

УДК 681.7.069

Е.С. Козлова^{1, 2}, В.В. Котляр^{1, 2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ ОБРАТНОГО ПОТОКА ЭНЕРГИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬЕФА АМПЛИТУДНЫХ ЗОННЫХ ПЛАСТИНОК

С помощью $(FD)^2TD$ -метода исследовано влияние параметров амплитудных спиральных зонных пластинок (СЗП) на продольную компоненту вектора Умова–Поинтинга в формируемых оптических вихрях. Показано, что для формирования с обратным потоком энергии вдоль оптической оси предпочтительнее использовать алюминиевую СЗП с высотой рельефа 50 нм.

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

E.S. Kozlova^{1, 2}, V.V. Kotlyar^{1, 2}

¹ IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
Samara, Russian Federation

² Samara National Research University, Samara, Russian Federation

INVESTIGATION OF THE REVERSE ENERGY FLOW DEPENDENCES ON THE RELIEF PARAMETERS OF THE AMPLITUDE ZONE PLATES

Investigation of influence amplitude spiral zone plates (SZP) parameters on longitudinal component of Umov-Poynting vector in produced optical vortices by using $(FD)^2TD$ -method is presented. It is shown that it is preferable to use aluminum SZP with a relief height of 50 nm for the formationn optical vortices with energy backflow along the optical axis.

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

Введение

Оптические вихревые пучки принадлежат одному из таких типов сингулярностей, при которой 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 [7–9]. В таких пучках проекция вектора Умова–Поинтинга на оптическую ось является отрицательной [10].

Возможность формирования отрицательной продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга была показана в ходе фокусировки пучков Бесселя [11], Эйри [12] и других [13]. Для формирования оптических вихрей с отрицательной продольной компонентой вектора Умова–Поинтинга могут быть использованы специальные элементы, например, спиральные зонные пластинки (СЗП) [14] и металлинзы на их основе [15]. Также было показано, что амплитудные СЗП могут формировать поля, аналогичные полям на выходе фазовых СЗП из кварцевого стекла [16, 17].

В 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. Для каждого варианта дополнительно оценивалось влияние толщины металлического слоя на формируемый обратный поток.

Параметры СЗП

Хорошо известно, что СЗП могут быть использованы для генерации и фокусировки оптических вихрей. Функция пропуска бинарной СЗП может быть записана следующим образом:

$$T(r, \vartheta) = \operatorname{sgn} \left(\cos \left[im\vartheta + ik \left(\sqrt{f^2 + r^2} - f \right) \right] \right), \quad (1)$$

где $\operatorname{sgn} x = (1, x > 0; -1, x < 0)$, r и ϑ – полярные координаты, k – волновое число, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны, f – фокусное расстояние. На рис. 1 показан бинарный шаблон рассматриваемой СЗП (а) и оптическая схема численного моделирования (б). Радиус элемента был выбран равным 4 мкм, а фокусное расстояние $f = 532$ нм. Топологический заряд СЗП составил $m = 2$.

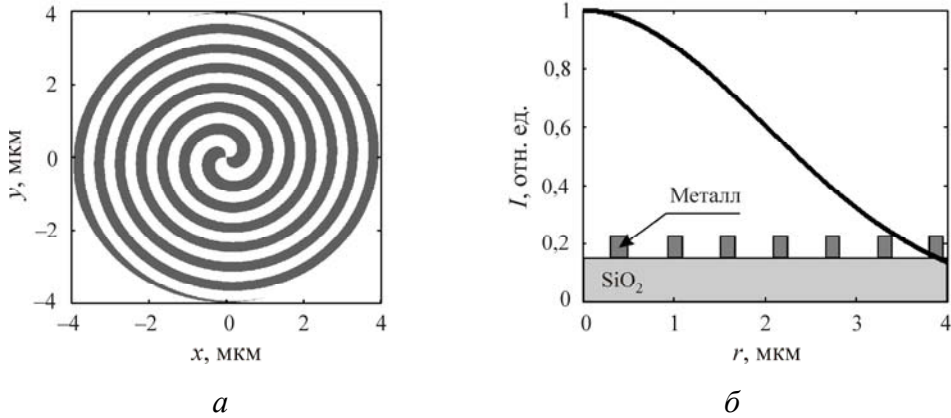


Рис. 1. Шаблон СЗП в поперечной (а) и продольной (б) плоскостях (черная линия отображает распределение интенсивности в падающем излучении)

Рассматриваемые нами элементы могут быть изготовлены в тонких металлических пленках на кварцевом стекле, а моделирование проводилось с помощью $(FD)^2TD$ -метода, учитывающего частотную дисперсию. Данный метод использует модель Селмейера для диэлектрической проницаемости кварцевого стекла [18]:

$$\epsilon_2(\lambda) = \epsilon_\infty + \sum_m \frac{\Delta\epsilon_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2 - i\lambda\eta_m}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, $\epsilon_\infty(x, z)$ – диэлектрическая проницаемость на высоких частотах, $\Delta\epsilon_m(x, z)$ – величина резонанса, $\lambda_m(x, z)$ – резонансная длина волны, $\eta_m(x, z)$ – коэффициент демпфирования.

Для описания диэлектрической проницаемости металлов $(FD)^2TD$ -метод использует модель Друде–Лорентца [19, 20]:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty(z) + \frac{\omega_p^2}{-2i\omega\nu - \omega^2} + \sum_m \frac{A_m \omega_m^2}{-\omega^2 - 2i\omega\delta_m + \omega_m^2}, \quad (3)$$

где ω – частота; ω_p – плазменная частота; ν – частота столкновений, A_m – амплитуда резонанса, δ_m – коэффициент демпфирования, ω_m – резонансная частота.

Параметры для рассматриваемых материалов представлены в табл. 1–4.

Таблица 1

Параметры модели Селлмейера для кварцевого стекла [18]

m	$\Delta\varepsilon_m$	λ_m	δ_m
1	0,69616630	0,068404300	0
2	0,40794260	0,11624140	0
3	0,89747940	9,8961610	0
$\varepsilon_\infty = 1$			

Таблица 2

Параметры модели Друде–Лоренца для серебра [20]

m	A_m	δ_m	ω_m
1	7,924697	9,840355	4,132646
2	0,501327	1,144581	22,6941
3	0,013329	0,164597	41,45307
4	0,826552	2,319549	46,001
5	1,113336	6,125	102,759
$\varepsilon_\infty = 1$			
$\omega_p = 41,94605$			
$\nu = 0,243097$			

Таблица 3

Параметры модели Друде–Лоренца для золота [20]

m	A_m	δ_m	ω_m
1	11,36293	0,610274	2,101774
2	1,183639	0,873629	4,203549
3	0,65677	2,203065	15,03655
4	2,645486	6,315	21,79768
5	2,014826	5,60642	67,45936
$\varepsilon_\infty = 1$			
$\omega_p = 39,86873$			
$\nu = 0,13421$			

Таблица 4

Параметры модели Друде–Лоренца для алюминия [20]

m	A_m	δ_m	ω_m
1	1940,972	0,843242	0,820452
2	4,7065	0,790065	7,81961
3	11,3955	3,421081	9,15665
4	0,5581	8,56410	17,5891
$\varepsilon_\infty = 1$			
$\omega_p = 54,866$			
$\nu = 0,119016$			

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициентов преломления n и коэффициента поглощения γ от длины волны для рассматриваемых металлов.

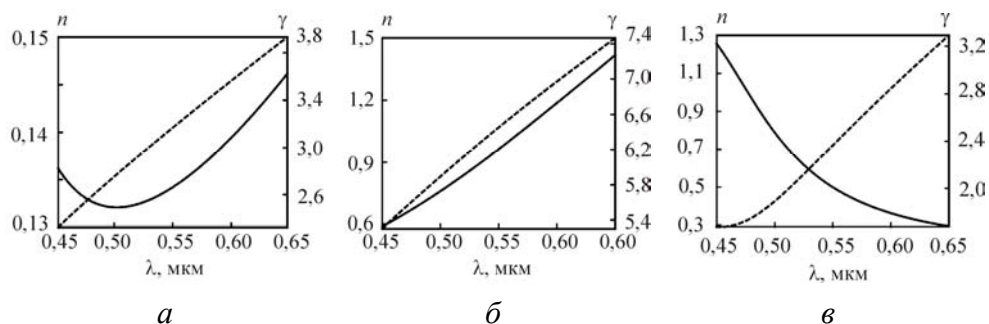


Рис. 2. Зависимость коэффициента преломления (непрерывная линия) и коэффициента поглощения (пунктирная линия) от длины волны излучения для серебра (а), алюминия (б) и золота (в)

Результаты моделирования

Моделирование проводилось с помощью решения уравнений Максвелла разностным методом во временной области, реализованного в пакете FullWAVE (RSoft). При расчетах использовались следующие параметры сетки: шаги по поперечным и продольной координатам составили 15 и 7 нм соответственно. Шаг по псевдовремени $c\Delta t$ был выбран равным 5 нм в соответствии с условием Куранта. Данные шаги гарантируют сходимость численного метода, а их дальнейшее измельчение не приводит к значительным изменениям в результатах моделирования (стандартное отклонение 0,001 %).

Гауссов пучок с длиной волн 0,532 мкм, шириной перетяжки 3,5 мкм и правой круговой поляризацией рассматривался как падающее излучение. Для расчета пространственного распределения интенсивности входного излучения с требуемой поляризации использовался MatLab. 2D-проекция интенсивности падающего излучения на шаблон оптического элемента представлена на рис. 1, б.

На рис. 3 показаны результаты моделирования. Вертикальные линии обозначают область теоретического фокуса СЗП (в зависимости от высоты рельефа h).

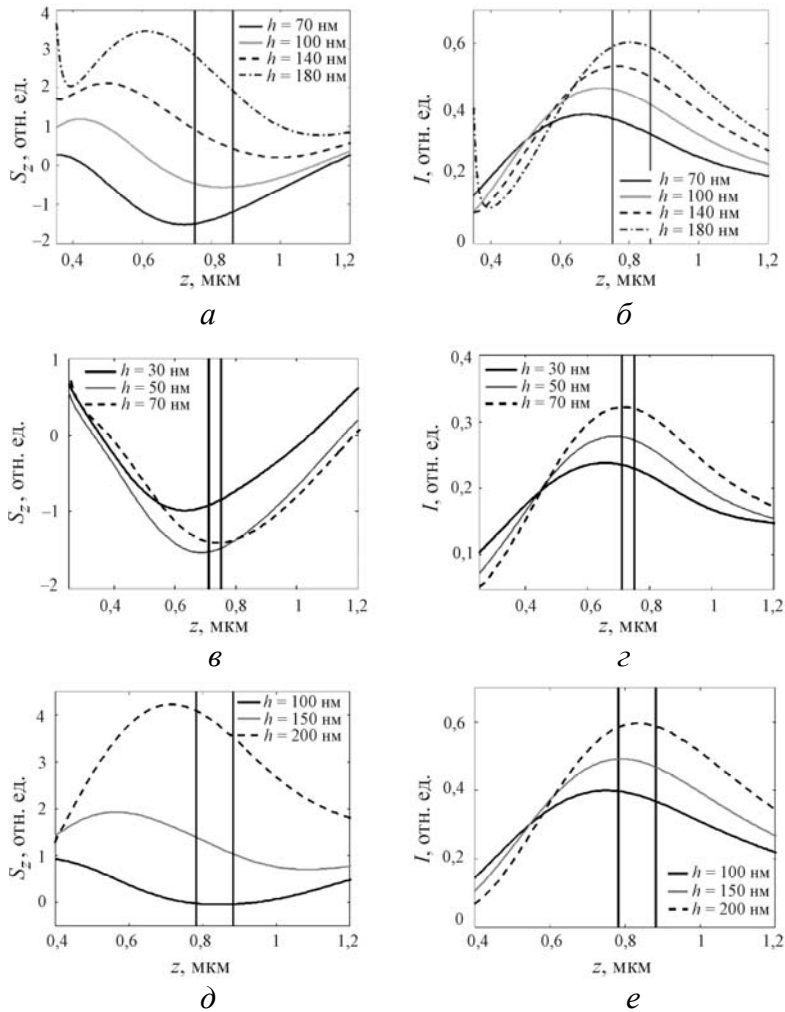


Рис. 3. Распределение продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга (а, в, д) и интенсивности (б, г, е) вдоль оптической оси в ходе формирования оптических вихрей СЗП из серебра (а, б), алюминия (в, г) и золота (д, е)

Из рис. 3 видно, что область максимального обратного потока смещена ближе к границе элемента относительно области теоретического фокуса СЗП. При этом в большинстве случаев большему значению высоты рельефа соответствует большее значение интенсивности и продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга. Однако в случае использования алюминиевой пленки можно заметить отличие от вариантов с серебряной и золотой пленками: здесь наблюдается обратная ситуация (см. рис. 3, *в*). Отдельно стоит отметить случай с золотой пленкой (см. рис. 3, *д*), в котором обратный поток фактически отсутствует.

На рис. 4 показано поведение вектора Умова–Поинтинга сформированного оптического вихря.

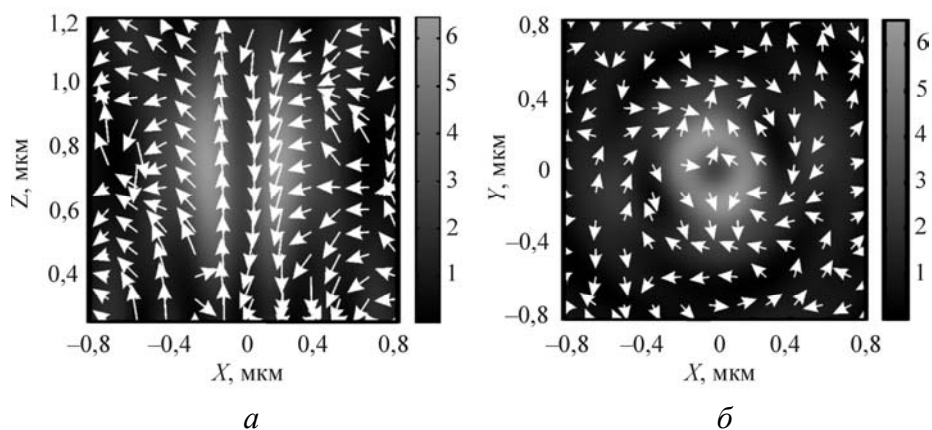


Рис. 4. Направление вектора Умова–Поинтинга, наложенное на интенсивность в плоскости XZ (*а*) и XY (*б*) для серебряной СЗП с высотой рельефа 100 нм

Из рис. 4 видно, что в формируемом оптическом вихре присутствуют осевой обратный поток (см. рис. 4, *а*) и поперечный спиральный поток (см. рис. 4, *б*) энергии.

Заключение

В статье показано, что использование различных материалов для изготовления СЗП может существенно повлиять на формирование обратного потока энергии, вплоть до его полного исчезновения (см. рис. 3, *д*). Данные СЗП планируется изготовить с помощью технологий электронно-лучевой литографии и исследовать экспериментально с помощью электронного микроскопа.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01380, 18-29-20003) и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Список литературы

1. Kitamura K., Kitazawa M., Noda S. Generation of optical vortex beam by surface-processed photonic-crystal surface-emitting lasers // *Opt. Express.* – 2019. – Vol. 27, no 2. – P. 1045–1050.
2. Padgett M.J. Orbital angular momentum 25 years on // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25, no 10. – P. 11265–11274.
3. Yevick A., Grier D.G. Tractor beams for optical micromanipulation // *Proc. SPIE.* – 2016. – Vol. 9764. – P. 97641A
4. 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, no. 10. – P. e1700552.
5. Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrySTALLINE silicon needle / F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 6. – P. 21738.
6. Electrostatic Field Invisibility Cloak / C. Lan, Y. Yang, Z. Geng, B. Li, J. Zhou // *Sci. Rep.* – 2015. – Vol. 5. – P. 16416.
7. Yuan G., Rogers E.T.F., Zheludev N.I. “Plasmonics” in free space: observation of giant wavevectors, vortices, and energy backflow in superoscillatory optical fields // *Light: Science & Applications.* – 2019. – Vol. 8, no. 2. – P. 2047–7538.
8. Котляр В.В., Налимов А.Г., Стафеев С.С. Обратный поток энергии вблизи оптической оси в области острого фокуса оптического вихря с круговой поляризацией // *Компьютерная оптика.* – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 392–400.
9. Motion of optically bound particles in tractor beam / J. Damkova, L. Chvatal, J. Ježek, J. Oulehla, O. Brzobohatý, P. Zemánek // *Proc. SPIE.* – Vol. 10712. – P. 107120Y.
10. Стафеев С.С., Налимов А.Г. Поведение продольной компоненты вектора Пойнтинга при острой фокусировке оптических вихрей

с круговой поляризацией // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 190–196.

11. Mitri F.G. 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. – Vol. 33, no. 9. – P. 1661–1667.

12. Vaveliuk P., Martinez-Matos O. Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams // *Opt. Express*. – 2012. – Vol. 20, no. 24. – P. 26913–26921.

13. Mitri F.G. Superposition of nonparaxial vectorial complex-source spherically focused beams: Axial Poynting singularity and reverse propagation // *Phys. Rev. A*. – 2016. – Vol. 94, no. 2. – P. 023801.

14. 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 // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 44096.

15. Котляр В.В., Налимов А.Г., Стафеев С.С. Сравнение величин обратного потока энергии в остром фокусе светового поля с поляризационной и фазовой сингулярностями // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 174–183.

16. Козлова Е.С. Моделирование генерации оптических вихрей с помощью спиральной зонной пластинки из серебра // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 6. – С. 977–984.

17. Kozlova E.S., Kotlyar V.V. Amplitude spiral zone plates for generation of optical vortices // *Proc. SPIE*. – 2019. – Vol. 11032. – P. 1103210.

18. Surface physics, nanoscale physics, low-dimensional systems-Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses / A. Couairon, L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz // *Phys. Rev. B*. – 2005. – Vol. 71, no. 12. – P. 125435.

19. A new model of dispersion for metals leading to a more accurate modeling of plasmonic structures using the FDTD method / A. Vial, T. Laroche, M. Dridi, L. Le Cunff // *Appl. Phys. A*. – 2011. – Vol. 103, no. 3. – P. 849–853.

20. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices / A.D. Rakić, A.B. Djurišić, J.M. Elazar, M.L. Majewski // *Appl. Opt.* – 1998. – Vol. 37, no. 22. – P. 5271–5283.

References

1. Kitamura K., Kitazawa M. and Noda S. Generation of optical vortex beam by surface-processed photonic-crystal surface-emitting lasers, *Opt. Express.*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 1045-1050.
2. Padgett, M.J. Orbital angular momentum 25 years on. *Opt. Express.*, 2017, vol. 25, no. 10, pp. 11265-11274.
3. Yevick A., Grier D.G. Tractor beams for optical micromanipulation. *Proc. SPIE.*, 2016, vol. 9764, p. 97641A
4. Lavery M.P.J., Peuntinger C., Gunthner K., Banzer P., Elser D., Boyd R.W., Padgett M.J., Marquardt C., Leuchs G. Free-space propagation of high-dimensional structured optical fields in an urban environment. *Science Advances*, 2017, vol. 3, no. 10, p. e1700552.
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, vol. 6, p. 21738.
6. Lan C., Yang Y., Geng Z., Li B., Zhou J. Electrostatic field invisibility cloak. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, p. 16416
7. Yuan G., Rogers E.T.F., Zheludev N.I. "Plasmonics" in free space: observation of giant wavevectors, vortices, and energy backflow in superoscillatory optical fields. *Light: Science & Applications.*, 2019, vol. 8, no. 2, pp. 2047-7538.
8. Kotlyar V.V., Nalimov A.G., Stafeev S.S. The near-axis backflow of energy in a tightly focused optical vortex with circular polarization. *Computer Optics.*, 2018, vol. 42, no. 3, pp. 392-400.
9. Damkova J., Chvatal L., Ježek J., Oulehla J., Brzobohatý O., Zemánek P. Motion of optically bound particles in tractor beam. *Proc. SPIE.*, vol. 10712, p. 107120Y.
10. Stafeev S.S., Nalimov A.G. Longitudinal component of the poynting vector of a tightly focused optical vortex with circular polarization. *Computer Optics.*, 2018, vol. 42, no. 2, pp. 190-196.
11. Mitri F.G. 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, vol. 33, no. 9, pp. 1661-1667.
12. Vaveliuk P., Martinez-Matos O. Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams. *Opt. Express.*, 2012, vol. 20, no. 24, pp. 26913-26921.

13. Mitri F.G. Superposition of nonparaxial vectorial complex-source spherically focused beams: Axial Poynting singularity and reverse propagation. *Phys. Rev. A.*, 2016, vol. 94, no. 2, p. 023801.

14. 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, vol. 7, p. 44096.

15. Kotlyar V.V., Nalimov A.G., Stafeev S.S. Comparison of backward flow values in the sharp focus of light fields with polarization and phase singularity. *Computer Optics.*, 2019, vol. 43, no. 2, pp. 174-183.

16. Kozlova E.S., Modeling of the optical vortex generation using a silver spiral zone plate. *Computer Optics.*, 2018, vol. 42, no. 6, pp. 977-984.

17. Kozlova E.S., Kotlyar V.V. Amplitude spiral zone plates for generation of optical vortices. *Proc. SPIE.*, 2019, vol. 11032, p. 1103210.

18. Couairon A., Sudrie L., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. Surface physics, nanoscale physics, low-dimensional systems-Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses. *Phys. Rev. B.*, 2005, vol. 71, no. 12, p.125435.

19. Vial A., Laroche T., Dridi M., Le Cunff L. A new model of dispersion for metals leading to a more accurate modeling of plasmonic structures using the FDTD method. *Appl. Phys. A.*, 2011, vol. 103, no. 3, pp. 849-853.

20. Rakić A.D., Djurišić A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Appl. Opt.*, 1998, vol. 37, no. 22, pp. 5271-5283.

Получено 20.11.19