

# Исследование влияния параметров амплитудных спиральных зонных пластинок на формируемый обратный поток энергии

Е.С. Козлова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

## Аннотация

С помощью численного моделирования методом конечных разностей во временной области исследовано влияние параметров амплитудных спиральных зонных пластинок из серебра, золота, алюминия и хрома на продольную компоненту вектора Умова–Поинтинга в формируемых ими оптических вихрях. Показано, что алюминиевая спиральная зонная пластинка с высотой рельефа 50 нм даёт наименьшее значение продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга на оптической оси. При этом спиральная зонная пластинка из золота является наименее эффективной для формирования вихревых пучков с обратным потоком энергии.

**Ключевые слова:** оптические вихри, спиральная зонная пластинка, топологический заряд, круговая поляризация, обратный поток, вектор Умова–Поинтинга, FDTD-метод.

**Цитирование:** Козлова, Е.С. Исследование влияния параметров амплитудных спиральных зонных пластинок на формируемый обратный поток энергии / Е.С. Козлова // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 6. – С. 1093-1097. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1093-1097.

## Введение

Оптические вихревые пучки принадлежат одному из таких типов сингулярностей, при котором фаза закручена в спираль [1–2]. Такие пучки имеют большое количество различных приложений, которые включают оптический захват микро- и наночастиц [3], оптические коммуникации [4], обработку материалов [5], а также обнаружение объектов [6]. В частности, для оптической манипуляции большой интерес представляют пучки с областью, где направление течения энергии обратно к направлению распространения пучка [7]. В таких пучках проекция вектора Умова–Поинтинга на оптическую ось является отрицательной [8].

Возможность формирования отрицательной продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга была показана в ходе фокусировки пучков Бесселя, Эйри и других [9, 10]. Для формирования оптической вихрей отрицательной продольной компонентой вектора Умова–Поинтинга могут быть использованы специальные элементы, например, спиральные зонные пластинки (СЗП) [11] и металлинзы на их основе [12]. Также было показано, что амплитудные СЗП могут формировать поля, аналогичные полям на выходе фазовых СЗП из кварцевого стекла [13].

В данной работе приведено исследование влияния параметров амплитудных СЗП с топологическим зарядом  $m = -2$  на формирование продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга. Были рассмотрены различные материалы для изготовления рельефа СЗП: серебро, золото, алюминий и хром. Для каждого варианта дополнительно оценивалось влияние толщины металлического слоя на формируемый обратный поток. Исследования проводились с помощью FDTD-метода с учётом частотной дисперсии ((FD)<sup>2</sup>TD-метода), реализованного в пакете FullWAVE.

## Результаты моделирования

В работе рассматривались СЗП с топологическим зарядом  $m = -2$ , диаметром  $d = 8$  мкм и фокусным расстоянием  $f = 0,532$  мкм. Элементы предполагаются быть изготовленными в тонких металлических плёнках на кварцевом стекле. Гауссов пучок с длиной волн 0,532 мкм, шириной перетяжки 3,5 мкм и правой круговой поляризацией рассматривался как падающее излучение. Все моделирования были выполнены с помощью (FD)<sup>2</sup>TD-метода, реализованного FullWAVE. Данный метод использует модель Селмейера для описания диэлектрической проницаемости кварцевого стекла и модель Друде–Лорентца – для металлов. Комплекснозначные показатели преломления для рассматриваемых материалов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Коэффициенты преломления рассматриваемых металлов для рельефа СЗП

Материал	$n$
Серебро	$0,133 + 3,025i$
Алюминий	$0,887 + 6,257i$
Золото	$0,579 + 2,183i$
Хром	$2,769 + 4,185i$

Вычисления проводились на следующих шагах дискретизации по пространству: 15 нм вдоль поперечных координат и 7 нм вдоль продольной. Временной шаг  $c\Delta t$  был выбран равным 5 нм в соответствии с условием Куранта. Здесь и далее в ходе анализа результатов рассматривалось усреднённое по 10 периодам поле.

На рис. 1 показаны результаты моделирования. Вертикальные линии обозначают область теоретического фокуса СЗП ( $z_f = f + h$ , где  $h$  – высота рельефа).

Из рис. 1 видно, что область максимального обратного потока смещена ближе к границе элемента

относительно области теоретического фокуса СЗП. При этом большему значению высоты рельефа соответствует большее значение интенсивности, в то время как зависимость продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга от высоты рельефа является более сложной. Для более подробного анализа обратимся к табл. 2–5, в которых представлены результаты моде-

лирования: минимальное  $S_{z_{\min}}$  и максимальное  $S_{z_{\max}}$  значение продольной компоненты Умова–Поинтинга и максимальная интенсивность  $I_{\max}$  в плоскости наблюдения  $XU$ , которая расположена на расстоянии  $z_{\text{набл}}$  от элемента, где на оптической оси наиболее выражен обратный поток (т.е. имеется минимум продольной компоненты  $S_z$ ).

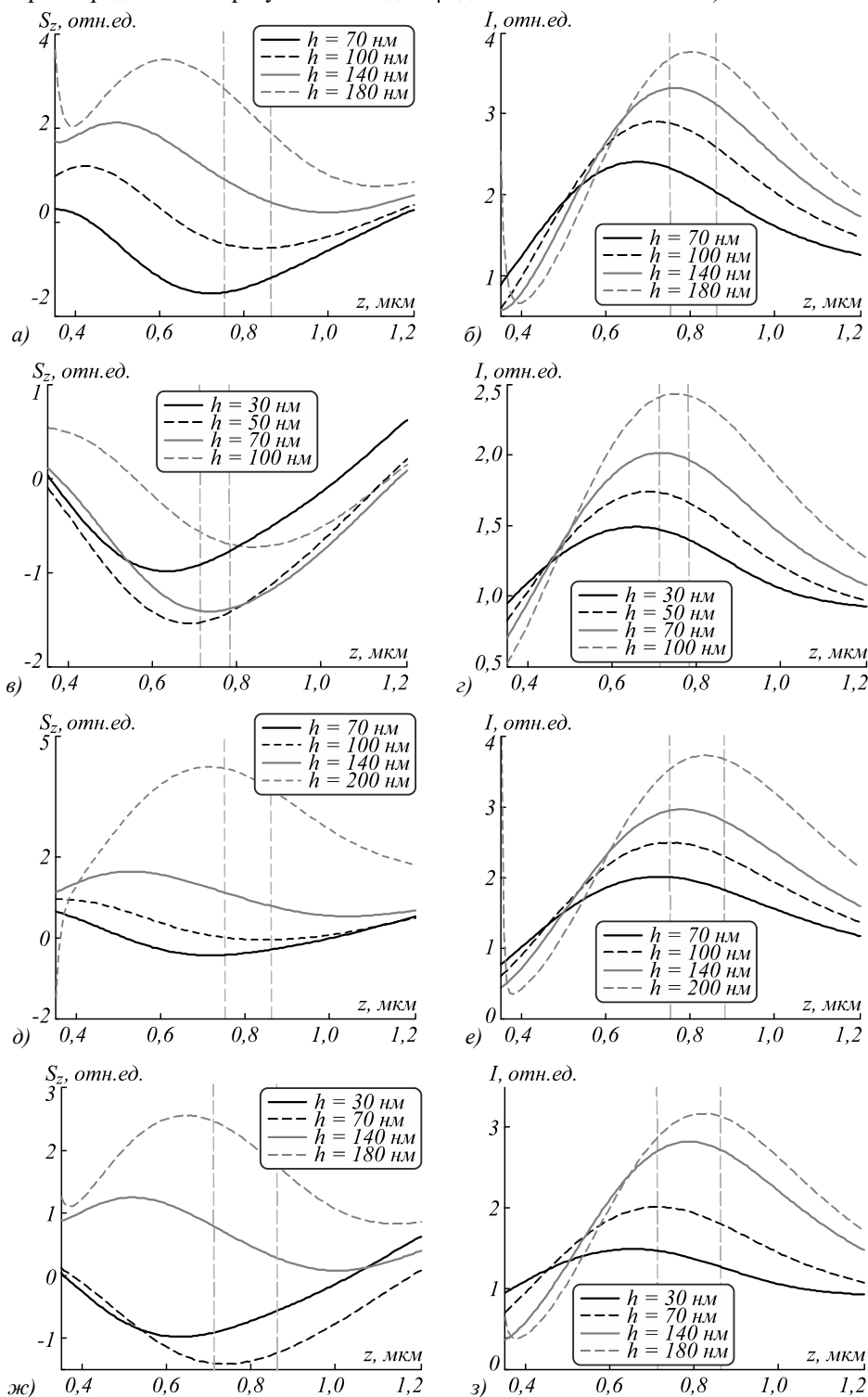


Рис. 1. Распределение продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга (а, в, д, ж) и интенсивности (б, г, е, з) вдоль оптической оси в ходе формирования оптических вихрей СЗП из серебра (а, б), алюминия (в, г), золота (д, е) и хрома (ж, з)

Табл. 2. Результаты моделирования для СЗП из серебра

$h$ , нм	$Sz_{min}$ , отн. ед.	$Sz_{max}$ , отн. ед.	$I_{max}$ , отн. ед.	$z_{набл}$ , нм
70	-1,52	3,62	6,58	501
100	-0,56	4,03	4,96	583
140	0,20	2,96	3,83	704
180	0,77	2,59	3,63	783

Табл. 3. Результаты моделирования для СЗП из алюминия

$h$ , нм	$Sz_{min}$ , отн. ед.	$Sz_{max}$ , отн. ед.	$I_{max}$ , отн. ед.	$z_{набл}$ , нм
30	-0,99	4,52	3,90	450
50	-1,54	6,89	5,47	486
70	-1,42	7,79	5,91	515
100	-0,73	7,74	5,44	590

Табл. 4. Результаты моделирования для СЗП из золота

$h$ , нм	$Sz_{min}$ , отн. ед.	$Sz_{max}$ , отн. ед.	$I_{max}$ , отн. ед.	$z_{набл}$ , нм
70	-0,44	2,92	3,33	494
100	-0,05	3,43	3,06	597
140	0,53	1,95	2,87	753
200	1,74	3,09	2,70	882

Табл. 5. Результаты моделирования для СЗП из хрома

$h$ , нм	$Sz_{min}$ , отн. ед.	$Sz_{max}$ , отн. ед.	$I_{max}$ , отн. ед.	$z_{набл}$ , нм
30	-0,98	3,39	3,66	630
70	-1,42	3,61	4,47	735
140	0,07	2,44	3,26	1001
180	0,82	2,61	2,99	1141

В каждой таблице выделена строка, соответствующая оптимальной высоте рельефа СЗП, при которой величина обратного потока энергии и интенсивность

поля максимальны. Из табл. 2–5 хорошо видно, что в большинстве случаев плоскость наблюдения находится ближе теоретического фокуса, кроме случая с СЗП из хрома, которая даёт минимум продольной компоненты Умова–Поинтинга на расстоянии 735 нм. При этом во всех рассматриваемых случаях оптимальная высота рельефа составляет порядка 50–70 нм.

Из табл. 4–5 и рис. 1 видно, что наиболее эффективными для генерации оптических вихрей с обратным потоком энергии на оптической оси являются СЗП в тонких плёнках алюминия и серебра. Отдельно стоит отметить случай с золотой плёнкой (рис. 1д), в котором обратный поток фактически отсутствует.

На рис. 2 показано поведение вектора Умова–Поинтинга в сформированном оптическом вихре.

Из рис. 2 видно, что в формируемом оптическом вихре присутствует обратный поток (рис. 2а) и спиральный поток (рис. 2б).

### Заключение

В работе показано, что использование различных материалов для изготовления СЗП может существенно повлиять на формирование обратного потока энергии. Так, использование серебряных и алюминиевых плёнок толщиной порядка 50–70 нм позволяет получить наименьшее значение продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга на оптической оси, в то время как использование золотой плёнки значительно уменьшает величину обратного потока вплоть до его полного исчезновения (рис. 1д). Данные СЗП планируется изготовить с помощью технологий электронно-лучевой литографии и исследовать экспериментально с помощью ближнепольного микроскопа.

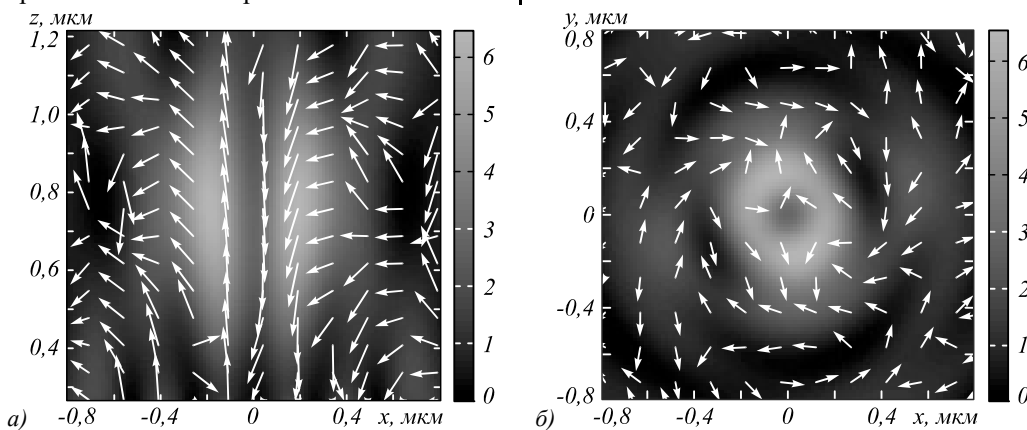


Рис. 2. Направление вектора Умова–Поинтинга, наложенное на интенсивность в плоскости XZ (а) и XY (б) для серебряной СЗП с высотой рельефа 70 нм

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01380) и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/Ч3363/26).

### Литература

1. Kitamura, K. Generation of optical vortex beam by surface-processed photonic-crystal surface-emitting lasers /

K. Kitamura, M. Kitazawa, S. Noda // Optic Express. - 2019. - Vol. 27, Issue 2. - P. 1045-1050. - DOI: 10.1364/OE.27.001045.  
 2. Padgett, M.J. Orbital angular momentum 25 years on / M.J. Padgett // Optic Express. - 2017. - Vol. 25, Issue 10. - P. 11265-11274. - DOI: 10.1364/OE.25.011265.  
 3. Yevick, A. Tractor beams for optical micromanipulation / A. Yevick, D.G. Grier // Proceedings of SPIE. - 2016. - Vol. 9764. - 97641A. - DOI: 10.1117/12.2212730.  
 4. Lavery, M.P.J. Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment / M.P.J. Lavery, C. Peuntinger, K. Gunthner, P. Banzer,

- D. Elser, R.W. Boyd, M.J. Padgett, C. Marquardt, G. Leuchs // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3, Issue 10. – e1700552. – DOI: 10.1126/sciadv.1700552.
5. **Takahashi, F.** Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle / F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – 21738. – DOI: 10.1038/srep21738.
  6. **Lan, C.** Electrostatic field invisibility cloak / C. Lan, Y. Yang, Z. Geng, B. Li, J. Zhou // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – 16416. – DOI: 10.1038/srep16416.
  7. **Yuan, G.** “Plasmonics” in free space: observation of giant wavevectors, vortices, and energy backflow in superoscillatory optical fields / G. Yuan, E.T.F. Rogers, N.I. Zheludev // *Light: Science & Applications*. – 2019. – Vol. 8, Issue 2. – P. 2047-7538. – DOI: 10.1038/s41377-018-0112-z.
  8. **Стафеев, С.С.** Поведение продольной компоненты вектора Пойнтинга при острой фокусировке оптических вихрей с круговой поляризацией / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 190-196. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-190-196.
  9. **Mitri, F.G.** Superposition of nonparaxial vectorial complex-source spherically focused beams: Axial Poynting singularity and reverse propagation / F.G. Mitri // *Physical Review A*. – 2016. – Vol. 94, Issue 2. – 023801. – DOI: 10.1103/PhysRevA.94.023801.
  10. **Mitri, F.G.** Reverse propagation and negative angular momentum density flux of an optical nondiffracting nonparaxial fractional Bessel vortex beam of progressive waves / F.G. Mitri // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2016. – Vol. 33, Issue 9. – P. 1661-1667. – DOI: 10.1364/JOSAA.33.001661.
  11. **Liu, Y.** Generation of perfect vortex and vector beams based on Pancharatnam-Berry phase elements / Y. Liu, Y. Ke, J. Zhou, Y. Liu, H. Luo, S. Wen, D. Fan // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – 44096. – DOI: 10.1038/srep44096.
  12. **Котляр, В.В.** Сравнение величин обратного потока энергии в остром фокусе светового поля с поляризационной и фазовой сингулярностями / В.В. Котляр, А.Г. Налимов, С.С. Стафеев // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 174-183. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-174-183.
  13. **Козлова, Е.С.** Моделирование генерации оптических вихрей с помощью спиральной зонной пластинки из серебра / Е.С. Козлова // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 977-984. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-977-984.

#### Сведения об авторе

**Козлова Елена Сергеевна**, 1989 года рождения. В 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и информатика». Кандидат физико-математических наук с 2014 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН и по совместительству ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: дифракционная оптика, численные методы. E-mail: [kozlova.elena.s@gmail.com](mailto:kozlova.elena.s@gmail.com).

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 20 октября 2019 г. Окончательный вариант – 28 ноября 2019 г.

## Investigation of the influence of amplitude spiral zone plate parameters on produced energy backflow

E.S. Kozlova <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,  
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

<sup>2</sup>Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

#### Abstract

Investigation of the influence of parameters of silver, aluminum, gold, and chromium spiral zone plates on the longitudinal component of Umov-Poynting vector in produced optical vortices by using the frequency-dependent finite-difference time-domain method is presented. It is shown that the aluminum spiral zone plate with a relief height of 50 nm gives an optical vortex with the smallest longitudinal component of Umov-Poynting vector on the optical axis. The gold spiral zone plate is the least effective for the formation of vortex beams with a reverse energy flow.

**Keywords:** optical vortices, spiral zone plate, topological charge, circular polarization, reverse flow, Umov-Poynting vector, FDTD method.

**Citation:** Kozlova ES. Investigation of the influence of amplitude spiral zone plate parameters on produced energy backflow. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1093-1097. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1093-1097.

**Acknowledgements:** This work was partly funded by the Russian Foundation for Basic Research under grants ##18-07-01380, 18-07-01122 and the RF Ministry of Science and Higher Education under an FSRC “Crystallography and Photonics” RAS' state project #007-Г3/Ч3363/26).

**References**

- [1] Kitamura K, Kitazawa M, Noda S. Generation of optical vortex beam by surface-processed photonic-crystal surface-emitting lasers. *Opt Express* 2019; 27(2): 1045-1050. DOI: 10.1364/OE.27.001045.
- [2] Padgett MJ. Orbital angular momentum 25 years on. *Opt Express* 2017; 25(10): 11265-11274. DOI: 10.1364/OE.25.011265.
- [3] Yevick A, Grier DG. Tractor beams for optical micromanipulation. *Proc SPIE* 2016; 9764: 97641A. DOI: 10.1117/12.2212730.
- [4] Lavery MPJ, Peuntinger C, Gunthner K, Banzer P, Elser D, Boyd RW, Padgett MJ, Marquardt C, Leuchs G. Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment. *Sci Adv* 2017; 3(10): e1700552. DOI: 10.1126/sciadv.1700552.
- [5] Takahashi F, Miyamoto K, Hidai H, Yamane K, Morita R, Omatsu T. Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle. *Sci Rep* 2016; 6: 21738. DOI: 10.1038/srep21738.
- [6] Lan C, Yang Y, Geng Z, Li B, Zhou J. Electrostatic field invisibility cloak. *Sci Rep* 2015; 5: 16416. DOI: 10.1038/srep16416.
- [7] Yuan G, Rogers ETF, Zheludev NI. "Plasmonics" in free space: observation of giant wavevectors, vortices, and energy backflow in superoscillatory optical fields. *Light: Science & Applications* 2019; 8(2): 2047-7538. DOI: 10.1038/s41377-018-0112-z.
- [8] Stafeev SS, Nalimov AG. Longitudinal component of the Poynting vector of a tightly focused optical vortex with circular polarization [In Russian]. *Computer Optics* 2018; 42(2): 190-196. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-190-196.
- [9] Mitri FG. Superposition of nonparaxial vectorial complex-source spherically focused beams: Axial Poynting singularity and reverse propagation. *Phys Rev A* 2016; 94(2): 023801. DOI: 10.1103/PhysRevA.94.023801.
- [10] Mitri FG. Reverse propagation and negative angular momentum density flux of an optical nondiffracting nonparaxial fractional Bessel vortex beam of progressive waves. *J Opt Soc Am A* 2016; 33(9): 1661-1667. DOI: 10.1364/JOSAA.33.001661.
- [11] Liu Y, Ke Y, Zhou J, Liu Y, Luo H, Wen S, Fan D. Generation of perfect vortex and vector beams based on Pancharatnam-Berry phase elements. *Sci Rep* 2017; 7: 44096. DOI: 10.1038/srep44096.
- [12] Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS. Comparison of backward flow values in the sharp focus of light fields with polarization and phase singularity. *Computer Optics* 2019; 43(2): 174-183. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-174-183.
- [13] Kozlova ES. Modeling of the optical vortex generation using a silver spiral zone plate. *Computer Optics* 2018; 42(6): 977-984. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-977-984.

**Author's information**

**Elena Sergeevna Kozlova**, (b. 1989) received Master's degree in Applied Mathematics and Informatics in Samara State Aerospace University (2011). She received her PhD in 2014. She is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics" of Russian Academy of Sciences and assistant of Computer Science department at Samara National Research University. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics.  
E-mail: [kozlova.elena.s@gmail.com](mailto:kozlova.elena.s@gmail.com).

*Received October 20, 2019. The final version – November 28, 2019.*