

Влияния отклонений 3D формы спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции

П. А. Хорин¹, С. Н. Хонина^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника»
РАН, Самара, Россия

В данной работе выполнено исследование влияния разных типов отклонений формы и положения спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции. Рассмотрено действие идеальной спиральной фазовой пластинки и нелинейного спирального дифракционного оптического элемента, а также показано влияние несоосности входного пучка и элемента на свойства формируемого распределения интенсивности. В результате анализа получено, что отклонения 3D формы спиральной микроструктуры незначительно влияют на фазу вихревого пучка. Показано влияние высоты, радиуса и дискретизации по полярному углу φ оптического элемента на распределения интенсивности, т.е. структуру пучка. Несоосность в оптической системе приводит к значительному искажению структуры вихревого пучка.

Ключевые слова: Обобщённая спиральная фазовая пластинка, Вихревые пучки, Ближняя зона дифракции.

Цитирование: **Хорин, П. А.** Влияния отклонений 3D формы спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции / П. А. Хорин, С. Н. Хонина // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 383–387.

Введение

В 1992 году в работе [1] было показано, что оптические вихревые пучки со спиральным волновым фронтом обладают орбитальным угловым моментом (ОУМ). Однако при изготовлении оптических элементов [2], особенно с микроструктурой, таких как метаповерхности или оптические микроэлементы [3], полученный прототип может не вполне совпадать с рассчитанной математической моделью, что приводит к изменению свойств формируемого лазерного пучка [4].

1. Численное моделирование

В качестве оптического элемента рассматривается как линейная [5], так и нелинейная фазовая пластинка [6]. Известно, что высота оптического элемента должна быть согласована с длиной волны λ падающего пучка. Соотношение для расчёта высоты элемента h имеет следующий вид: $h(x, y) = \psi(x, y) / k(n-1)$, где $\psi(x, y) = \alpha(\tan^{-1}(y/x))^q$ – фаза оптического

элемента, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число, n – показатель преломления материала, из которого изготовлен элемент, α – топологический заряд, q – положительное целое число.

В качестве входного сигнала используется Гауссов пучок, который можно описать формулой: $G_{\sigma}(x, y) = -(x^2 + y^2) / \sigma^2$, где σ – радиус перетяжки пучка.

2. Численное моделирование

Для анализа влияния нелинейности профиля СФП было выполнено моделирование действия обобщённой СФП в ближней зоне дифракции, регистрация интенсивности осуществлялась в одной плоскости z_0 .

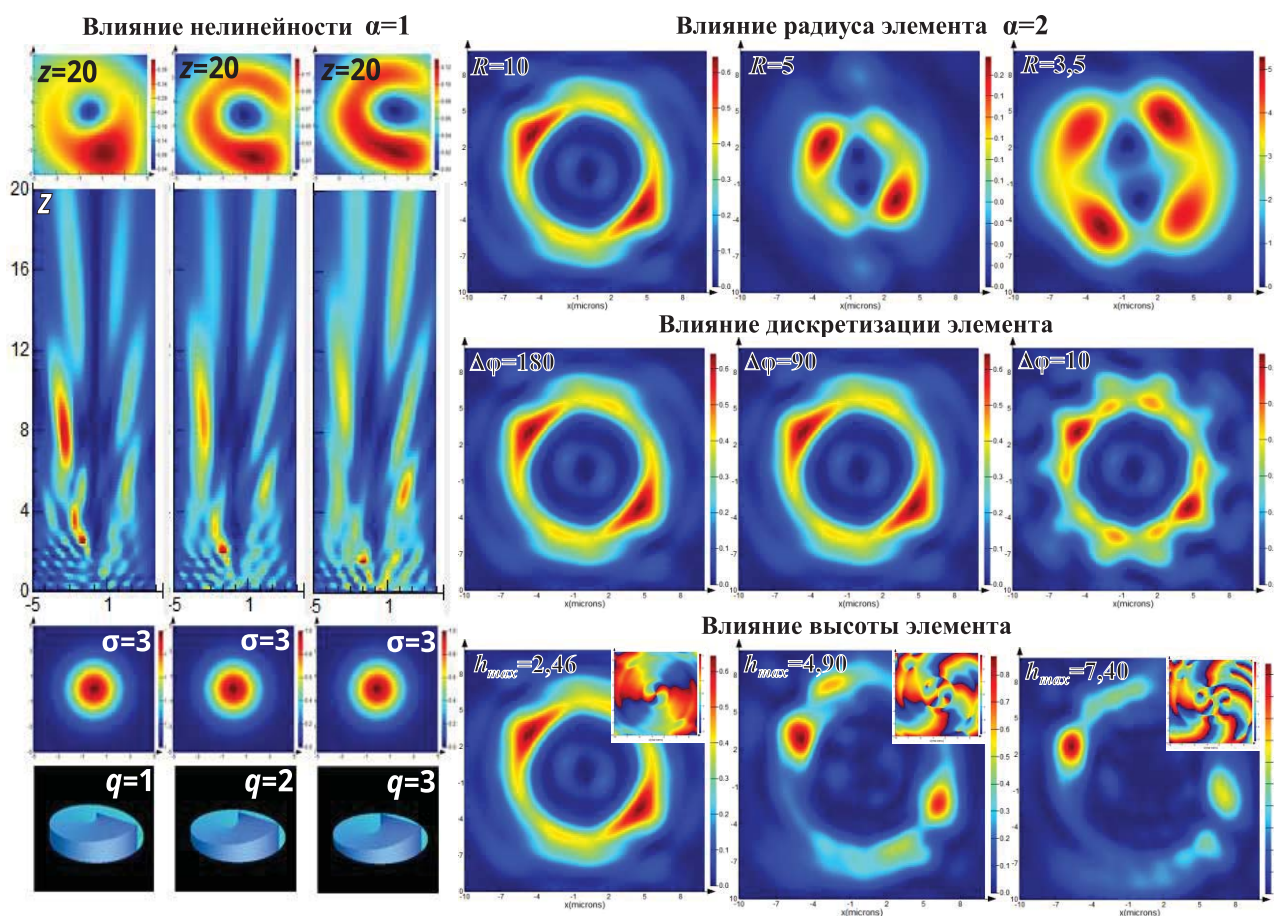


Рис. 1. Результаты численного моделирования действия СФП. Влияние нелинейности, радиуса, дискретизации и высоты элемента на свойства формируемого пучка

Из рисунка 1 видно, что действие классического элемента ($\alpha=1$), отличающегося только уровнем линейной зависимости, приводит к формированию вихревого пучка в ближней зоне дифракции. Однако при изменении линейности ($q=2, q=3$) оптического элемента в плоскости $z=20$ мкм детектируется незамкнутое кольцо.

Далее было выполнено исследование влияния высоты, радиуса и дискретизации по полярному углу φ оптического элемента. Результаты расчетов приведены на рисунке 1, из которых следует, что при моделировании действия классической СФП ($q=1, \alpha=2$) радиус элемента влияет на ширину кольца вихревого пучка.

Исследование влияния дискретизации элемента $\Delta\varphi$ по полярному углу φ показало, что уменьшение количества секторов в 2 раза с 180 до 90 незначительно влияет на структуру вихревого пучка.

Высота элемента h_{\max} значительно влияет на распределение интенсивности и фазы сформированного пучка в ближней зоне. При изменении высоты элемента вихревая фаза пучка сохраняется, однако изменяется топологический заряд кратно параметру h_{\max} .

В дополнение к анализу влияния отклонений 3D формы спиральной микроструктуры было исследовано влияние радиуса и смещение входного Гауссова пучка $G_c(x, y)$ на свойства формируемого вихревого пучка. Из рисунка 2 видно, что радиус пучка R_0 влияет на ширину кольца. Фаза сохраняет свои вихревые свойства и практически не изменяется в зависимости от радиуса входного пучка.

Для анализа влияния несносности входного пучка и оптического элемента, проведено смещение центра Гауссова пучка вдоль оси X на ΔR_0 мкм. На основе численных расчетов получено, что структура пучка сильно изменяются при несносности. Из графиков на рисунке 2 видно, что при увеличении смещения ΔR_0 структура вихревого пучка в виде кольца начинает распадаться.

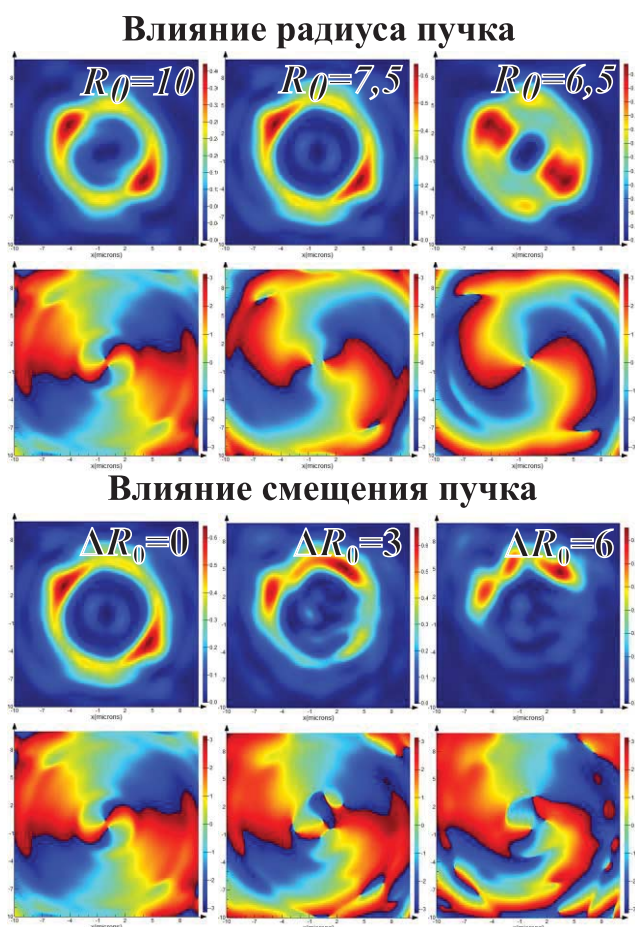


Рис. 2. Результаты численного моделирования действия СФП. Влияние радиуса и смещения пучка на свойства формируемого пучка.

Заключение

В работе проведено исследование влияния разных типов отклонений формы и положения спиральной микроструктуры на свойства вихревого пучка в ближней зоне дифракции. В результате анализа получено, что отклонения 3D формы спиральной микроструктуры незначительно влияют на вихревые свойства формируемого пучка, но в большей степени влияет на его структуру. По распределению интенсивности в ближней зоне дифракции можно сделать вывод, что каждый из рассмотренных параметров приводит к перераспределению энергии.

Что касается влияния радиуса входного Гауссова пучка и его смещения относительно центра оптического элемента, то оба этих параметра не меняют фазу сформированного вихревого пучка и его свойства. Несоосность в оптической системе приводит к потере структуры кольца вихревого пучка.

Полученные результаты могут быть полезны при использовании подстраиваемых оптических элементов [7], а также микроструктур, формируемых в фоточувствительных средах [8].

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-20075) и в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021-2030 годы в рамках программы "Приоритет-2030" при поддержке Правительства Самарской области.

Список источников

- [1] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman // Phys. Rev. A. – 1992. – Vol. 45. – P. 8185-8189.
- [2] Oemrawsingh, S. S. R. Production and characterization of spiral phase plates for optical wave-lengths / S. S. R. Oemrawsingh, J. A. W. van Houwelingen, E. R. Eliel, J. P. Woerdman, E. J. K. Verstegen, J. G. Kloosterboer and G. W. Hooft. // Appl. Opt. – 2004. – Vol. 43. – P.688–694.
- [3] Yu, Y. J. Focusing characteristics of optical fiber axicon microlens for near-field spectroscopy: dependence of tip apex angle / Y. J. Yu, H. Noh, M. H. Hong, H. R. Noh, Y. Arakawa, and W. Jhe // Opt. Commun. – 2006. – Vol. 267(1). – P.264-270.
- [4] M. W. Beijersbergen, . Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate / M. W. Beijersbergen, R. P. C. Coerwinkel, M. Kristensen and J. P. Woerdman // Opt. Commun. – 1994. – Vol. 112. – P. 321–327.
- [5] Li, P. Spiral autofocusing Airy beams carrying power-exponent-phase vortices / P. Li, S. Liu, T. Peng, G. Xie, X. Gan, and J. Zhao // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22. – P. 7598–7606.
- [6] Rotschild, C. Adjustable spiral phase plate / C. Rotschild, S. Zommer, S. Moed, O. Hershcovitz and S. G. Lipson // Appl. Opt. – 2004. – Vol. 43. – P. 2397–2399.
- [7] Priimagi, A. Azopolymer-based micro- and nanopatterning for photonic applications / A. Priimagi, A. Shevchenko // J. Polym. Sci. B Polym. Phys. – 2014. – Vol. 52. – P.163–182.

- [8] Syubaev, S. Chirality of laser-printed plasmonic nanoneedles tunable by tailoring spiralshape pulses / S. Syubaev S., A. Zhizhchenko, O. Vitrik, A. Porfirev, S. Fomchenkov, S. Khonina, S. Kudryashov, A. Kuchmizhak // Applied Surface Science. – 2019. – Vol. 470. – P. 526-534.

Influences of deviations of the 3D form of the spiral microstructure on the properties of the formed vortex beam in the near diffraction zone

P. A. Khorin¹, S. N. Khonina^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara 443086, Russia

² Image Processing Systems Institute of RAS—Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara 443001, Russia.

The effect of various types of deviations in the shape and position of the helical microstructure on the properties of the formed vortex beam in the near diffraction zone was studied. The effect of an ideal helical phase plate and a nonlinear helical diffractive optical element is considered, and the influence of misalignment of the input beam and the element on the properties of the formed intensity distribution is shown. As a result of the analysis, it was found that deviations of the 3D shape of the helical microstructure have little effect on the phase of the vortex beam. The influence of the height, radius, and sampling over the polar angle φ of the optical element on the intensity distributions is shown, i.e. beam structure. Misalignment in the optical system leads to significant distortion of the vortex beam structure.

Keywords: Diffractive optics, Generalized spiral phase plate, Vortex beams, Near diffraction zone.