

# Дифракция линейно-поляризованного Гауссова пучка на эллиптических пластинках

С.К.Сергунин

Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
stanislav.sergynin@gmail.com

С.Н. Хонина

ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и  
фотоника» РАН  
Самара, Россия  
khonina@ipsiras.ru

**Аннотация**—В данной работе помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD) выполнены расчеты дифракции лазерного Гауссова пучка как на отдельных диэлектрических пластинках эллиптической формы, так и на комплекте таких пластин, повернутых относительно друг друга. Исследована возможность формирования пучка с фазовой сингулярностью при использовании комплекта повернутых эллиптических пластин.

**Ключевые слова** — диэлектрические пластины эллиптической формы, метод FDTD, фазовая сингулярность

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Лазерные пучки с сингулярной фазой (вихревой или линейной) [1, 2], которые также относятся к структурированным пучкам, применяются в различных приложениях, таких как оптический захват и манипулирование микрочастицами, уплотнение каналов оптической передачи информации, лазерное микроструктурирование, сверхразрешение, и многие другие. Известно много способов формирования сингулярных пучков с использованием дифракционных оптических элементов, пространственного модулятора света, анизотропных кристаллов, метаповерхностей и различных микроэлементов [3-5]. В связи с трендом на миниатюризацию оптических устройств все больше внимание уделяется исследованию дифракции лазерного излучения на оптических микроэлементах, среди которых конические аксиконы сложной формы [6], классические и нелинейные спиральные фазовые пластинки [7, 8], а также микроструктуры, сформированные в пленках фоточувствительных материалов [9]. Отметим, что для формирования спиральных и вихревых пучков также используются скрученные волокна и аксиконы [10, 11].

Известно, что 3D структура оптического элемента наиболее заметно влияют на картину дифракции падающего излучения в ближней зоне. В данной работе с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD) исследуется дифракция лазерного Гауссова пучка на диэлектрических пластинках эллиптической формы, а также на стопе таких пластин, повернутых относительно друг друга с целью формирования пучка с фазовой сингулярностью.

С использованием программного продукта Lumerical были выполнены расчеты дифракции X-линейно-поляризованного Гауссова пучка на стеклянных (показатель преломления  $n = 1,5$ ) пластинках эллиптической формы (рис. 2).

Пространственное распределение падающего Гауссова пучка описывается следующей формулой:

$$G(x, y) \propto \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где  $\sigma = 3\lambda$ ,  $\lambda = 1,5$  мкм.

Временное распределение пучка также было Гауссовым, длительностью 400 фс, что фактически соответствует непрерывному пучку. При моделировании использовались следующие параметры: минимальный шаг по времени 0,13 фс, дискретность сетки по пространству 0,05 мкм. Были рассчитаны распределения полной интенсивности в продольной плоскости XZ и в поперечной плоскости на расстоянии 10-14 мкм от плоскости падающего пучка (показано пунктирной линией на рисунке 3). В поперечной плоскости также были получены распределения фазы для X- и Z-компонент. Выбор этих компонент обусловлен изначальной поляризацией падающего поля и значительным вкладом продольной компоненты в ближней зоне дифракции.

На рис. 1 показаны результаты дифракции X-линейно-поляризованного Гауссова пучка на стеклянной эллиптической пластинке высотой  $h = 1,5$  мкм. Как видно, отдельная пластинка оказывает фокусирующий эффект, однако фазовой сингулярности пучок не приобретает, что видно по распределению фазы X-компоненты (рис. 1г) (присутствие линейного скачка фазы Z-компоненты связано с обычной структурой X-линейно-поляризованного поля).

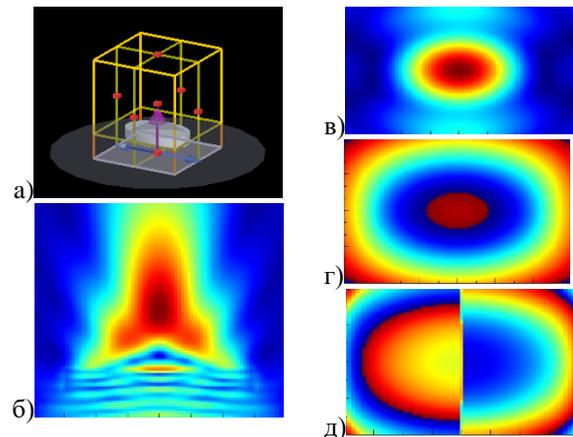


Рис. 1. Результаты расчета дифракции X-линейно-поляризованного Гауссова пучка на стеклянной эллиптической пластинке высотой  $h = 1,5$  мкм (а): распределение интенсивности вдоль оптической оси (б), а также распределение интенсивности (в) и фазы X-компоненты (г) и Z-компоненты (д) в поперечной плоскости на расстоянии 10 мкм

Для исследования возможности формирования сингулярных пучков рассматривается набор эллиптических стеклянных пластин, наложенных друг на друга и повернутых под определенными углами. С помощью комплекта таких пластин можно аппроксимировать, например, скрученный волновод [14]. На рис. 2 показаны примеры наборов из двух (рис. 2а) и тринадцати (рис. 2б) пластин. На рис. 3 представлены результаты расчета дифракции Гауссова

пучка на двух пластинах с углом поворота второй пластины на 15 (а), 45 (б), 90 (в) градусов, соответственно.

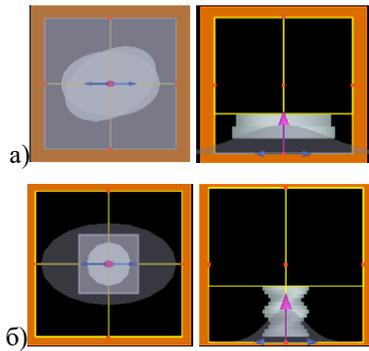


Рис. 2. Структуры из наборов повернутых эллиптических пластинок: вид сверху (слева) и сбоку (справа)

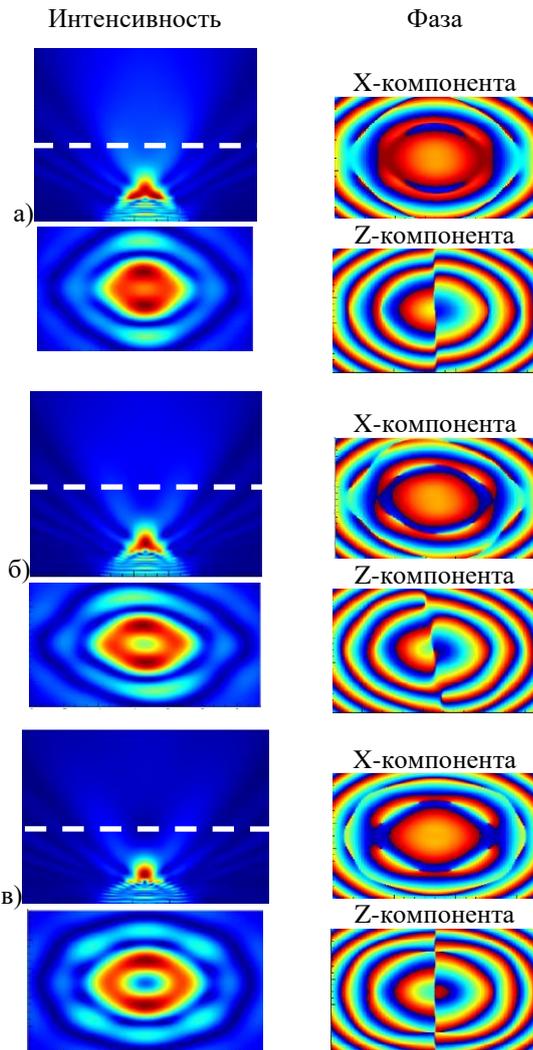


Рис. 3. Результаты расчета дифракции X-линейно-поляризованного Гауссова пучка на двух стеклянных эллиптических пластинках с углом поворота второй пластины на 15 (а), 45 (б), 90 (в) градусов: распределение интенсивности вдоль оптической оси (слева сверху), а также распределение интенсивности (слева внизу) и фазы X-компоненты (справа сверху) и Z-компоненты (справа снизу) в поперечной плоскости на расстоянии 14 мкм

Из результатов, представленных на рис. 3 видно, что систему из двух повернутых относительно друг друга эллиптических пластинок можно использовать для формирования пучков с кольцевым распределением интенсивности (особенно это выражено при повороте второй пластинки на 90

градусов, рис. 3в), однако вихревой фазовой сингулярности в основной X-компоненте при этом не наблюдается (линейная фазовая сингулярность в продольной компоненте также сохраняется). Вероятно, кольцевое распределение связано с дифракцией на краях пластинки и сильной расходимостью пучка.

## 2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование дифракции линейно-поляризованного Гауссова пучка в ближней зоне на отдельных диэлектрических пластинах эллиптической формы, а также на комплекте таких пластин, повернутых относительно друг друга. Показан фокусирующий эффект без формирования фазовой сингулярности в поперечной компоненте. В дальнейшем планируется исследовать дифракцию на аналогичных структурах пучков с круговой поляризацией, так как ожидается спин-орбитальное преобразование в ближней зоне дифракции [1, 2].

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российский научный фонд (грант №. 22-12-00041).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Forbes, A. Structured light from lasers / A. Forbes // *Laser Photon Rev.* – 2019. – Vol. 13. – P. 1900140.
- [2] Soskin, M. Singular optics / M. Soskin, M. Vasnetsov // *Progress in Optics.* – 2001. – Vol. 42. – P. 219-276
- [3] Yue, F. Vector vortex beam generation with a single plasmonic metasurface / F. Yue, D. Wen, J. Xin // *ACS Photon.* – 2016. – Vol. 3. – P. 1558.
- [4] Forbes A. Creation and detection of optical modes with spatial light modulators / A. Forbes, A. Dudley, M. McLaren // *Adv. Opt. Photon.* – 2016. – Vol. 8. – P. 200-227.
- [5] Bai, Y. Vortex beam generation and detection of orbital angular momentum / Y. Bai, H. Lv, X. Fu, Y. Yang // *Chinese Optics Letters.* – 2022. – Vol. 20(1). – P. 12601.
- [6] Khonina, S.N. Modern Types of Axicons: New Functions and Applications / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, P.A. Khorin, M.A. Butt // *Sensors (MDPI).* – 2021. – Vol. 21. – P. 6690-6720.
- [7] Prasciolu, M. Fabrication of a three-dimensional optical vortices phase mask for astronomy by means of electron-beam lithography / M. Prasciolu, F. Tamburini, G. Anzolin, E. Mari, M. Melli, A. Carpentiero, C. Barbieri, F. Romanato // *Microelectron Eng.* – 2009. – Vol. 86. – P. 1103-1106.
- [8] Khonina, S.N. Properties of vortex light fields generated by generalized spiral phase plates / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, V. I. Logachev, A.P. Porfirev // *Phys. Rev. A.* – 2020. – Vol. 101. – P. 43829.
- [9] 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.
- [10] Alexeyev, C.N. Topological activity in Bragg elliptical twisted fibers / C.N. Alexeyev, T.A. Fadeyeva, B.P. Lapin, M.A. Yavorsky // *Applied Optics.* – 2012. – Vol. 51(10). – P. 7-12.
- [11] Khonina, S.N. Refractive twisted microaxicons / S.N. Khonina, S.V. Krasnov, A.V. Ustinov, S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, A. Kuchmizhak A., S.I. Kudryashov // *Optics Letters.* – 2020. – Vol. 45(6). – P. 1334-1337.