

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ С ПОМОЩЬЮ СПИРАЛЬНОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ ИЗ СЕРЕБРА

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 FDTD-метода, реализованного в пакете FullWAVE (RSoft), промоделирован процесс формирования оптических вихрей в ходе распространения Гауссова пучка с круговой (левой или правой) поляризацией через фазовую и амплитудную спиральные зонные пластинки с топологическим зарядом 2, диаметром 8 мкм, фокусным расстоянием 532 нм. Исследование амплитуды и фазы распределений в фокальной плоскости показывает наличие оптических вихрей с топологическим зарядом 2. Анализ продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга показал наличие обратного потока энергии в области фокуса. При этом в случае использования амплитудной спиральной зонной пластинки величина обратного потока много меньше, чем в случае фазовой спиральной зонной пластинки.

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

**Цитирование:** 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.

### Введение

С момента появления в оптике понятия орбитального углового момента (ОУМ) прошло более 25 лет [1], но до сих пор вихревые лазерные пучки, несущие ОУМ, не потеряли своей актуальности. Большое количество современных работ посвящены изучению оптических вихрей [2–4]. Интерес к подобному рода пучкам связан с большим количеством различных приложений, где они могут быть использованы. 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 [5], в зондировании атмосферы и беспроводных коммуникационных системах [6], подводных системах передачи информации [7], а также в фиксации магнитных полей [8].

Для генерации оптических вихрей разрабатываются специальные оптические элементы [9–19]. Исследование и экспериментальная демонстрация генерации трехмерных объемных оптических вихрей на основе взаимодействия света с высокоэффективной диэлектрической метаповерхностью представлены в [9]. Несколько оптических вихрей с топологическими зарядами 2, 4, 6 формируются в различных порядках дифракции нанопластинки из аморфного кремния (коэффициент преломления  $n = 3,9231 + i0,1306$  для длины волны 780 нм) с размерами  $410 \times 175 \times 466$  нм и периодом 600 нм. Серия фазовых элементов Панчаратнам–Берри разработана в [10] для создания идеальных вихревых и векторных пучков. Векторные пучки на длине волны 633 нм с топологическими зарядами 1, 2, 3 и кольцевой структурой, диаметр которой не зависит от топологического заряда, формируются спиральной зонной пластинкой (СЗП), аксионом и зонной пла-

стиной (ЗП). Размер элементов был 6 мм, а фокусное расстояние линз составило 200 мм. С помощью FDTD-метода показано, что спиральная металлинза из аморфного кремния с единичным топологическим зарядом и числовой апертурой ( $NA = 1$ ) может остро сфокусировать оптический вихрь [11]. Дифракционный элемент для генерации оптических вихрей, основанный на фазовой модификации радиального смещения зон, был представлен в [12]. Роль так называемого параметра сдвига была также исследована, и в результате показано, что он является параметром регулирования размера вихря. Все результаты были проверены экспериментально, и продемонстрирована высокая степень соответствия теоретических и экспериментальных данных. В [13] рассматриваются децентрированные фазовые СЗП с дробным топологическим зарядом. В [14] показано, что использование СЗП с дробным топологическим зарядом и контроль начальной ее ориентации позволяет разрушить симметрию процесса фокусировки и получить ориентационно-селективные анизотропные вихревые фокусы. Численные результаты показывают, что бинарная структура элемента дает дополнительные высокоуровневые фокусы на оптической оси, а интенсивность в фокусе зависит от топологического заряда. В [15] теоретически и экспериментально исследуется спиральная фазово смещенная ЗП, позволяющая генерировать различные оптические вихри с заданным топологическим зарядом. Показано, что количество спиральных рукавов, также и спиральная кривизна импульса, зависят от параметра сдвига СЗП. Кроме того, показано, что до и после плоскости фокусировки формируются вихри с разными топологическими зарядами, при этом топологический заряд оптического вихря до фокуса постепенно трансформируется, чтобы образовать новый оптический вихрь после фокуса. В [16] теоретически и численно исследуются

пространственно-временные характеристики ультракоротких оптических вихрей, такие как распределения интенсивности, фазы, ОУМ и потока энергии. Ультракороткий вихревой импульс формируется с помощью спиральной ЗП с набором отверстий, которая была исследована с использованием интерферометрической системы Маха–Цендера. В [17] на базе СЗП и дифракционных структур с синусоидальной функцией пропускания области зон был спроектирован оптический элемент, который имеет возможность формировать однофокусную фазовую сингулярность.

В данной статье рассматривается генерация оптических вихрей с помощью амплитудной СЗП в тонкой серебряной пленке, напылённой на кварцевое стекло. Моделирование проводилось FDTD-методом с учетом зависимости диэлектрической проницаемости от частоты ((FD)<sup>2</sup>TD-методом), который реализован в пакете FullWAVE (RSoft). В качестве падающего излучения рассматривался Гауссов пучок с круговой поляризацией и длиной волны  $\lambda = 532$  нм. Для подробного изучения процесса генерации рассматривалась левая и правая круговая поляризация. В ходе моделирования были рассчитаны распределения фазы и амплитуды для каждой компоненты напряженности электрического поля, а также распределение интенсивности. Кроме того, рассматривалось распределение вектора Умова–Поинтинга, который показал наличие обратного потока энергии в области фокуса.

**Формирование оптического вихря фазовой СЗП**

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

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

где  $\text{sgn} x = (1, x > 0; -1, x < 0)$ ,  $r$  и  $\theta$  – полярные координаты,  $k$  – волновое число,  $f$  – фокусное расстояние. Рис. 1 демонстрирует бинарный шаблон рассматриваемой СЗП (а) и оптическую схему численного моделирования (б). Радиус элемента был выбран равным 4 мкм, а фокальное расстояние равно длине волны падающего излучения  $\lambda = 532$  нм. Топологический заряд СЗП составил  $m = 2$ .

Гауссов пучок с круговой поляризацией, длиной волны 532 нм и радиусом перетяжки 3 мкм был выбран в качестве падающего излучения. Оба типа круговой поляризации: левая (ЛКП) и правая (ПКП) – использовались в ходе данного исследования. Для расчета пространственного распределения интенсивности входного излучения с требуемой поляризацией использовался MATLAB. 2D-проекция интенсивности падающего излучения на шаблон оптического элемента представлена на рис. 1б.

Фазовая СЗП, выполненная из кварцевого стекла, высота рельефа  $h = \lambda = 532$  нм, рассматривалась как эталонный образец для сравнения. Для кварцевого стекла

использовалась модель дисперсии Селлмейера [18]. Параметры модели были взяты из работы [18].

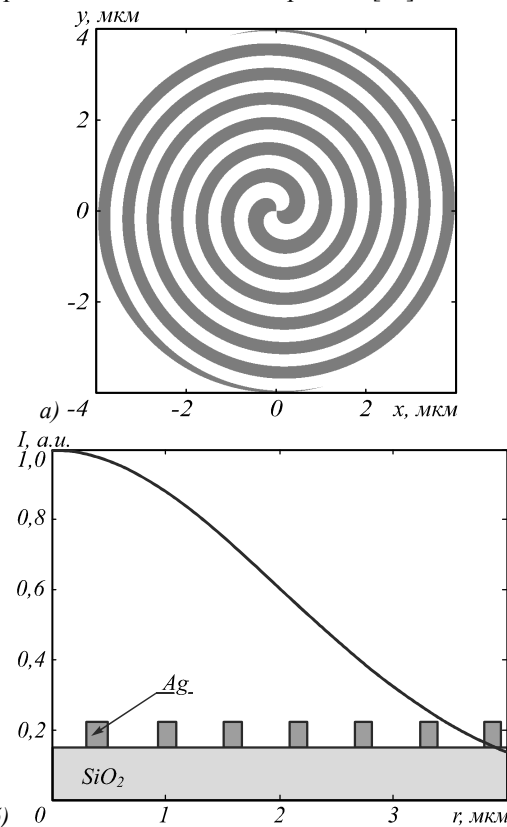


Рис. 1. Шаблон СЗП в поперечной (а) и продольной (б) плоскостях. Черная линия отображает распределение интенсивности в падающем излучении

Моделирование проводилось с помощью (FD)<sup>2</sup>TD-метода, реализованного в пакете FullWAVE (RSoft). При расчетах использовались следующие параметры сетки: шаги по поперечным и продольные координатам составили 15 нм 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%).

Для более детального исследования полученных результатов 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. 2–4.

Из рис. 2–4 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  $m = 3$  для ЛКП и  $m = 1$  для ПКП. Разница в топологических зарядах может быть объяснена тем фактом, что направления закрутки спирали СЗП и колебаний падающего излучения совпадают в случае КПК и противоположны друг другу в случае ЛКП [11].

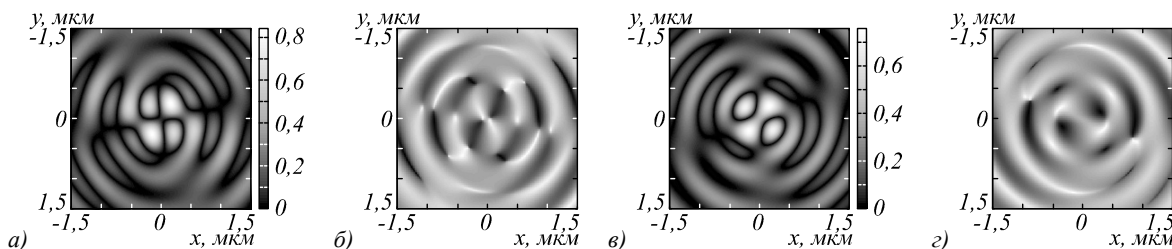


Рис. 2. Распределение амплитуды (а, в) и фазы (б, г) для компоненты  $E_x$  электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ( $f = 532$  нм) фазовой СЗП в ходе распространения Гауссова пучка с ЛКП (а, б) и ПКП (в, г)

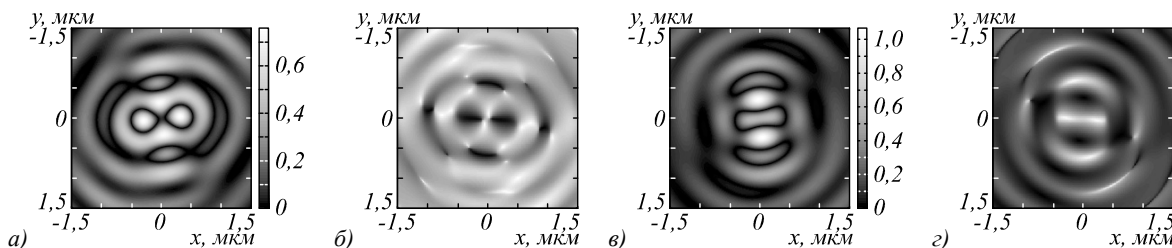


Рис. 3. Распределение амплитуды (а, в) и фазы (б, г) для компоненты  $E_y$  электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ( $f = 532$  нм) фазовой СЗП в ходе распространения Гауссова пучка с ЛКП (а, б) и ПКП (в, г)

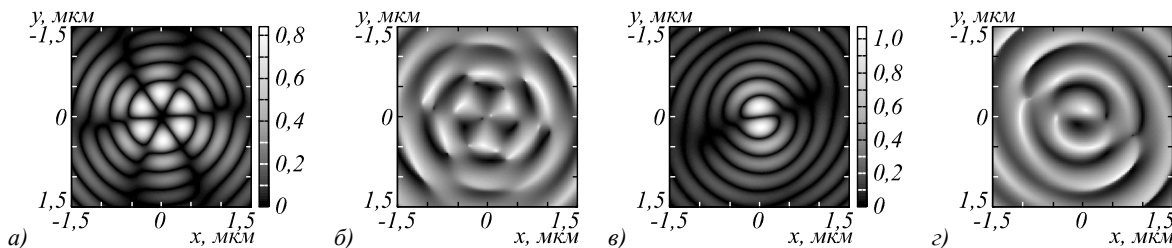


Рис. 4. Распределение амплитуды (а, в) и фазы (б, г) для компоненты  $E_z$  электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ( $f = 532$  нм) фазовой СЗП в ходе распространения Гауссова пучка с ЛКП (а, б) и ПКП (в, г)

**Формирование оптического вихря амплитудной СЗП**

В [20] показано, что амплитудная ЗП может формировать аналогичные дифракционные картины, что и фазовая ЗП. Основное различие между полученными распределениями заключается в величине максимальной интенсивности. Однако для получения подобных результатов необходимо подобрать высоту металлического рельефа. Так, в [21] показано, что серебряная ЗП с высотой рельефа 100 нм дает наиболее подходящее фокальное пятно.

В данной работе также была проведена серия численных экспериментов для выбора оптимальной высоты рельефа для серебряной СЗП. Для описания зависимости диэлектрической проницаемости от высоты использовалась модель Друде–Лоренца с параметрами из [22]. Параметром для оценки качества результата работы СЗП выступала максимальная интенсивность. Результаты численного моделирования представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что высота рельефа в 20 нм слишком мала и является достаточно прозрачной для падающего излучения, поэтому не может сфокусировать его. В то же время высота в 200 нм достаточно велика и приводит к большим потерям в энергии светового

пучка. Таким образом, из табл. 1 видно, что высота рельефа  $h = 100$  нм позволяет получить в фокусе максимальную интенсивность, которая лишь в два раза меньше максимальной интенсивности, формируемой фазовой СЗП. Результаты, представленные в табл. 1, согласуются с выводами, полученными в [21]. Таким образом, в данной работе высота серебряной пленки для изготовления рельефа была выбрана равной 100 нм для достижения аналогичных результатов, как и в случае фазовой СЗП. Кроме того, стоит отметить, что изготовление амплитудной СЗП представляется более легкой задачей, нежели травление фазовой СЗП с высотой рельефа 532 нм.

Табл. 1. Результаты моделирования для амплитудной СЗП

$h$ , нм	$I_{max}$ , а.е.	
	ЛКП	ПКП
20	3,1195	3,3831
100	4,1740	5,2285
200	3,7346	4,7452

Рис. 5 – 7 показывают распределение амплитуды и фазы элемента оптического вихря в фокальной плоскости в момент псевдвремени  $cT = 19,82$  мкм.

Рис. 5–7 демонстрируют аналогичные результаты для амплитудных и фазовых распределений формируемых оптических вихрей, что подтверждает возможность использования серебряной СЗП для их генерации. Стоит отметить: несмотря на то, что в работе не проводилось подробное исследование плазмонных эффектов, из полученных

результатов моделирования видно, что они не имеют большого влияния на процесс формирования оптических вихрей, как это было показано и для ЗП с  $m = 0$  [11].

На рис. 8 представлено двумерное распределение интенсивности поля в фокальной плоскости, а на рис. 9 их сечения по осям X и Y.

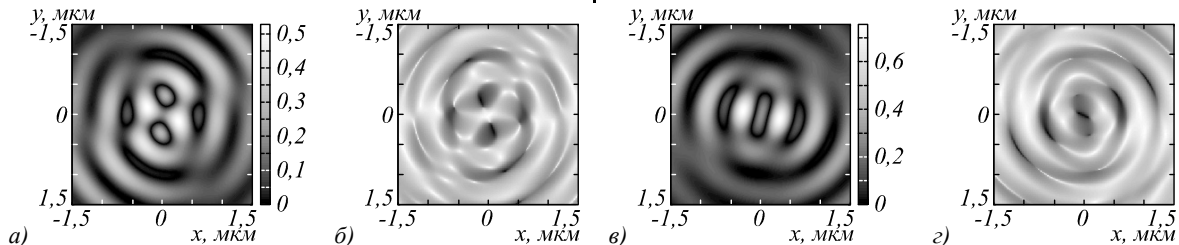


Рис. 5. Распределение амплитуды (а, в) и фазы (б, г) для компоненты  $E_x$  электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ( $f = 532$  нм) амплитудной СЗП (рис. 1) в ходе распространения Гауссова пучка с ЛКП (а, б) и ПКП (в, г)

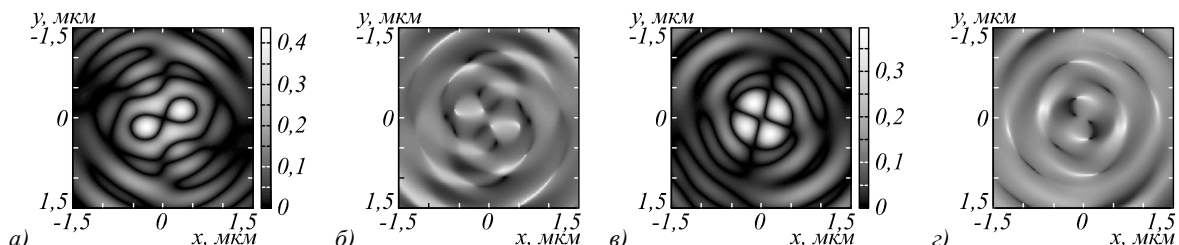


Рис. 6. Распределение амплитуды (а, в) и фазы (б, г) для компоненты  $E_y$  электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ( $f = 532$  нм) амплитудной СЗП (рис. 1) в ходе распространения Гауссова пучка с ЛКП (а, б) и ПКП (в, г)

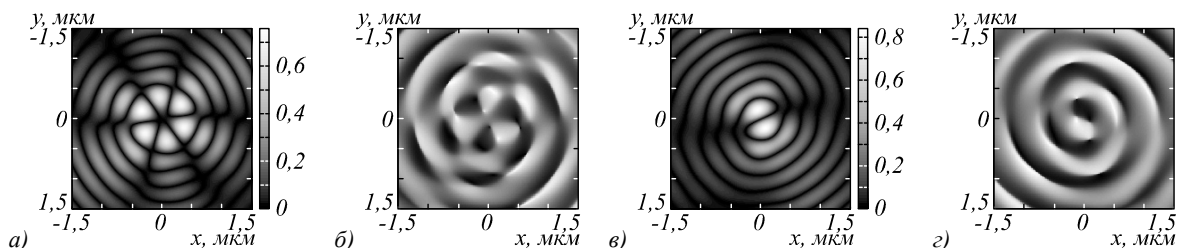


Рис. 7. Распределение амплитуды (а, в) и фазы (б, г) для компоненты  $E_z$  электрического поля, сформированного в фокальной плоскости ( $f = 532$  нм) амплитудной СЗП (рис. 1) в ходе распространения Гауссова пучка с ЛКП (а, б) и ПКП (в, г)

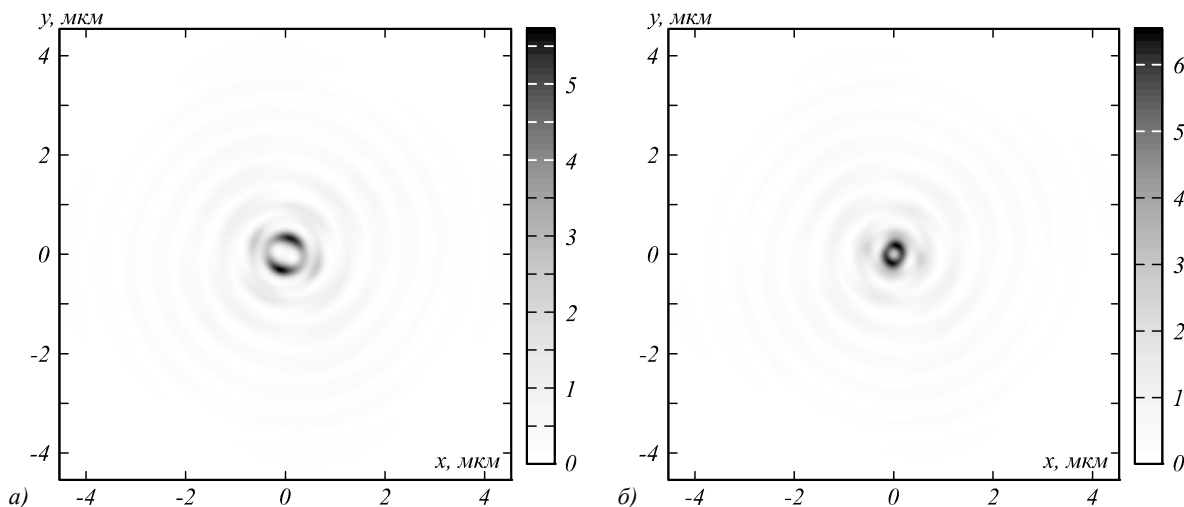


Рис. 8. Распределение интенсивности в фокальной плоскости амплитудной СЗП (рис. 1) для Гауссова пучка с ЛКП (а) и ПКП (б)

Из рис. 8 видно, что в фокусе формируется кольцо, максимальная интенсивность которого в 6 раз превосходит интенсивность падающего излучения. Однако стоит отметить, что кольцо имеет не совсем правильную форму: образуются утолщения в подобластях кольца под углом  $-45^\circ$  от оси  $Y$ . Также стоит заметить, что кольцо для пучка с ЛКП шире, чем для пучка с ПКП. Из рис. 9 видно, что ширина и радиусы световых колец равны 0,495 мкм и 0,361 мкм для ЛКП и 0,270 мкм и 0,165 мкм для

ПКП. В центре эллиптических колец наблюдается минимум.

### Формирование обратного потока

В работе [24] 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 работе также было проведено подобное исследование. На рис. 10 представлены итоги моделирования.

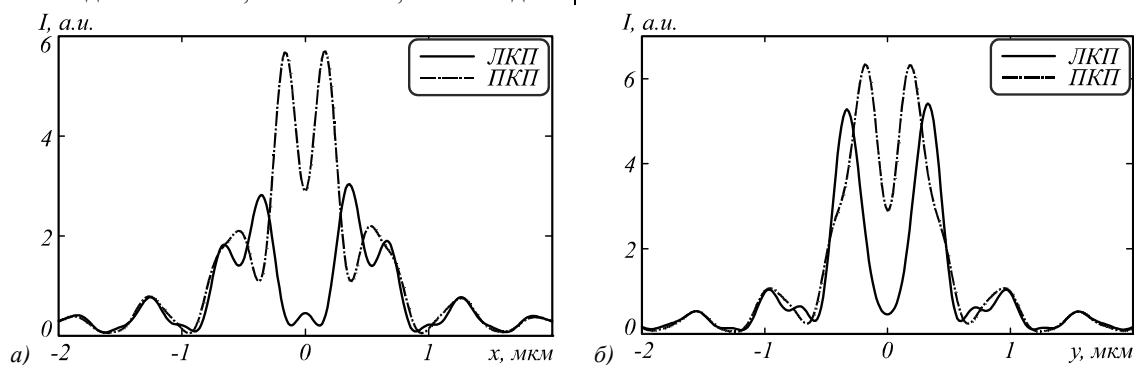


Рис. 9. Сечение интенсивности поля в фокусе амплитудной СЗП (рис. 1) при  $y = 0$  (а) и  $x = 0$  (б)

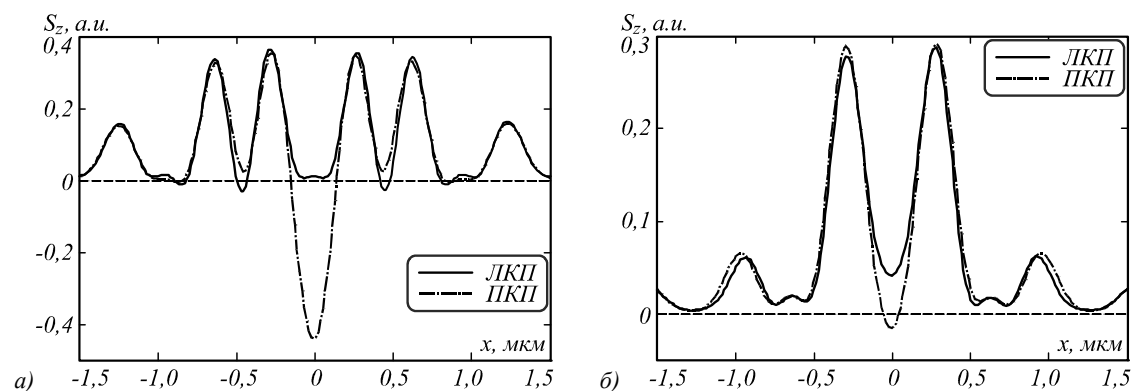


Рис. 10. Распределение продольной компоненты Умова–Поинтинга  $S_z$  в фокальной плоскости для фазовой (а) и амплитудной (б) СЗП

Из рис. 10 видно, что величина обратного потока в случае серебряной СЗП значительно ниже, вплоть до полного его исчезновения для ЛКП. При этом качественно распределение продольной компоненты вектора Умова–Поинтинга  $S_z$  также претерпевает определенные изменения, а именно уменьшаются боковые лепестки.

Стоит отметить, что продольную компоненту вектора Умова–Поинтинга формируют поперечные распределения напряженности электрического и магнитного полей:

$$S_z = \text{Re} [E_x H_y^* - E_y H_x^*]. \quad (2)$$

Таким образом, можно говорить о вихре второго порядка, формируемом в потоке энергии вдоль оси распространения излучения.

### Заключение

В данной статье рассматривается генерация оптических вихрей с помощью амплитудной СЗП в тонкой серебряной пленке, напыленной на кварцевое

стекло. Моделирование проводилось с помощью  $(\text{FD})^2\text{TD}$ -метода, который реализован в пакете Full-WAVE (RSoft). В качестве падающего излучения рассматривались Гауссовы импульсы с ЛКП и ПКП, длина волны импульсов была равна длине волны зеленого лазера  $\lambda = 532$  нм.

В ходе анализа результатов моделирования были рассчитаны распределения фазы и амплитуды для каждой компоненты напряженности электрического поля. Было показано, что амплитудная СЗП позволяет генерировать оптические вихри, максимальная интенсивность которых в фокальной плоскости в 6 раз превышает интенсивность падающего излучения. При этом амплитудные СЗП в отличие от фазовых СЗП легче в изготовлении в связи с тем, что высота рельефа амплитудной СЗП составляет 100 нм. В работе также анализировалась продольная компонента вектора Умова–Поинтинга, которая показала наличие обратного потока энергии в области фокуса. При этом в случае использования амплитудной СЗП величина обратного потока много меньше, чем для фазовой СЗП.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в части «Формирование оптического вихря фазовой СЗП», Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-07-01122, 18-07-01380) в части «Формирование оптического вихря амплитудной СЗП» и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части «Формирование обратного потока».

**Литература**

1. **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.
2. **Cheng, K.** The Poynting vector and angular momentum density of Swallowtail-Gauss beams / K. Cheng, G. Lu, X. Zhong // *Optics Communications*. – 2017. – Vol. 396. – P. 58-65. – DOI: 10.1016/j.optcom.2017.03.038.
3. **Котляр, В.В.** Орбитальный угловой момент астигматического Гауссова лазерного пучка / В.В. Котляр, А.А. Ковалёв // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 609-615. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-609-616.
4. **Mafakheri, E.** Realization of electron vortices with large orbital angular momentum using miniature holograms fabricated by electron beam lithography / E. Mafakheri, A.H. Tavabi, P. Lu, R. Balboni, F. Venturi, C. Menozzi, G.C. Gazzadi, S. Frabboni, A. Sit, R.E. Dunin-Borkowski, E. Karimi, V. Grillo // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 110, Issue 4. – 093113. – DOI: 10.1063/1.4977879.
5. **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.
6. **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.
7. **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, Issue 10. – 104004. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/10/104004.
8. **Yu, S.** Compositing orbital angular momentum beams in Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> crystal for magnetic field sensing / S. Yu, F. Pung, H. Liu, X. Li, J. Yang, T. Wang // *Applied Physics Letters*. – 2017. – Vol. 111, Issue 9. – 091107. – DOI: 10.1063/1.4989651.
9. **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, Issue 2. – P. 338-346. – DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00808.
10. **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.
11. **Котляр, В.В.** Формирование и фокусировка векторного оптического вихря с помощью металлинзы / 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.
12. **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, Issue 11. – P. 371. – DOI: 10.1007/s11082-017-1211-4.
13. **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, Issue 10. – P. 2641-2648. – DOI: 10.1364/AO.56.002641.
14. **Wei, L.** Fractional spiral zone plates / L. Wei, Y. Gao, X. Wen, Z. Zhao, L. Cao, Y. Gu // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2013. – Vol. 30, Issue 2. – P. 233-237. – DOI: 10.1364/JOSAA.30.000233.
15. **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, Issue 3. – P. 608-612. – DOI: 10.1364/JOSAB.34.000608.
16. **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, Issue 24. – P. 29864-29873. – DOI: 10.1364/OE.25.029864.
17. **Liang, Y.** Single-focus spiral zone plates / Y. Liang, E. Wang, Y. Hua, C. Xie, T. Ye // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42, Issue 13. – P. 2663-2666. – DOI: 10.1364/OL.42.002663.
18. **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, Issue 12. – 125435. – DOI: 10.1103/PhysRevB.71.125435.
19. **Degtyarev, S.A.** Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Issue 12. – P. B44-B48. – DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
20. **Kotlyar, V.V.** Tight focusing of laser light using a chromium Fresnel zone plate / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, M.V. Kotlyar, L. O'Faolain, E.S. Kozlova // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 17. – P. 19662-19671. – DOI: 10.1364/OE.25.019662.
21. **Kozlova, E.S.** Dependence of the focal spot parameters on the relief height of the amplitude zone plate / E.S. Kozlova, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, S.S. Stafeev, M.V. Kotlyar, L. O'Faolain // *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks*. – 2017. – 8025096. – DOI: 10.1109/ICTON.2017.8025096.
22. **Vial, A.** 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 // *Applied Physics A*. – 2011. – Vol. 103, Issue 3. – P. 849-853. – DOI: 10.1007/s00339-010-6224-9.
23. **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, Issue 22. – P. 5271-5283. – DOI: 10.1364/AO.37.005271.
24. **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.

**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 13 сентября 2018 г. Окончательный вариант – 2 ноября 2018 г.

**MODELING OF THE OPTICAL VORTEX GENERATION USING A SILVER SPIRAL ZONE PLATE**

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

<sup>1</sup> *IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 15,*

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

**Abstract**

Using a FDTD-method implemented in the FullWAVE (RSoft) software, a process of generating optical vortices during the propagation of a left- or right-hand circularly polarized Gaussian pulse through a phase and amplitude spiral zone plate with topological charge 2, a diameter of 8 μm, and a focal length of 532 nm is numerically modeled. An investigation of the amplitude and phase distributions in the focal plane shows the presence of optical vortices with topological charge 2. Analysis of the longitudinal component of the Umov-Poynting vector shows the presence of an inverse energy flow in the focal plane. In the case of using an amplitude spiral zone plate, the magnitude of the reverse flow decreases sharply until it disappears completely for the left circularly polarized incident beams.

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

**Citation:** 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.

**Acknowledgements:** This work was partly funded by the Russian Science Foundation under grant No. 18-19-00595 (simulation of the optical vortex generation using a phase SZP), the Russian Foundation for Basic Research under grants ## 18-07-01122, 18-07-01380 (optical vortex generation with an amplitude SZP), the RF Ministry of Science and Higher Education under an FSRC "Crystallography and Photonics" RAS' state project (energy backflow investigation).

**References**

- [1] Padgett MJ. Orbital angular momentum 25 years on. *Opt Express* 2017; 25(10): 11265-11274. DOI: 10.1364/OE.25.011265.
- [2] Cheng K, Lu G, Zhong X. The Poynting vector and angular momentum density of Swallowtail-Gauss beams. *Opt Commun* 2017; 396: 58-65. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.03.038.
- [3] Kotlyar VV, Kovalev AA. Orbital angular momentum of an astigmatic gaussian laser beam [In Russian]. *Computer Optics* 2017; 41(5): 609-615. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-609-616.
- [4] Mafakheri E, Tavabi AH, Lu P, Balboni R, Venturi F, Menozzi C, Gazzadi GC, Frabboni S, Sit A, Dunin-Borkowski RE, Karimi E, Grillo V. Realization of electron vortices with large orbital angular momentum using miniature holograms fabricated by electron beam lithography. *App Phys Lett* 2017; 110(4): 093113. DOI: 10.1063/1.4977879.
- [5] Backlund MP, Lew MD, Backer AS, Sahl SJ, Grover G, Agrawal A, Piestun R, Moerner WE. The double-helix point spread function enables precise and accurate measurement of 3D single-molecule localization and orientation. *Proc SPIE* 2013; 8590: 85900L. DOI: 10.1117/12.2001671.
- [6] 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.
- [7] Morgan KS, Miller JK, Cochenour BM, Li W, Li Y, Watkins RJ, Johnson EG. Free space propagation of concentric vortices through underwater turbid environments. *J Opt* 2016; 18(10): 104004. DOI: 10.1088/2040-8978/18/10/104004.
- [8] Yu S, Pung F, Liu H, Li X, Yang J, Wang T. Compositing orbital angular momentum beams in Bi4Ge3O12 crystal for magnetic field sensing. *Appl Phys Lett* 2017; 111(9): 091107. DOI: 10.1063/1.4989651.
- [9] Huang L, Song X, Reineke B, Li T, Li, Liu J, Zhang S, Wang Y, Zentgraf T. Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces. *ACS Photonics* 2017; 4(2): 338-346. DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00808.
- [10] 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.
- [11] Kotlyar VV, Nalimov AG. A vector optical vortex generated and focused using a metalens [In Russian]. *Computer Optics* 2017; 41(5): 645-654. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-645-654.
- [12] Sabatyan A, Behjat Z. Radial phase modulated spiral zone plate for generation and manipulation of optical perfect

- vortex. *Opt Quant Electron* 2017; 49(11): 371. DOI: 10.1007/s11082-017-1211-4.
- [13] Zhou Y, Feng S, Nie S, Ma J, Yuan C. Anisotropic edge enhancement with spiral zone plate under femtosecond laser illumination. *App Opt* 2017; 56(10): 2641-2648. DOI: 10.1364/AO.56.002641.
- [14] Wei L, Gao Y, Wen X, Zhao Z, Cao L, Gu Y. Fractional spiral zone plates. *J Opt Soc Am A* 2013; 30(2): 233-237. DOI: 10.1364/JOSAA.30.000233.
- [15] Rafighdoost J, Sabatyan A. Spirally phase-shifted zone plate for generating and manipulating multiple spiral beams. *J Opt Soc Am B* 2017; 34(3): 608-612. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000608.
- [16] Ma L, Zhang P, Li Z, Liu C, Li X, Zhang Y, Zhang R, Cheng C. Spatiotemporal evolutions of ultrashort vortex pulses generated by spiral multi-pinhole plate. *Opt Express* 2017; 25(24): 29864-29873. DOI: 10.1364/OE.25.029864.
- [17] Liang Y, Wang E, Hua Y, Xie C, Ye T. Single-focus spiral zone plates. *Opt Lett* 2017; 42(13): 2663-2666. DOI: 10.1364/OL.42.002663.
- [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; 71(12): 125435. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.125435.
- [19] Degtyarev SA, Porfirev AP, Khonina SN. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon. *Appl Opt* 2016; 55(12): B44-B48. DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
- [20] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, Kotlyar MV, O'Faolain L, Kozlova ES. Tight focusing of laser light using a chromium Fresnel zone plate. *Opt Express* 2017; 25(17): 19662-19671. DOI: 10.1364/OE.25.019662.
- [21] Kozlova ES, Kotlyar VV, Nalimov AG, Stafeev SS, Kotlyar MV, O'Faolain L. Dependence of the focal spot parameters on the relief height of the amplitude zone plate. *Proc 19<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks 2017*: 8025096. DOI: 10.1109/ICTON.2017.8025096.
- [22] 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; 103(3): 849-853. DOI: 10.1007/s00339-010-6224-9.
- [23] Rakić AD, Djurišić AB, Elazar JM, Majewski ML. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *App Opt* 1998; 37(22): 5271-5283. DOI: 10.1364/AO.37.005271.
- [24] 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.

#### *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 September 13, 2018. The final version – November 2, 2018.*