричных ДОЭ, формирующих заданные распределения интенсивности, могут быть использованы в качестве начальных приближений для генетического алгоритма.

### Описание вычислительного эксперимента

Постановка задачи оптимизации ДОЭ, формирующего «световую бутылку» на расстоянии  $F_1$  от ДОЭ, представлена на рисунке 1.

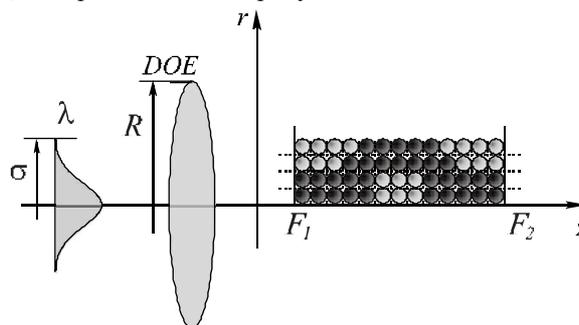


Рис. 1. Оптическая схема формирования «световой бутылки»

Радиально-симметричный ДОЭ рассчитывался в рамках параксиального приближения. Область фокусировки была представлена в виде набора дифракционных пятен размером  $\Delta = \frac{\lambda f}{2R}$ , где  $\lambda$  – длина волны освещающего пучка,  $f$  – расстояние от плоскости установки оптического элемента,  $R$  – радиус апертуры ДОЭ. В области формирования заданного пятна выбиралась из соображения функционального назначения элемента – 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. Взаимное расположение дифракционных пятен вблизи оптической оси, яркость в которых контролировалась в процессе расчёта, представлено на рис. 2.

Были выбраны следующие параметры оптимизации бинарного оптического фазового элемента: гауссов освещающий пучок с длиной волны  $\lambda=633$  нм и радиусом перетяжки  $\sigma=0,5$  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  $F_1=50$  мм до  $F_2=55$  мм от плоскости установки элемента; область низкой интенсивности (внутренняя область оптической ловушки) имеет длину 2 мм.

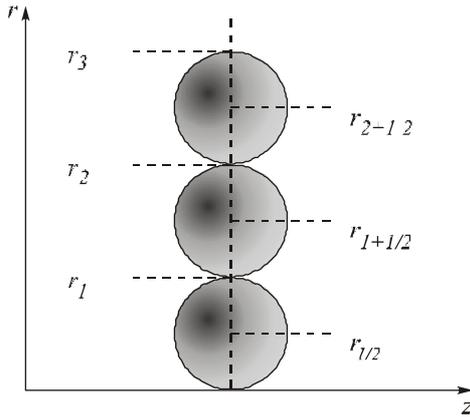


Рис.2. Взаимное расположение дифракционных пятен  
близки оптической оси,  $r_n = n\Delta$

В качестве эталонного распределения интенсивности было принято распределение, представленное на рис. 3. Сплошной линией показано заданное распределение интенсивности ближайшего к оптической оси дифракционного пятна в зависимости от расстояния от плоскости установки ДОЭ, прерывистой линией – второго от оптической оси дифракционного пятна.

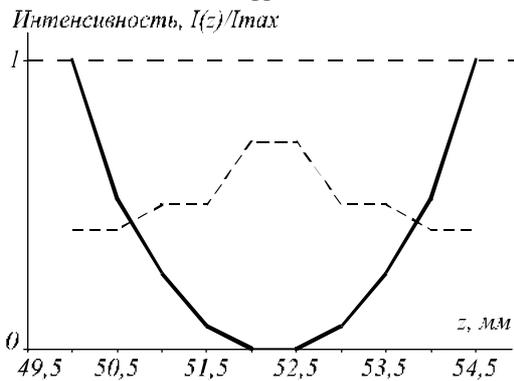


Рис.3. Заданное распределение интенсивности. Сплошная линия – заданная интенсивность первого дифракционного пятна, пунктирная – второго дифракционного пятна

В ходе работы оптимизационного алгоритма минимизировался функционал:

$$\Phi(z_i, r_j) = c_i \cdot \left( \exp \left( \frac{\bar{I}(z_i, r_j) - I(z_i, r_j)}{\bar{I}(z_i, r_j)} \right) - 1 \right), \quad (1)$$

если  $\bar{I}(z_i, r_j) > 0$

$$\Phi(z_i, r_j) = c_i \cdot \left( \exp \left( \frac{I(z_i, r_j)}{\bar{I}_{cp}} \right) - 1 \right),$$

если  $\bar{I}(z_i, r_j) = 0$

где  $c_i = \exp \left( 12 \left[ \left( \frac{z_i}{z_1} \right)^2 - 1 \right] \right), \quad (2)$

где  $I(z_i, r_j)$  – интенсивность, которую формирует ДОЭ в точке  $(z_i, r_j)$ ,  $\bar{I}(z_i, r_j)$  – заданный уровень интенсивности в точке  $(z_i, r_j)$ ,  $z_i$  – расстояние на оптической оси от источника излучения,  $r_j$  – ради-

альное расстояние от оси до центра дифракционного пятна,  $\bar{I}_{cp}$  – средний уровень заданной интенсивности  $\bar{I}(z_i, r_j)$  по области формирования ловушки,  $c_i$  – коэффициент, учитывающий спад уровня интенсивности по мере удаления от источника излучения (выбор значения этого коэффициента позволяет управлять соотношением значений интенсивности на оптической оси непосредственно перед теневой областью и за ней).

В данном функционале был использован метод экспоненцирования для лучшей сходимости алгоритма. Выбор коэффициента  $c_i$  (2) позволил «выровнять» правый и левый максимумы интенсивности первого дифракционного пятна (рис. 3).

Отметим сильную зависимость эффективности применения генетического алгоритма к минимизации функционала (1) от конфигурации алгоритма – в частности, от значений вероятности применения генетических операторов (мутации и скрещивания) [35].

В результате работы оптимизационного алгоритма была получена фаза бинарного ДОЭ, формирующего световое распределение типа «световая бутылка». Фазовая функция представлена на рис. 4. Белый цвет соответствует значению фазовой функции  $\pi$ , чёрный цвет – 0.

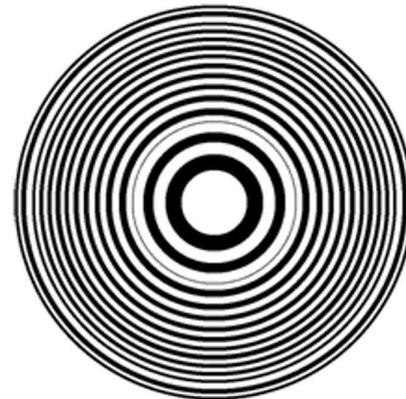


Рис. 4. Фазовая функция ДОЭ, формирующего световое распределение типа «световая бутылка»

На рис. 5 изображено распределение интенсивности, формируемое рассчитанным ДОЭ (результат моделирования), с наложенным эталонным распределением. На рис. 6 изображено распределение интенсивности первых четырёх дифракционных пятен, формируемых рассчитанным ДОЭ.

На рис. 7а приведено двумерное распределение интенсивности, формируемое рассчитанным ДОЭ (результат моделирования, негативное изображение). На рисунке 7б приведено распределение интенсивности в области формирования «световой бутылки», рассчитанное с помощью преобразования Френеля.

Численное моделирование показало, что средняя дифракционная эффективность [42,43] формирования заданного радиально-симметричного распределения интенсивности на всей протяжённости фокальной области вдоль оптической оси составило около 22%.

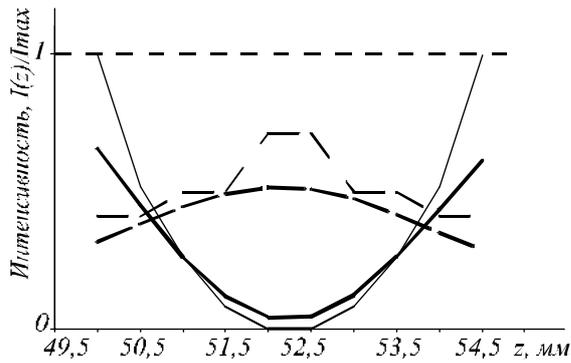


Рис. 5. Распределение интенсивности, формируемое рассчитанным ДОО. Толстые сплошная и пунктирная линии – сформированное рассчитанным ДОО распределение интенсивности первого и второго дифракционных пятен, соответственно. Тонкие сплошная и пунктирная линии – эталонное распределение интенсивности первого и второго дифракционных пятен, соответственно

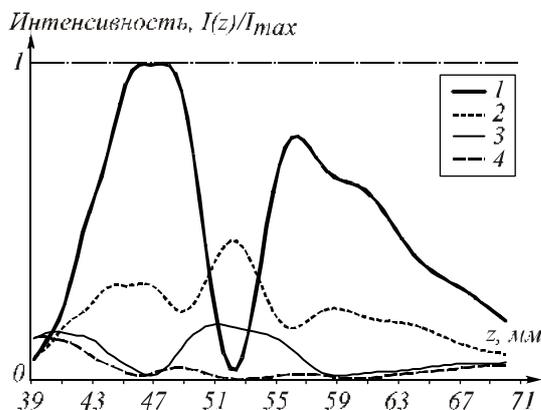


Рис. 6. Распределение интенсивности первых четырёх дифракционных пятен, формируемое рассчитанным ДОО (результат численного моделирования)

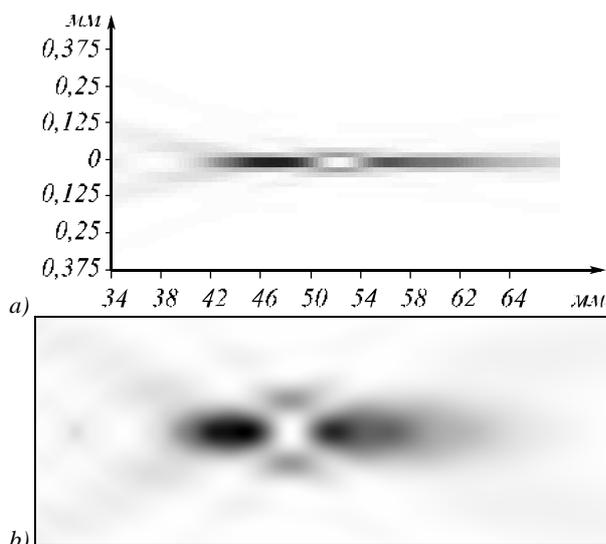


Рис. 7. Двумерное распределение интенсивности, формируемое рассчитанным ДОО вдоль оптической оси (результат численного моделирования, негативное изображение) (a), распределение интенсивности в области формирования «световой бутылки» (результат численного моделирования, негативное изображение) (b)

## Заключение

Результаты вычислительных экспериментов показали целесообразность применения предложенной численной оптимизационной процедуры к расчёту бинарных дифракционных оптических элементов, формирующих световое распределение типа «световая бутылка».

К достоинствам рассмотренного подхода следует отнести то, что рассчитанные предложенной процедурой бинарные радиально-симметричные ДОО относительно просты в изготовлении.

Кроме того, предложенная процедура предоставляет возможности управления соотношением интенсивности «светового барьера» оптической ловушки в различных направлениях.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.0041), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а.

## 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 // *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. **Сойфер, В.А.** Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порождённые дифракционной оптикой / В.А. Сойфер, 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. **Сойфер, В.А.** Вращение микрочастиц в световых полях / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина, Р.В.

- Скиданов // Компьютерная оптика. – 2008. – № 28. – С. 5-17.
11. **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.
  12. **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.
  13. **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.
  14. **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.
  15. **Балалаев, С.А.** Исследование возможности формирования гипергеометрических лазерных пучков методами дифракционной оптики / С.А. Балалаев, С.Н. Хонина, Р.В.Скиданов // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2008. – Т. 10. – № 3. – С. 694-706.
  16. **Khonina, S.N.** DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.
  17. **Скиданов, Р.В.** Экспериментальное исследование движения диэлектрических шариков в световых пучках с угловыми гармониками высоких порядков / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31. – № 1. – С. 14-21.
  18. **de Angelis, M.** Axially symmetric hollow beams using refractive conical lenses / M. de Angelis, L. Cacciapuoti, G. Pierattini, and G. M. Tino // *Opt. Lasers Eng.* – 2003. – Vol. 39. – P. 283-291.
  19. **Wei, M.-D.** Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon / M.-D. Wei, W.-L. Shiao, and Y.-T. Lin // *Opt. Commun.* – 2005. – Vol. 248. – P. 7-14.
  20. **Zeng, X.** The analytical description and experiments of the optical bottle generated by an axicon and a lens / X. Zeng and F. Wu // *J. Mod. Opt.* – 2008. – Vol. 55. – P. 3071-3081.
  21. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*, ed. Victor A. Soifer – John Wiley & Sons, Inc., New York. 2002. 765 p.
  22. **Досколович, Л.Л.** Сравнительный анализ аналитических и итерационных методов решения задачи фокусировки в отрезок / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, С.И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. – 1993. – № 13. – С.16-29.
  23. **Doskolovich, L.L.** Comparative analysis of different focusators into segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Optics and Laser Technology*. – 1995. – Vol.27. – № 4. – P. 207-213.
  24. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik*. – 1995. – Vol.101. – № 2. – P. 37-41.
  25. **Досколович Л.Л.** Анализ квазипериодических и геометрических решений задачи фокусировки в продольный отрезок / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. – 1996. – № 16. – С. 4-8.
  26. **Kotlyar, V.V.** An algorithm for the generation of laser beams with longitudinal periodicity: rotating images / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1997. – Vol. 44. – N. 7. – P. 1409-1416.
  27. **Chavez-Cerda, S.** Interference of traveling nondiffracting beams / S. Chavez-Cerda, M. A. Meneses-Nava, and J. Miguel Hickmann // *Opt. Lett.* – 1998. – Vol. 23. – P. 1871-1873.
  28. **Голуб, М.А.** Вычислительный эксперимент с элементами плоской оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, И.Н. Сисакин, В.А. Сойфер // *Автометрия*. – 1988. – № 1. – С. 70-82.
  29. **Голуб, М.А.** Математическая модель фокусировки излучения элементами компьютерной оптики / М.А. Голуб, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // *Научное приборостроение*. – 1993. – Т.3, – № 1. – С. 9-23.
  30. **Харитонов, С.И.** Асимптотический метод расчёта поля от оптических элементов, обладающих зонной структурой / С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, М.Л. Каляев // *Компьютерная оптика*. – 2007. – Т. 31. – № 4. – С. 7-18.
  31. **Martínez-Corral, M.** Tailoring the axial shape of the point spread function using the Toraldo concept / M. Martínez-Corral, M. T. Caballero, E. H. K. Stelzer and J. Swoger // *Optics Express*. – 2002. – Vol. 10(1). – P. 98-103.
  32. **Chen, W.** Three-dimensional focus shaping with cylindrical vector beams / W. Chen and Q. Zhan // *Opt. Commun.* – 2006. – Vol. 265. – P. 411-417.
  33. **Menon, R.** Design of diffractive lenses that generate optical nulls without phase singularities / R. Menon, P. Rogge, H.-Y. Tsai // *J. Opt. Soc. Am. A* – 2009. – Vol. 26(2). – P. 297-304.
  34. **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.
  35. **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. – No 1. – P. 69 - 76.
  36. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.L. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1992. – Vol.39(6). – P.1245-1251.
  37. **Досколович, Л.Л.** Расчёт двухпорядковых фокусаторов / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // *Автометрия*. – 1993, № 1. – С.58-63.
  38. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optical Engineering*. – 1994. – Vol.33(11). – P.3610-3615.
  39. **Досколович, Л.Л.** Расчёт дифракционных оптических элементов для фокусировки во внесосевые радиальные фокальные области / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.С. Павельев, В.А. Сойфер // *Автометрия*. – 1995, № 1. – С.114-119.
  40. **Досколович, Л.Л.** Расчет бинарных дифракционных оптических элементов для фокусировки в заданную двумерную область / Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер // *Автометрия*. – 1995, № 5. – С.42-50.
  41. **Soifer, V.A.** Synthesis of a Binary DOE Focusing into an Arbitrary Curve, Using the Electromagnetic Approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1998. – Vol.29(4-5). – P. 237-247.

42. **Kotlyar, V.V.** Iterative calculation of diffractive optical elements focusing into a three dimensional domain and the surface of the body of rotation / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *J. Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1509-1524.
43. **Doskolovich, L.L.** A method for estimating the DOE's energy efficiency / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, A. Ye. Tzaregorodtzev // *Optics and Laser Technology*. – 1995. – Vol.27(4). – P.219-221.

### 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 // *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 manipulation of microobjects: achievements and new abilities which allows diffractive optics / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina // *Physics of elementary particles and atomic nucleus*. – 2004. – Vol. 35(6). – P. 1368-1432 (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. **Soifer, V.A.** Rotation of microparticles in light fields / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina., R.V. Skidanov // *Computer Optics*. – 2008. – N 28. – P. 5-17(in Russian).
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **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.
15. **Balalaev, S.A.** Investigation of possibility to form hypergeometric laser beams by methods of diffractive optics / S.A. Balalaev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov // *Izvest. SNC RAS*. – 2008. – Vol. 10. – № 3. – P. 694-706 (in Russian).
16. **Khonina, S.N.** DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation // *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.
17. **Skidanov, R.V.** Experimental investigation of dielectric spheres moving in light beams with high angle harmonics / R.V. Skidanov, S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer // *Computer Optics*. – 2007. – V. 31. – № 1. – P. 14-21.
18. **de Angelis, M.** Axially symmetric hollow beams using refractive conical lenses / M. de Angelis, L. Cacciapuoti, G. Pierattini, and G. M. Tino // *Opt. Lasers Eng.* – 2003. – Vol. 39. – P. 283–291.
19. **Wei, M.-D.** Adjustable generation of bottle and hollow beams using an axicon / M.-D. Wei, W.-L. Shiao, and Y.-T. Lin // *Opt. Commun.* – 2005. – Vol. 248. – P. 7–14.
20. **Zeng, X.** The analytical description and experiments of the optical bottle generated by an axicon and a lens / X. Zeng and F. Wu // *J. Mod. Opt.* – 2008. – Vol. 55. – P. 3071–3081.
21. *Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements*, ed. Victor A. Soifer – John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. – 765 p.
22. **Doskolovich, L.L.** Comparative analysis of analytic and iterative methods for solution of task of focusing into line segment/ L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, S.I. Kharitonov // *Computer Optics*. 1993. – № 13. – P.16-29 (in Russian).
23. **Doskolovich, L.L.** Comparative analysis of different focusators into segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Optics and Laser Technology*. – 1995. – Vol.27. – № 4. – P. 207-213.
24. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the problem of focusing into an axial segment / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer, A.Ye. Tzaregorodtzev // *Optik*. – 1995. – Vol.101. – № 2. – P. 37-41.
25. **Doskolovich, L.L.** Analysis of quasiperiodic and geometric optical solutions of the axial segment focusing problem / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Computer Optics*. – 1996. – N. 16. – P. 4-8 (in Russian).
26. **Kotlyar, V.V.** An algorithm for the generation of laser beams with longitudinal periodicity: rotating images / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1997. – Vol. 44. – N. 7. – P. 1409-1416.
27. **Chavez-Cerda, S.** Interference of traveling nondiffracting beams / S. Chavez-Cerda, M. A. Meneses-Nava, and J. Miguel Hickmann // *Opt. Lett.* – 1998. – Vol. 23. – P. 1871–1873.
28. **Golub, M.A.** Computational experiment with plane optical elements/ M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, I.N. Sissakian, V.A. Soifer // *Avtometriya*. – 1988. – № 1. – P. 70-82 (in Russian).
29. **Golub, M.A.** Mathematical model of irradiation focusing by elements of computer optics/ M.A. Golub, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Nauchnoe priborostroeniye*. – 1993. – V.3, – № 1. – P. 9-23 (In Russian).
30. **Kharitonov, S.I.** Asymptotic method of field calculation for zone-structured optical elements/ S.I. Kharitonov, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, M.L. Kalyaev // *Computer Optics*. – 2007. – V. 31. – № 4. – P. 7-18 (in Russian).
31. **Martínez-Corral, M.** Tailoring the axial shape of the point spread function using the Toraldo concept / M. Martínez-Corral, M. T. Caballero, E. H. K. Stelzer and J. Swoger // *Optics Express*. – 2002. – Vol. 10(1). – P. 98-103.

32. **Chen, W.** Three-dimensional focus shaping with cylindrical vector beams / W. Chen and Q. Zhan // *Opt. Commun.* – 2006. – Vol. 265. – P. 411–417.
33. **Menon, R.** Design of diffractive lenses that generate optical nulls without phase singularities / R. Menon, P. Rogge, H.-Y. Tsai // *J. Opt. Soc. Am. A* – 2009. – Vol. 26(2). – P. 297-304.
34. **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.
35. **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. – No 1. – P. 69 - 76.
36. **Golub M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.L. Kharitonov, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics.* – 1992. – Vol.39(6). – P.1245-1251.
37. **Doskolovich, L.L.** Design of two-order focusators/ L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Avtometriya.* – 1993, – № 1. – P.58-63 (in Russian).
38. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // *Optical Engineering.* – 1994. – Vol.33(11). – P.3610-3615.
39. **Doskolovich, L.L.** Design of diffractive optical elements for focusing into axial radial focal domains / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, V.A. Soifer // *Avtometriya.* – 1995, № 1. – P.114-119 (in Russian).
40. **Doskolovich, L.L.** Design of binary diffractive optical elements for focusing into pre-given two-dimensional domain/ L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // *Avtometriya.* – 1995, № 5. – P.42-50 (in Russian).
41. **Soifer, V.A.** Synthesis of a Binary DOE Focusing into an Arbitrary Curve, Using the Electromagnetic Approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // *Optics and Lasers in Engineering.* – 1998. – Vol.29(4-5). – P. 237-247.
42. **Kotlyar, V.V.** Iterative calculation of diffractive optical elements focusing into a three dimensional domain and the surface of the body of rotation / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *J. Modern Optics.* – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1509-1524.
43. **Doskolovich, L.L.** A method for estimating the DOE's energy efficiency / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, A. Ye. Tzaregorodzev // *Optics and Laser Technology.* - 1995. - Vol.27(4). - P.219-221.

### OPTIMIZATION OF BINARY DOE FOR FORMATION OF THE “LIGHT BOTTLE”

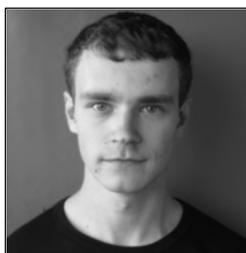
*D.G. Kachalov<sup>1</sup>, K.A. Gamazkov<sup>1</sup>, V.S. Pavelyev<sup>1,2</sup>, S.N. Khonina<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,  
<sup>2</sup> Image Processing Systems Institute of the RAS*

#### Abstract

The numerical procedure for optimization of binary diffractive optical elements forming light distribution “light bottle” is developed and investigated. The developed numerical procedure is based on modification of well-known genetic algorithm. The results of numerical experiments are presented.

*Key words:* genetic algorithm, light bottle, binary diffractive optical elements.

#### Сведения об авторах



**Гамазков Кирилл Анатольевич**, выпускник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: дифракционная оптика, методы стохастической оптимизации. E-mail: [gamazkov.kirill@gmail.com](mailto:gamazkov.kirill@gmail.com).

**Kirill Anatolievich Gamazkov** graduated from Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov. Research interests: diffractive optics, methods of stochastic optimization.

*Сведения об остальных авторах расположены на других страницах этого выпуска:  
 Качалов Д. Г. – стр. 46, Павельев В.С. – стр. 45, Хонина С.Н. – стр. 20.*

*Поступила в редакцию 4 марта 2011 г.*