

# Исследование свойств нелинейных спиральных фазовых пластинок

А.П. Порфирьев<sup>1,2</sup>, Г.Е. Гридин<sup>2</sup>, В.И. Логачев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Численно и экспериментально исследованы свойства нелинейных спиральных фазовых пластинок (СФП) с функцией пропускания  $\exp(im\varphi^n)$ . В отличие от обычных СФП, нелинейные СФП могут использоваться для генерации вихревых некольцевых распределений света в форме световых спиралей. Мы исследуем генерацию таких лазерных пучков как в параксиальном приближении, так и в условиях острой фокусировки и демонстрируем преобразования возникающие в фокальной области.

## 1. Введение

В настоящее время вихревые лазерные пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) широко используются во многих областях науки и техники - лазерное манипулирование [1, 2], оптические коммуникации [3, 4], оптическая микроскопия [5, 6], лазерная обработка материалов [7, 8], изображающая оптика [9] и многие другие [10]. Наиболее популярным и эффективным методом генерации таких пучков является использование так называемой спиральной фазовой пластинки (СФП), оптического элемента, высота которого меняется линейно с азимутальным углом [11, 12]. Такие традиционные СФП предназначены для генерации вихревых пучков с фиксированным топологическим зарядом (ТЗ) и однородной плотностью ОУМ. На сегодняшний день были предложены различные модификации СФП, позволяющие генерировать вихревые пучки с настраиваемым ТЗ и в широкой спектральной полосе в видимом спектре [13, 14]. В 2014 году была представлена нетрадиционная СФП со спиральным фазовым распределением, которое не изменяется линейно с увеличением азимутального угла (как в случае обычной СФП), а имеет зависимость, описываемую как  $2\pi m(\varphi/2\pi)^n$  [15]. Формируемые в этом случае вихревые пучки имели спиральную форму с градиентом интенсивности и фазы. В этом случае ОУМ генерируемых световых полей напрямую определялся ТЗ пластинки  $m$ . Впоследствии было изучено распространение таких вихрей в свободном пространстве и при их фокусировке, и было показано, что распределение интенсивности образующегося вихревого пучка зависит от величины  $n$ , а ТЗ  $m$  определяет размер образующегося спиралевидного распределения [16]. Уникальная структура таких вихревых пучков определяет поток энергии, направленный по спирали, что может быть полезным при лазерном манипулировании нано- и микрообъектами. В этой статье мы исследуем нелинейные СФП на примере СФП с функцией пропускания вида  $\exp(im\varphi^n)$ . Ранее

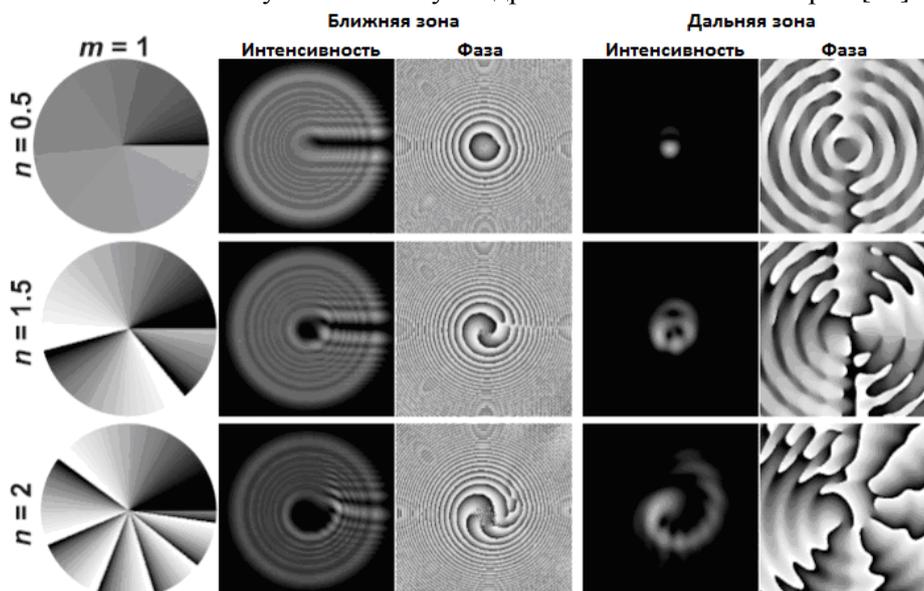
мы показали, что при любом виде функциональной зависимости подэкспоненциального выражения функции пропускания в дальней зоне формируется вихревое распределение со спиральным распределением интенсивности [17]. Такие световые поля полезны для лазерной обработки материалов (например, изготовления хиральных нано- и микроструктур с контролируемым параметром хиральности [18]) и лазерных манипуляций (перемещение захваченных частиц по заданным траекториям с заданной скоростью [19]).

## 2. Дизайн нелинейных спиральных фазовых пластинок

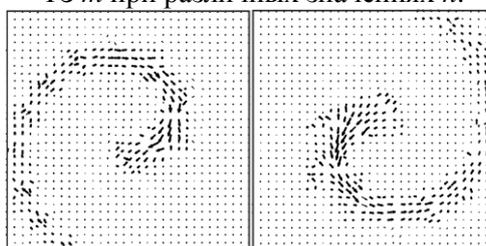
Рассмотрим нелинейные СФП на примере элементов со следующей степенной фазовой функцией пропускания

$$T(r, \varphi) = \text{circ}\left(\frac{r}{R}\right) \exp(im\varphi^n) \quad (1)$$

где  $(r, \varphi)$  – полярные координаты,  $R$  – радиус элемента,  $n$  – произвольное число (может быть как целым, так и дробным), а  $m$  – топологический заряд пластинки. Как видно из распределений ближнего поля, представленных на рисунке 1 и полученных с помощью преобразований Френеля и Фурье, формируемые таким элементом распределения интенсивности аналогичны полученным в случае дробных оптических вихрей [20].



**Рисунок 1.** Световые поля, сформированные с помощью нелинейных СФП с фиксированным ТЗ  $m$  при различных значениях  $n$ .



**Рисунок 2.** Вычисленный поток энергии для световых полей, сформированных нелинейными СФП с ТЗ  $m = -2$  (левая картинка) и 2 (правая картинка).

При этом ориентация темной полосы вращается на угол  $\pi/2$  при распространении в дальнее поле. Кроме того, увеличение значения степени  $n$  в случае фиксированного ТЗ приводит к увеличению поперечного размера генерируемого распределения интенсивности. Когда значение степени  $n$  фиксировано, увеличение ТЗ приводит к увеличению поперечного размера формируемой световой спирали. Разность фаз на концах сформированной световой спирали

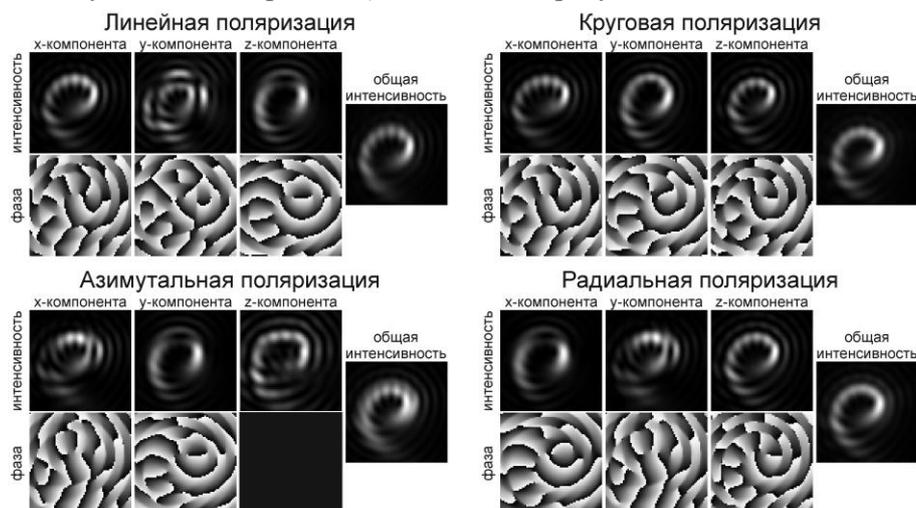
соответствует структуре исходной нелинейной СФП. Такие сформированные в дальней зоне распределения светового поля имеют спиралевидное распределение потока энергии, вычисляемого как  $J(x, y) = I(x, y) \nabla \varphi(x, y)$ , где  $I(x, y)$  - распределение интенсивности и  $\nabla \varphi$  - градиент фазы [21]. При этом направление потока энергии определяется знаком ТЗ нелинейной СФП (см. рисунок 2).

### 3. Острая фокусировка световых полей, сформированных нелинейными спиральными фазовыми пластинками.

Для исследования острой фокусировки световых полей, сформированных с помощью нелинейных СФП, мы использовали хорошо известные формулы Ричардса-Вольфа следующего вида [22]:

$$E(\rho, \varphi, z) = \frac{if}{\lambda} \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} B(\theta, \phi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \phi) \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\phi - \varphi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\phi, \quad (2)$$

где  $(\rho, \varphi, z)$  – цилиндрические координаты в фокальной плоскости,  $(\theta, \phi)$  – сферические координаты в выходном зрачке оптической системы,  $B(\theta, \phi)$  – комплексная функция пропускания,  $T(\theta)$  – функция аподизации зрачка ( $T(\theta) = (\cos \theta)^{1/2}$  для микробъективов),  $\mathbf{P}(\theta, \phi)$  – поляризационная матрица,  $n \sin \alpha$  – числовая апертура оптической системы,  $n$  – показатель преломления окружающей среды,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны излучения и  $f$  – фокусное расстояние оптической системы. Результаты модулирования острой фокусировки световых полей, сформированных нелинейной СФП с функцией пропускания  $\exp(i\varphi^2)$  при различных состояниях поляризации исходного лазерного пучка (линейная, круговая, радиальная и азимутальная поляризации), показаны на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Острая фокусировка световых полей, сформированных нелинейной СФП с функцией пропускания  $\exp(i\varphi^2)$  при различных состояниях поляризации исходного лазерного пучка.

### 4. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-37-70025), а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение 007-ГЗ/Ч3363/26).

### 5. Литература

- [1] Simpson, N.B. A gradient method for design of multiorder varied-depth binary diffraction gratings – a comparison / N.B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, M.J. Padgett // Opt. Lett. – 1997. – Vol. 22(1). – P. 52-54.

- [2] Cojoc, D. Laser trapping and micro-manipulation using optical vortices / D. Cojoc, V. Garbin, E. Ferrari, L. Businaro, F. Romanato, E. Di Fabrizio // *Microelectron. Eng.* – 2005. – Vol. 78-79. – P. 125-131.
- [3] Bozinovic, N. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, S. Ramachandran // *Science.* – 2013. – Vol. 340(6140). – P. 1545-1548.
- [4] Willner, A.E. Optical communications using orbital angular momentum beams / A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M.P.J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A.F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi // *Adv. Opt. Photon.* – 2015. – Vol. 7(1). – P. 66-106.
- [5] Ritsch-Marte, M. Orbital angular momentum light in microscopy // *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng.* – 2017. – Vol. 375(2087). – P. 20150437.
- [6] Yan, L. Vortex fibers for STED microscopy / L. Yan, P. Kristensen, S. Ramachandran // *APL Photonics.* – 2019. – Vol. 4(2). – P. 022903.
- [7] Toyoda, K. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures / K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu // *Nano Lett.* – 2013. – Vol. 12(7). – P. 3645-3649.
- [8] Omatsu, T. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures / T. Omatsu, K. Miyamoto, K. Toyoda, R. Morita, Y. Arita, K. Dholakia // *Adv. Opt. Mater.* – 2019. – Vol. 7(14). – P. 1801672.
- [9] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // *Light Sci. Appl.* – 2019. – Vol. 8. – P. 90.
- [10] Yao, A.M. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications / A.M. Yao, M.J. Padgett // *Adv. Opt. Photon.* – 2011. – Vol. 3. – P. 161-204.
- [11] Khonina, S.N. The phase rotor filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkaryev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // *J. Mod. Opt.* – 1992. – Vol. 39(5). – P. 1147-1154.
- [12] Beijersbergen, M.W. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate / M.W. Beijersbergen, R.C. Coerwinkel, M. Kristensen, J.P. Woerdman // *Opt. Commun.* – 1994. – Vol. 112. – P. 321-327.
- [13] Swartzlander Jr., G.A. Achromatic optical vortex lens // *Opt. Lett.* – 2006. – Vol. 31. – P. 2042-2044.
- [14] Xie, Q. Optical vortices generated by multi-level achromatic spiral phase plates for broadband beams / Q. Xie, D. Zhao // *Opt. Commun.* – 2008. – Vol. 281. – P. 7-11.
- [15] Li, P. Spiral autofocusing Airy beams carrying power-exponent-phase vortices / P. Li, S. Liu, T. Peng, G. Xie, X. Gan, J. Zhao // *Opt. Express.* – 2014. – Vol. 22. – P. 7598-7606.
- [16] Lao, G. Propagation of the power-exponent-phase vortex beam in paraxial ABCD system / G. Lao, Z. Zhang, D. Zhao // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24. – P. 18082-18094.
- [17] Porfirev, A. / A.P. Porfirev, A.V. Ustinov, V.I. Logachev, S.N. Khonina // submitted to *Opt. Lett.*
- [18] Syubaev, S. Zero-orbital-angular-momentum laser printing of chiral nanoneedles / S. Syubaev, A. Porfirev, A. Zhizhchenko, O. Vitrik, S. Kudryashov, S. Fomchenkov, S. Khonina, A. Kuchmizhak // *Opt. Lett.* – 2017. – Vol. 42(23). – P. 5022-5025.
- [19] Rodrigo, J.A. Dynamic morphing of 3D curved laser traps for all-optical manipulation of particles / J.A. Rodrigo, M. Angulo, T. Alieva // *Opt. Express.* – 2018. – Vol. 26. – P. 18608-18620.
- [20] Strohaber, J. Nonlinear mixing of optical vortices with fractional topological charge in Raman sideband generation / J. Strohaber, Y. Boran, M. Sayrac, L. Johnson, F. Zhu, A.A. Kolomenskii, H.A. Schuessler // *J. Opt.* – 2017. – Vol. 19(1). – P. 015607.
- [21] Singh, B.K. Study of internal energy flows in dipole vortex beams by knife edge test / B.K. Singh, M. Bahl, D.S. Mehta, P. Senthilkumaran // *Opt. Commun.* – 2013. – Vol. 293. – P. 15-21.

- [22] Richards, W. Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system / W. Richards, E. Wolf // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1959. – Vol. 253. – P. 358-379.

## Investigation of properties of nonlinear spiral phase plates

A.P. Porfirev<sup>1,2</sup>, G.E. Gridin<sup>2</sup>, V.I. Logachev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

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

**Abstract.** We numerically and experimentally investigate the properties of nonlinear spiral phase plates (SPPs) with the transmission function  $\exp(im\varphi^n)$ . In contrast to conventional SPPs, nonlinear SPPs can be used for the generation of vortex non-ring light distributions in the form of light spirals. We study the generation of such laser beams both in the paraxial approximation and under the sharp focusing conditions and demonstrate the transformations arising in the focal plane.