

Исследование формирования полиморфных пучков с использованием фазовых дифракционных оптических элементов

Л.Г. Ахметов¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе рассматриваются подходы быстрого расчета (с ориентацией на применение динамического модулятора света) фазовых дифракционных оптических элементов, предназначенных для формирования заданной двумерной кривой в фокальной плоскости линзы. Рассмотрены два подхода расчета комплексной функции пропускания амплитудно-фазового элемента: на основе быстрого преобразования Фурье и применении параметрического интегрирования. Кодирование рассчитанного распределения в чисто фазовое выполняется с использованием метода Лезема. Контурные фигуры, обладающие высокими градиентами интенсивности и заданными фазовыми градиентами, могут использоваться в таких областях, как оптический захват и микроманипулирование микрочастицами, а также при лазерной обработке и структурировании материалов.

1. Введение

Оптический захват и манипулирование микрочастицами является одним из востребованных приложений лазерного излучения. На данный момент давление света – давно и хорошо изученное явление. И сегодня давление света рассматривается в контексте взаимодействия фотонов с веществом. Закон сохранения импульса может объяснить наличие сил, действующих на тела в световом пучке, при поглощении и рассеивании фотонов.

С изобретением лазеров, появился повышенный интерес к области манипулирования мелкими частицами. Общеизвестным является наличие сил, пропорциональных оптическому току $\vec{j}(r) = I(\vec{r})\vec{\nabla}\Phi(\vec{r})$, где $I(\vec{r})$ и $\Phi(\vec{r})$ – распределение интенсивности и фазы пучка [1-3]. Эффективность применения лазеров была показана не только в задаче оптического захвата и микроманипулирования [4-11], но и при лазерной обработке материалов [12-18].

С целью увеличения сил для манипулирования объектов или поверхностного структурирования логично использовать пучки с большими градиентами интенсивности и фазы [19-23]. Оказалось, что эти оптические силы оказались пригодны также для захвата и переноса частиц в трехмерном пространстве, причем стабильный захват может быть осуществлен за счет сильного продольного градиента интенсивности при острой фокусировке [2, 24, 25] или за счет воздействия встречных пучков [26, 27] а также за счет интерференционных эффектов [28, 29]. Для осуществления этих операций разработаны различные методы формирования пучков [30-32], в том числе, на основе применения дифракционных оптических элементов и динамических модуляторов света [33-42].

В данной работе рассматриваются подходы быстрого расчета (с ориентацией на применение динамического модулятора света) фазовых дифракционных оптических элементов, предназначенных для формирования заданной двумерной кривой в фокальной плоскости линзы. Рассмотрены два подхода расчета комплексной функции пропускания амплитудно-фазового элемента: на основе быстрого преобразования Фурье и применении параметрического интегрирования. Кодирование рассчитанного распределения в чисто фазовое выполняется с использованием метода Лезема [43].

2. Теоретические основы

Для расчета комплексной функции пропускания $E(x, y)$ амплитудно-фазовых элементов, предназначенных для формирования заданного поля $p(u, v)$ в фокальной плоскости линзы с фокусным расстоянием f и длиной волны лазерного излучения λ можно воспользоваться преобразованием Фурье:

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(u, v) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] du dv, \quad (1)$$

С учетом свойств пространственных модуляторов света и технологических возможностей изготовления дифракционных оптических элементов, необходимо выполнить кодирование амплитудно-фазовой функции, которая получается в (1), в чисто фазовую (реже амплитудную) функцию. Для этих целей применяют различные итерационные методы [33, 44, 45], алгоритмы перебора [46-48] и методы кодирования [49-52]. Первые два метода требуют определенных временных затрат, поэтому их проблематично применять в задачах оптического манипулирования, где желательно динамически управлять как положением, так и видом оптической ловушки. В этом случае применяют методы кодирования или быстрые алгоритмы расчета [53, 54]. В данной работе используется как быстрые алгоритмы расчета, так и кодирование с помощью метода Лезема [43].

Быстрый расчет интеграла (1) можно выполнить с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье, однако в этом случае теряется явная связь с физическими параметрами формируемых полей.

В статье [23] под авторством Jose A. Rodrigo предлагается вычислять комплексную амплитуду оптического элемента с использованием параметрического интеграла:

$$E(x, y) = \int_0^T g(t) \exp \left[-i \frac{k}{f} R(t) (x \cos t + y \sin t) \right] dt \quad (2)$$

Прохождение поля $E(x, y)$ через линзу описывается преобразованием Фурье. При вычислении преобразование Фурье $\tilde{E}(u, v)$ от поля $E(x, y)$, заданного по формуле (2) мы получим:

$$\begin{aligned} \tilde{E}(u, v) &= \frac{1}{i\lambda f} \int E(x, y) \exp \left[-i \frac{k}{f} (xu + yv) \right] dx dy = \\ &= i^{-1} \lambda f \int_0^T g(t) \delta(u + R(t) \cos t) \delta(v + R(t) \sin t) dt \end{aligned}$$

Учитывая свойства δ -функции:

$$\delta(f(u, v)) = \begin{cases} \frac{1}{|\nabla f(u, v)|}, & \text{при } f(u, v) = 0 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где $|\nabla f(u, v)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial v}\right)^2}$

И отсюда мы можем вывести, что амплитуда комплексного поля описывается двумерным полем $\tilde{E}(u, v)$, с заданной кривой $\vec{c}(t) = (u(t), v(t))$, где $u(t) = -R(t) \cos t$ и $v(t) = -R(t) \sin t$.

Амплитуда поля задается как: $|\tilde{E}(t)| = g(t) \left(\frac{\lambda f}{L}\right) |\vec{c}'(t)|$,

где $|\vec{c}'(t)| = \sqrt{u'(t)^2 + v'(t)^2} = \sqrt{R'(t)^2 + R(t)^2}$, где $L = \int_0^T |\vec{c}'(t)| dt$ – длина кривой.

В свою очередь $g(t)$ можно расписать как: $g(t) = |g(t)| \exp(i\Psi) = |g(t)| \exp\left(i \frac{2\pi l}{S(t)} S(t)\right)$, где $S(t)$ – функция, задающая изменение фазы вдоль кривой.

Параметр l отвечает за фазовое накопление вдоль кривой. И оптический ток выражается как: $j = |\vec{E}(t)|^2 \nabla \Psi$

Таким образом, оптический элемент (2) будет формировать кривую, форма которой описывается функцией $R(t)$, а распределение на ней – функцией $g(t)$.

В качестве универсальной формулы, описывающей различные кривые, можно использовать следующее выражение [55]:

$$R(t) = \rho(t) \left[\left| \frac{1}{a} \cos\left(\frac{m}{4}t\right) \right|^{n_2} + \left| \frac{1}{b} \sin\left(\frac{m}{4}t\right) \right|^{n_3} \right]^{-1/n_1} \quad (3)$$

Это параметрическая запись кривой, где действительные числа: a, b, n_1, n_2, n_3, m определяют форму кривой, а функция $\rho(t)$ является непериодической функцией от t , которая позволяет строить ассиметричные и спиралевидные фигуры [55], $\rho(t)$ подбирался с тем условием, чтобы $R(t) < 1$.

Таблица 1. Значения коэффициентов для формулы (1), используемых в расчетах [56].

Фигура	Имя в программе	$\rho(t)$	a	b	n_1	n_2	n_3	m
circle	r0	1	1	1	1	1	1	0
rose	r1	0.41	1.6	1	1.5	2	7.5	12
sandglass	r2	0.4	0.9	10	4.2	17	1.5	4
modified-square	r3	0.74	1	1	15	15	15	4
starfish	r4	0.0001	10	10	2	7	7	5
spiral	r5	0.044 t	1	1	5	5	5	10
modified-triangle blunt	r6	0.588	1	1	8.5	15	15	3
modified-triangle sharp	r7	1.04	0.7	0.7	24	45	45	3

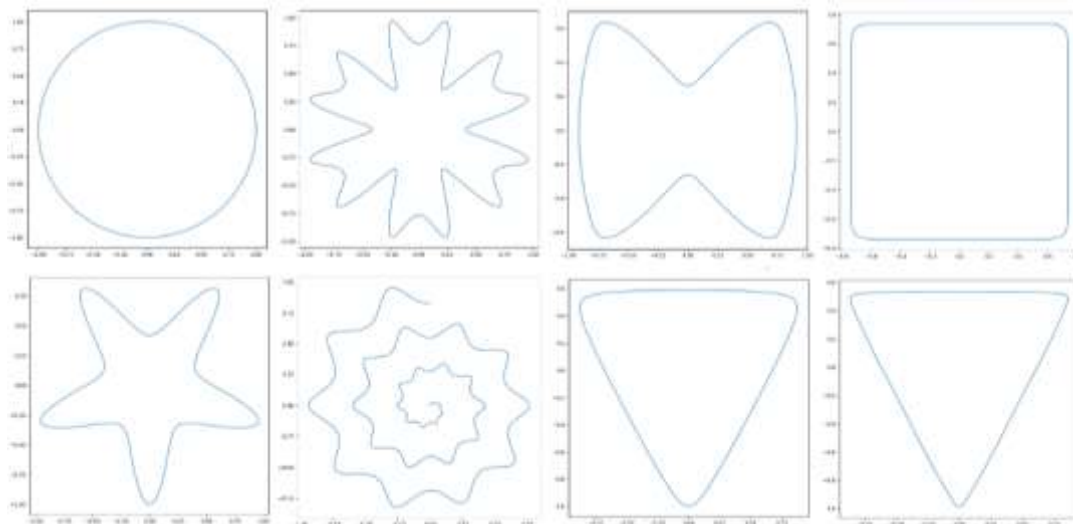


Рисунок 1. Параметрически заданные кривые r0, r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7.

3. Расчет комплексной функции пропускания оптического элемента

На языках C++ и Python была написана программа, реализующая вычисление интеграла (2) в каждой точке отсчета поля заданного размера.

При отсутствии градиента интенсивности и фазы ($g = 1$) амплитуда картинка вычисленной по формуле (2) и амплитуда, полученная с помощью БПФ очень сильно похожи. Это отчетливо видно на рисунке 2. БПФ вычислялось при помощи библиотеки numpy.fft.

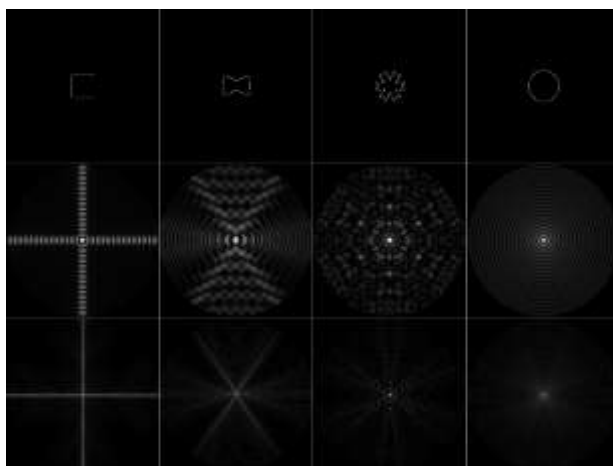


Рисунок 2. В левом столбце отрисованные параметрические кривые r_0, r_1, r_2 и r_3 . Центральный столбец – картинки, вычисленные по формуле (2) при $g = 1$. Правый столбец – БПФ, вычисленное от соответствующих картинок из левого столбца.

4. Моделирование формирования плоских кривых

Если мы возьмем преобразование Фурье от поля $E(x, y)$, то мы получим изображение фигуры, которое описывается параметрической формулой $R(t)$.

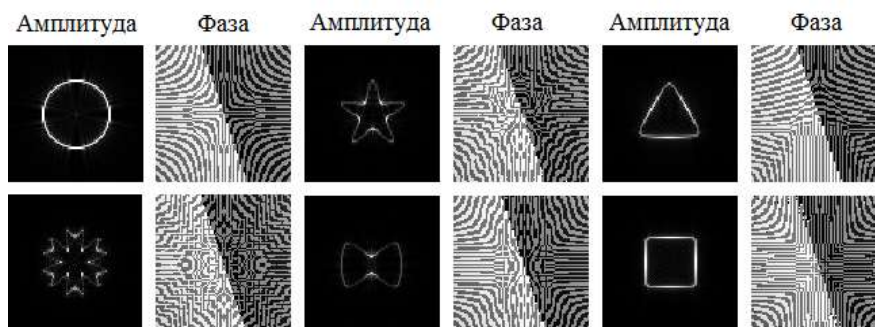


Рисунок 3. Амплитуда и фаза полученных полей в фокальной плоскости линзы.

Формула (2) позволяет нам задавать градиенты амплитуды вдоль заданной прямой.

На рисунке 3 фигуры в фокальной плоскости линзы имеют нулевой градиент интенсивности. То есть интенсивность вдоль заданной кривой – постоянная величина. Они были получены при $g = 1$.

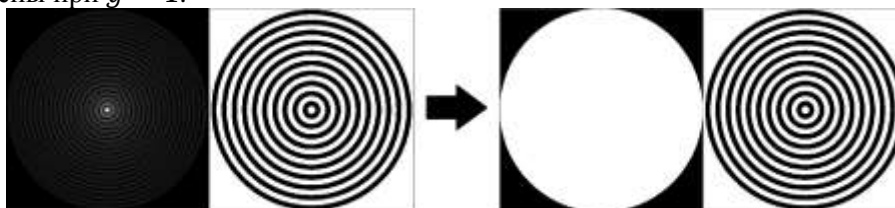


Рисунок 4. Иллюстрация метода кодирования Лезема.

При оптической реализации желательно иметь чисто фазовое распределение комплексной амплитуды дифракционного элемента. Для этого был использован метод кодирования Лезема, состоящий в замене амплитудного распределения на постоянное значение. Иллюстрация этого метода показана на рис. 4.

На рис. 6 мы можем сравнить поля, полученные с помощью кодирования Лезема, после преобразования линзы. Можно отметить, что они подверглись незначительным искажениям, поэтому в реальном опыте можно моделировать изображения, задавая только фазовое поле.

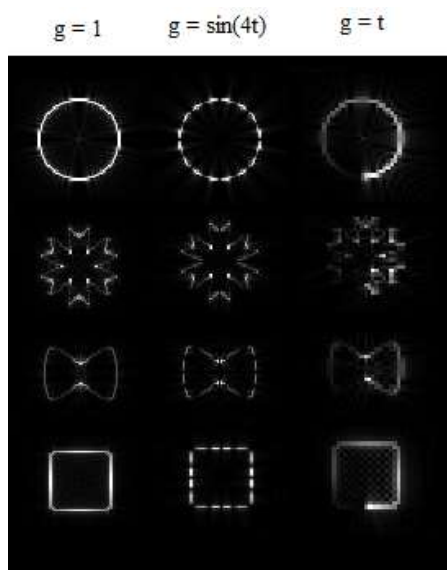


Рисунок 5. Вид амплитуды поля после линзы при $g = 1$; $\sin(4t)$; t .

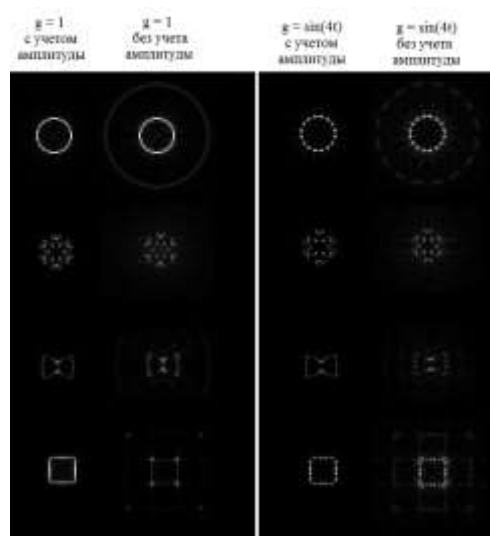


Рисунок 6. Амплитуда поля в фокальной плоскости линзы с учетом амплитуды и с откидыванием амплитуды.

5. Заключение

В данной работе было выполнено моделирование пучков, которые могут применяться при манипулировании микрообъектами, произведена оценка изменений при кодировании комплексной амплитуды, рассмотрены некоторые примеры с заданием градиента амплитуды.

6. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-07-01470 А).

7. Литература

- [1] Ashkin, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // *Physical Review Letters*. – 1970. – Vol. 24(4). – P. 156-159. DOI: 10.1103/PhysRevLett.24.156.
- [2] Ashkin, A. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles / A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu // *Optics Letters*. – 1986. – Vol. 11(5). – P. 288-290. DOI: 10.1364/OL.11.000288.
- [3] Berry, M.V. Optical currents // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* – 2009. – Vol. 11. – P. 094001.
- [4] Svoboda, K. Optical trapping of metallic Rayleigh particles / K. Svoboda, S.M. Block // *Optics Letters*. – 1994. – Vol. 19(13). – P. 930-932.
- [5] Nieminen, T.A. Calculation and optical measurement of laser trapping forces on non-spherical particles / T.A. Nieminen, H. Rubinsztein-Dunlop, N.R. Heckenberg // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2001. – Vol. 70(4-6). – P. 627-637.
- [6] 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 // *Proceedings of SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.
- [7] Dienerowitz, M. Optical manipulation of nanoparticles: a review / M. Dienerowitz, M. Mazilu, K. Dholakia // *Journal of Nanophotonics*. – 2008. – Vol. 2(1). – P. 021875. DOI: 10.1117/1.2992045.
- [8] Скиданов, Р.В. Оптическая микроманипуляция с использованием бинарного динамического модулятора света / Р.В. Скиданов, С.Н. Хонина, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 361-365.
- [9] Хонина, С.Н. Формирование лазерных пучков Эйри с помощью бинарно-кодированных дифракционных оптических элементов для манипулирования микрочастицами / С.Н.

- Хонина, Р.В. Скиданов, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 138-146.
- [10] Maragò, O.M. Optical trapping and manipulation of nanostructures / O.M. Maragò, H.J. Philip, G.G. Pietro, V. Giovanni, C.F. Andrea // Nature Nanotechnology. – 2013. – Vol. 8. – P. 807-819.
- [11] Bradac, C. Nanoscale optical trapping: A review. Advanced // Optical Materials. – 2018. – Vol. 6(12). – P. 1800005. DOI: 10.1002/adom.201800005.
- [12] Steen, W.M. Laser material processing – London: Springer, 2003.
- [13] Sun, H.-B. Two-photon photopolymerization and 3D lithographic microfabrication / H.-B. Sun, S. Kawata // Advances in Polymer Science. – 2004. – Vol. 170. – P. 169-273.
- [14] Meier, M. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation / M. Meier, V. Romano, T. Feurer // Applied Physics A. – 2007. – Vol. 86. – P. 329-334.
- [15] Cheng, J. A review of ultrafast laser materials micromachining / J. Cheng, C. Liu, S. Shang, D. Liu, W. Perrie, G. Dearden, K. Watkins // Optics and Laser Technology. – 2013. – Vol. 46. – P. 88-102.
- [16] Kuchmizhak, A.A. Multi-beam pulsed-laser patterning of plasmonic films using broadband diffractive optical elements / A.A. Kuchmizhak, A.P. Porfirev, S.A. Syubaev, P.A. Danilov, A.A. Ionin, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin, S.N. Khonina, S.I. Kudryashov // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42(14). – P. 2838-2841. DOI: 10.1364/OL.42.002838.
- [17] Подлипнов, В.В. Исследование фотоиндуцированного формирования микроструктур на поверхности карбазолсодержащего азополимера в зависимости от плотности мощности освещающего пучка / В.В. Подлипнов, Н.А. Ивлиев, С.Н. Хонина, Д.В. Нестеренко, В.С. Васильев, Е.А. Акимова // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 779-785. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-779-785.
- [18] Хонина, С.Н. Анализ характеристик параксиальных векторных Гауссовых пучков, влияющих на формирование микроструктур в азополимере / С.Н. Хонина, С.И. Харитонов, С.Г. Волоотовский, В.В. Подлипнов, Н.А. Ивлиев // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 780-788.
- [19] Gordon, J.P. Radiation forces and momenta in dielectric media // Physical Review A. – 1973. – Vol. 8(1). – P. 14-21.
- [20] Ashkin, A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime // Biophysical Journal. – 1992. – Vol. 61. – P. 569-582.
- [21] Harada, Y. Radiation forces on a dielectric sphere in the Rayleigh scattering regime / Y. Harada, T. Asakura // Optics Communications. – 1996. – Vol. 124(5-6). – P. 529-541.
- [22] Roichman, Y. Optical Forces Arising from Phase Gradients / Y. Roichman, B. Sun, Y. Roichman, J. Amato-Grill, D. Grier // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100. – P. 8-11.
- [23] Rodrigo, J.A. Polymorphic beams and Nature inspired circuits for optical current / J.A. Rodrigo, T. Alieva // Sci. Rep. – 2016. – Vol. 6. – P. 35341. DOI: 10.1038/srep35341.
- [24] Higurashi, E. Optically induced angular alignment of trapped birefringent microobjects by linear polarization / E. Higurashi, R. Sawada, T. Ito // Appl. Phys. Lett. – 1998. – Vol. 73. – P. 3034.
- [25] Lin, J. Optical trapping and rotation of airborne absorbing particles with a single focused laser beam / J. Lin, Y.-Q. Li // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104(10). – P. 101909.
- [26] Ashkin, A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // Phys. Rev. Lett. – 1970. – Vol. 24(4). – P. 156-159.
- [27] Freearge, T.G.M. Confinement and manipulation of atoms using short laser pulses / T.G.M. Freearge, J. Walz, T.W. Hansch // Opt. Commun. – 1995. – Vol. 117. – P. 262-267.
- [28] Arlt, J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: the optical bottle beam / J. Arlt, M.J. Padgett // Opt. Lett. – 2000. – Vol. 25(4). – P. 191-193.
- [29] Skidanov, R. Three-dimensional laser trapping on the base of binary radial diffractive optical element / R. Skidanov, S. Khonina, A. Porfirev, V. Pavelyev, D. Kachalov // Journal of Modern Optics. – 2015. – Vol. 62(14). – P. 1183-1186. DOI: 10.1080/09500340.2015.1024772.

- [30] Dholakia, K. Optical tweezers: the next generation / K. Dholakia, G. Spalding, M. MacDonald // *Physics World*. – 2002. – P. 31-35.
- [31] Сойфер, В.А. Оптическое манипулирование микрообъектами: достижения и новые возможности, порожденные дифракционной оптикой / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 2004. – Т. 35, № 6. – С. 1368-1432.
- [32] Dienerowitz, M. Optical manipulation of nanoparticles: a review / M. Dienerowitz, M. Mazilu, K. Dholakia // *J Nanophotonics*. – 2008. – Vol. 2. – P. 021875.
- [33] 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 // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43(7). – P. 1509-1524.
- [34] Curtis, J.E. Dynamic holographic optical tweezers / J.E. Curtis, B.A. Koss, D.G. Grier // *Opt. Commun.* – 2002. – Vol. 207. – P. 169-175.
- [35] Eriksen, R.L. Fully dynamic multiple-beam optical tweezers / R.L. Eriksen, V.R. Daria, J. Gléuckstad // *Opt. Express*. – 2002. – Vol. 10(14). – P. 597-602.
- [36] Khonina, S.N. Engineering the smallest 3D symmetrical bright and dark focal spots / S.N. Khonina, I. Golub // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2013. – Vol. 30(10). – P. 2029-2033. DOI: 10.1364/JOSAA.30.002029.
- [37] Rodrigo, J.A. Shaping of light beams along curves in three dimensions // *Optics Express*, 2013.
- [38] Rodrigo, J.A. Shaping of light beams along curves in three dimensions / J.A. Rodrigo, T. Alieva, E. Abramochkin, I. Castro // *Opt. Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 20544-20555.
- [39] Rodrigo, J.A. Freestyle 3D laser traps: tools for studying light-driven particle dynamics and beyond / J.A. Rodrigo, T. Alieva // *Optica*. – 2015. – Vol. 2. – P. 812-815.
- [40] Порфирьев, А.П. Оптический захват и перемещение микрочастиц с помощью асимметричных пучков Бесселя–Гаусса / А.П. Порфирьев, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 152-157. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157.
- [41] Khonina, S.N. 3D transformations of light fields in the focal region implemented by diffractive axicons / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Applied Physics B*. – 2018. – Vol. 124. – P. 191-193. DOI: 10.1007/s00340-018-7060-4.
- [42] Porfirev, A.P. Binary diffractive optics for 3D-demultiplexing of OAM beams / A.P. Porfirev, S.A. Fomchenkov, G.E. Gridin, S.N. Khonina // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1124. – P. 051015. DOI: 10.1088/1742-6596/1124/5/051015.
- [43] Lesem, L.B. The kinoform: a new wavefront reconstruction device / L.B. Lesem, P.M. Hirsch, J.A. Jordan // *IBM J. Res. Dev.* – 1969. – Vol. 13. – P. 150-155.
- [44] Courtial, J. Iterative algorithms for holographic shaping of non-diffracting and self-imaging light beams / J. Courtial, G. Whyte, Z. Bouchal, J. Wagner // *Opt. Express*. – 2006. – Vol. 14(6). – P. 2108-2116. DOI: 10.1364/OE.14.002108.
- [45] Khonina, S.N. Iterative approach to solve the inverse diffraction problem under sharp focusing conditions / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy, N.S. Fidirko // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2017. – Vol. 26(1). – P. 18-25. DOI: 10.3103/S1060992X17010040.
- [46] Качалов, Д.Г. Стохастическая оптимизация квантованных ДОЭ для формирования продольных распределений интенсивности / Д.Г. Качалов, В.С. Павельев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 4. – Т. 441-445.
- [47] 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 // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58(1). – P. 69-76. DOI: 10.1080/09500340.2010.536592
- [48] Martínez-Herrera, A.F. Divide and conquer algorithm for nondiffracting beams / A.F. Martínez-Herrera, A. Céspedes-Mota, S. Lopez-Aguayo // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2019. – Vol. 36(12). – P. 1968-1976. DOI: 10.1364/JOSAA.36.001968.

- [49] Wessbach, S. Digital phase holograms: coding and quantization with an error diffusion concept / S. Wessbach, F. Wyrowski, O. Bryngdahl // *Opt. Commun.* – 1989. – Vol. 72. – P. 37-41.
- [50] Cohn, R.W. Approximating fully complex spatial modulation with pseudorandom phase-only modulation / R.W. Cohn, M. Liang // *App. Opt.* – 1994. – Vol. 33. – P. 4406-4415.
- [51] Khonina, S.N. Techniques for encoding composite diffractive optical elements / S.N. Khonina, V.V. Koltyar, V.A. Soifer // *Proceedings of SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* – 2003. – Vol. 5036. – P. 493-498.
- [52] Goorden, S.A. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device / S.A. Goorden, J. Bertolotti, A.P. Mosk // *Optics Express.* – 2014. – Vol. 22. – P. 17999-18009.
- [53] Павельев, В.С. Быстрый итерационный расчет фазовых формирователей мод Гаусса-Лагерра / В.С. Павельев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 1997. – Т. 17. – С. 15-20.
- [54] Балалаев, С.А. Реализация быстрого алгоритма преобразования Кирхгофа на примере бесселевых пучков / С.А. Балалаев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика.* – 2006. – Т. 30. – С. 69-73.
- [55] Gielis, J.A. Generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes // *Am. J. Bot.* – 2003. – Vol. 90. – P. 333-338.

The formation of polymorphic beams with diffraction-free properties

L.G. Akhmetov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The article presents a method for generating beams that form a given two-dimensional curve in the focal plane of the lens. In this method, you can control the intensity and phase gradient along the curve. The changes occurring with the beam are considered when the amplitude part of the field is tilted, when the amplitude part is set. Shapes with predetermined high amplitude gradients and predetermined phase gradients can be used for applications such as laser microprocessing and optical capture. This method allows us to simulate a field such that after passing it through the lens, we obtain a given optical figure with a given intensity gradient and a given phase gradient.