

Сравнительное моделирование спиральных зонных пластинок с рельефом из серебра и кварцевого стекла

Е.С. Козлова^{1,2}

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

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В работе представлено сравнительное моделирование генерации оптических вихрей с помощью спиральных зонных пластинок из кварцевого стекла и серебра, выполненное с помощью FDTD-метода, реализованного в пакете FullWAVE. В качестве входного излучения использовался Гауссов пучок с правой круговой поляризацией. Сравнение результатов моделирования для двух типов спиральных зонных пластинок подтверждает возможность замены фазового элемента его более простым в изготовлении амплитудным аналогом.

1. Введение

Оптические вихри, у которых в процессе распространения в свободном пространстве поперечное распределение интенсивности светового поля вращается вокруг оптической оси, широко используются в микроскопии в ходе измерения положения и ориентации молекул [1], в зондировании атмосферы и беспроводных коммуникационных системах [2], подводных системах передачи информации [3], а также в фиксации магнитных полей [4]. Для генерации оптических вихрей разрабатываются специальные оптические элементы [5–11]. Исследование и экспериментальная демонстрация генерации трехмерных объемных оптических вихрей на основе взаимодействия света с высокоэффективной диэлектрической метаповерхностью представлены в [5]. Дифракционный элемент для генерации оптических вихрей, основанный на фазовой модификации радиального смещения зон, был представлен в [8]. В [10] теоретически и численно исследуются пространственно-временные характеристики ультракоротких оптических вихрей, такие как распределения интенсивности, фазы, ОУМ и потока энергии.

Во всех выше представленных работах для генерации оптических вихрей используются фазовые элементы. В [12] была продемонстрирована возможность использования амплитудных аналогов в частности для острой фокусировки излучения. В данной работе было решено провести сравнительное моделирование СЗП с рельефом из кварцевого стекла и серебра. Моделирование проводилось FDTD-методом с учетом зависимости диэлектрической проницаемости от частоты ((FD)²TD-методом), который реализован в пакете FullWAVE. В качестве падающего излучения рассматривались Гауссов пучок с правой круговой поляризацией и длиной волны $\lambda = 532$ нм. В работе представлен анализ распределения компонент электрического поля и вектора Умова-Поинтинга. Сравнение результатов моделирования для двух типов спиральных зонных пластинок подтверждает

возможность замены фазового элемента его более простым в изготовлении амплитудным аналогом.

2. Расчет СЗП и параметры численного моделирования

Функция пропуска бинарной СЗП может быть записана следующим образом:

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

где $\text{sgn } x = (1, x > 0; -1, x < 0)$, r и θ – полярные координаты, k – волновое число, f – фокусное расстояние. В работе исследовалась СЗП с радиусом $r = 4$ мкм, фокусным расстоянием $f = 532$ нм, топологическим зарядом $m = 2$.

Гауссов пучок с правой круговой поляризацией, длиной волны $\lambda = 532$ нм и радиусом перетяжки $w = 4$ мкм рассматривался в качестве падающего излучения. Моделирование проводилось с помощью (FD)²TD-метода, реализованного в пакете FullWAVE. При расчетах использовались следующие параметры сетки: шаги по поперечным и продольной координатам составили 15 нм и 7 нм соответственно. Шаг по псевдо-времени $c\Delta t$ был выбран равным 5 нм в соответствии с условием Куранта.

3. Результаты моделирования для СЗП из кварцевого стекла

Рассмотрим СЗП, выполненную из кварцевого стекла, модель дисперсии которого описывается моделью дисперсии Селмейера[13]:

$$\varepsilon_2(\lambda) = \varepsilon_\infty + \sum_m \frac{\Delta\varepsilon_m \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_m^2 + i\lambda\eta_m}, \quad (2)$$

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

По итогам моделирования в пакете FullWAVE для каждой компоненты электрического поля, формируемого в фокальной плоскости элемента в момент времени $cT = 19,82$ мкм, с помощью MATLAB были рассчитаны амплитуда и фаза, распределения которых представлены на рис. 1.

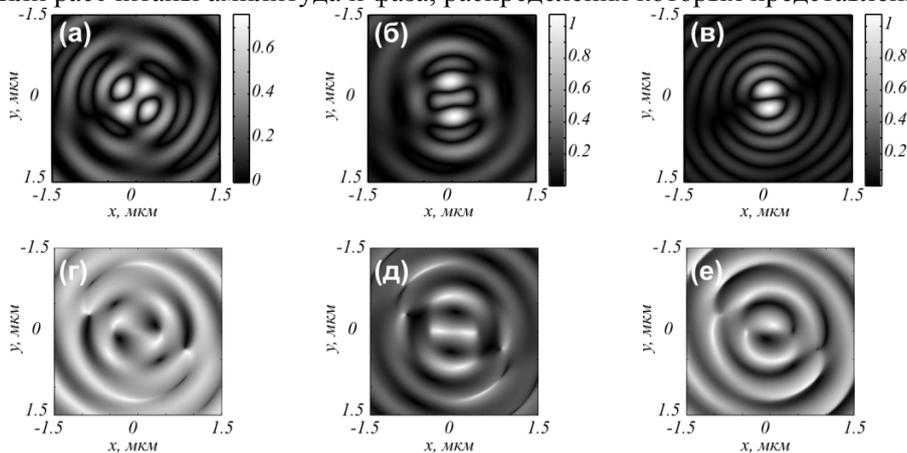


Рисунок 1. Распределение амплитуды (а-в) и фазы (г-д) для компонент E_x (а,г), E_y (б,д), E_z (в,е) электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ($f = 532$ нм) СЗП из кварцевого стекла.

Из рис. 1 видно, что СЗП с $m = 2$ формирует оптический вихрь со сложным топологическим зарядом: поперечные компоненты (E_x и E_y) имеют топологический заряд $m = 2$, в то время как продольная компонента (E_z) имеет $m = 1$.

4. Результаты моделирования для СЗП из серебра

Рассмотрим СЗП (рис. 1), выполненную из серебра, модель дисперсии которого описывается моделью дисперсии Друде-Лоренца[14]:

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

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

По итогам моделирования в пакете FullWAVE, как и в предыдущем случае, для каждой компоненты электрического поля, формируемого в фокальной плоскости элемента в момент времени $tT=19,82$ мкм, с помощью MATLAB были рассчитаны амплитуда и фаза, распределения которых представлены на рис. 2.

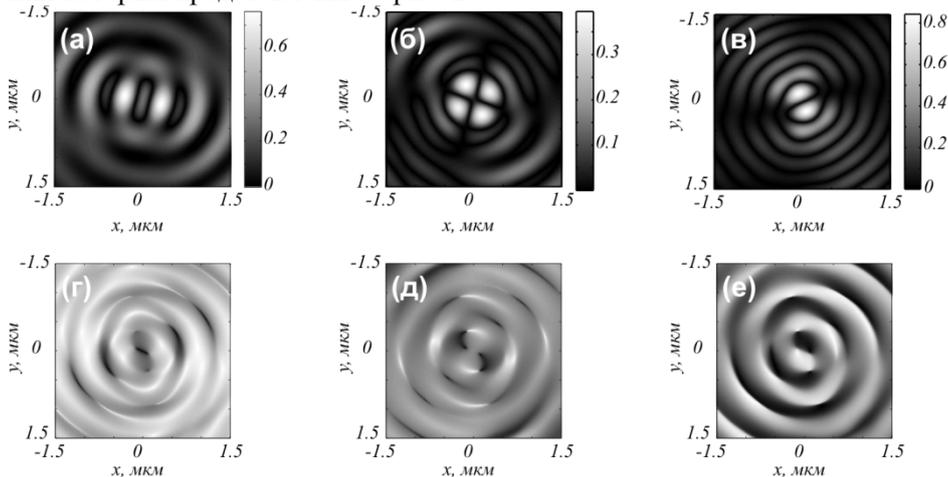


Рисунок 2. Распределение амплитуды (а-в) и фазы (г-д) для компонент E_x (а,г), E_y (б,д), E_z (в,е) электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ($f = 532$ нм) СЗП из серебра.

Рис. 2 демонстрирует аналогичные результаты для амплитудных и фазовых распределений формируемых оптических вихрей, что подтверждает возможность использования серебряной СЗП для их генерации.

5. Исследование вектора Умова-Поинтинга

В работе [15] рассматривалось поведение продольной компоненты вектора Умова-Поинтинга S_z в ходе фокусировки оптического вихря с помощью СЗП с топологическими зарядами $m = \pm 1$ и $m = \pm 2$. В данной также было проведено подобное исследование, результаты которого представлены на рис. 3.

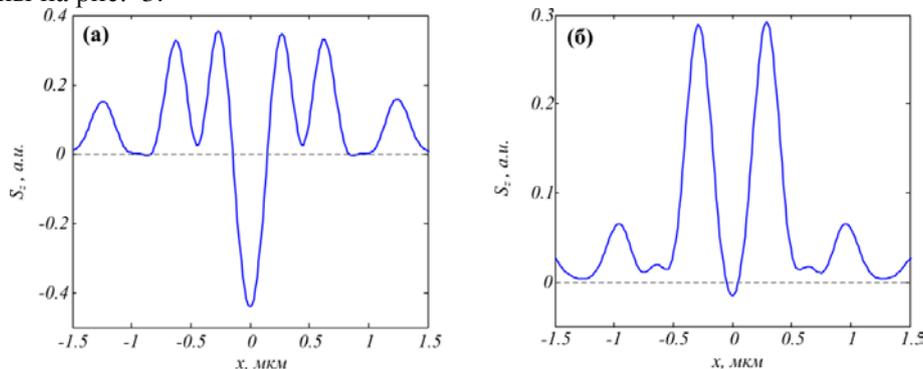


Рисунок 3. Распределение продольной компоненты Умова-Поинтинга S_z в фокальной плоскости для СЗП из кварцевого стекла (а) и серебра (б).

Рис. 3 подтверждает наличие обратного потока в центре формируемых вихрей. Однако стоит отметить, что величина обратного потока в случае серебряной СЗП значительно ниже. При этом качественно распределение продольной компоненты вектора Умова-Поинтинга S_z также претерпевает определенные изменения, а именно уменьшаются боковые лепестки.

6. Заключение

В данной работе было проведено сравнительное моделирование СЗП с рельефом из кварцевого стекла и серебра. Моделирование проводилось $(FD)^2TD$ -методом, который реализован в пакете FullWAVE. В качестве падающего излучения рассматривались Гауссов пучок правой круговой поляризацией и длиной волны $\lambda = 532$ нм. Анализ распределения полей вектора Умова-Поинтинга, амплитуды и фазы электрического поля показал наличие оптического вихря сложной структуры с обратным потоком энергии в его центре. Сравнение результатов моделирования для двух типов спиральных зонных пластин подтверждает возможность замены фазового элемента его более простым в изготовлении амплитудным аналогом.

7. Литература

- [1] Backlund, M.P. The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation / M.P. Backlund, M.D. Lew, A.S. Backer, S.J. Sahl, G. Grover, A. Agrawal, R. Piestun, W.E. Moerner // *Proceedings of SPIE*. – 2013. – Vol. 8590. – 85900L. DOI: 10.1117/12.2001671.
- [2] 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(10). – P. e1700552. DOI: 10.1126/sciadv.1700552.
- [3] Morgan, K.S. Free space propagation of concentric vortices through underwater turbid environments / K.S. Morgan, J.K. Miller, B.M. Cochennour, W. Li, Y. Li, R.J. Watkins, E.G. Johnson // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18(10). – P. 104004. DOI: 10.1088/2040-8978/18/10/104004.
- [4] Yu, S. Compositing orbital angular momentum beams in $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystal for magnetic field sensing / S. Yu, F. Pung, H. Liu, X. Li, J. Yang, T. Wang // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 111(9). – P. 091107. DOI: 10.1063/1.4989651.
- [5] Huang, L. Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces / L. Huang, X. Song, B. Reineke, T. Li, X. Li, J. Liu, S. Zhang, Y. Wang, T. Zentgraf // *ACS Photonics*. – 2017. – Vol. 4(2). – P. 338-346. DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00808.
- [6] 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. – P. 44096. DOI: 10.1038/srep44096.
- [7] Котляр, В.В. Формирование и фокусировка векторного оптического вихря с помощью металинзы / В.В. Котляр, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 645-654. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.
- [8] Sabatyan, A. Radial phase modulated spiral zone plate for generation and manipulation of optical perfect vortex / A. Sabatyan, Z. Behjat // *Optical and Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 49(11). – P. 371. DOI: 10.1007/s11082-017-1211-4.
- [9] Zhou, Y. Anisotropic edge enhancement with spiral zone plate under femtosecond laser illumination / Y. Zhou, S. Feng, S. Nie, J. Ma, C. Yuan // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56(10). – P. 2641-2648. DOI: 10.1364/AO.56.002641.
- [10] Rafighdoost, J. Spirally phase-shifted zone plate for generating and manipulating multiple spiral beams / J. Rafighdoost, A. Sabatyan // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2017. – Vol. 34(3). – P. 608-612. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000608.
- [11] Ma, L. Spatiotemporal evolutions of ultrashort vortex pulses generated by spiral multi-pinhole plate / L. Ma, P. Zhang, Z. Li, C. Liu, X. Li, Y. Zhang, R. Zhang, C. Cheng // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25(24). – P. 29864-29873. DOI: 10.1364/OE.25.029864.
- [12] Liang, Y. Single-focus spiral zone plates / Y. Liang, E. Wang, Y. Hua, C. Xie, T. Ye // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42(13). – P. 2663-2666. DOI: 10.1364/OL.42.002663
- [13] Couairon, A. 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 // *Physical Review B*. – 2005. – Vol. 71(12). – P. 125435. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.125435.
- [14] Rakić, A.D. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices / A.D. Rakić, A.B. Djurišić, J.M. Elazar, M.L. Majewski // *Applied Optics*. – 1998. – Vol. 37(22). – P. 5271-5283. DOI: 10.1364/AO.37.005271.
- [15] 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.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01122, 18-07-01380) в части «Исследование вектора Умова-Пойнтинга» и «Результаты моделирования для СЗП из серебра», и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части «Результаты моделирования для СЗП из кварцевого стекла».

Comparative modeling of spiral zone plates with a relief from silver and silica glass

E.S. Kozlova^{1,2}

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

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. Comparative simulation of optical vortices generation by spiral zone plates with a relief from silver and silica glass using a FDTD-method implemented in the FullWAVE software is presented. The right circularly polarized Gaussian pulse was used as incident light. An analysis of the Umov-Poynting vector, amplitude and phase distributions in the focal plane shows was the presence of complex optical vortices with an inverse energy flow in its' center. Comparison of simulation results for two types of spiral zone plate confirms the possibility of using the amplitude analog instead of the phase zone plate since it is simpler to manufacture.