

Дифракция импульсных линейно поляризованных Гауссовых лазерных пучков на спиральной фазовой пластинке

С.К. Сергунин

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

П.А. Хорин

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
paul.95.de@gmail.com

Аннотация—В данной работе выполнены расчеты дифракции импульсных лазерных пучков на спиральной фазовой пластинке с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD). Исследовано изменение характеристик формируемого поля в зависимости от длительности импульса.

Ключевые слова— спиральная фазовая пластинка, импульсные лазерные пучки, линейная поляризация, метод FDTD.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фокусировка ультракоротких лазерных импульсов [1-3] используется в различных приложениях, таких как обработка материалов, формирование наноразмерных структур, оптический захват и манипулирование, а также для различного преобразования сигналов.

В работе [4] проведено моделирование фокусировки коротких и длинных световых импульсов с помощью преломляющего аксикона методом конечных разностей во временной области (FDTD). Показано, что длительность импульса не влияет на среднюю картину интенсивности в фокальной плоскости, однако при коротких импульсах можно добиться очень высокой пиковой мощности. Сравнение численных результатов для разных видов поляризованного излучения показало, что при острой фокусировке происходит перераспределение энергии между радиальной и продольной составляющими электрического поля, при этом энергия азимутальной составляющей не меняется.

В работе [5] представлено трехмерное моделирование, сфокусированного широкополосного лазерного излучения, охватывающего диапазон, в семь раз превышающий диапазон Рэлея вдоль оси распространения и в полтора раза превышающий локальный радиус луча перпендикулярно оптической оси. В работе [6] представлены аналитические исследования трехмерных волновых пакетов пучков типа Эйри с использованием решения (3+1)D уравнения Шредингера в свободном пространстве.

Спиральная фазовая пластинка (СФП) [7] представляет собой оптический элемент с комплексной функцией пропускания $\exp(im\varphi)$, где φ – полярный угол, m – топологический заряд формируемого вихревого пучка. В 1992 году в работе [8] было показано, что оптические вихревые пучки со спиральным волновым фронтом обладают орбитальным угловым моментом (ОУМ), а в работе [9] изготовленная СФП была применена как «фазовый винтовой фильтр» для оптической реализации

радиального преобразования Гильберта. С тех пор СФП стали наиболее распространенным и популярным способом формирования оптических вихревых пучков [10].

В данной работе дифракция на СФП импульсных лазерных гауссовых пучков с линейной поляризацией рассчитывалась с помощью метода конечных разностей во временной области.

С использованием программного продукта Lumerical были выполнены расчеты фокусировки импульсных лазерных линейно-поляризованных Гауссовых пучков с помощью стеклянной (показатель преломления $n = 1,5$) спиральной фазовой пластины с автоматическим неравномерным шагом сетки дискретизации. Пространственное распределение падающего Гауссова пучка описывается следующей формулой:

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

где $\sigma = 3\lambda_0$, $\lambda_0 = 0,5$ мкм.

Временное распределение менялось в зависимости от длительности импульса. В таблице I приведены характеристики входного Гауссова импульса.

Таблица I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСА ГАУССА

Длительность импульса (фмс)	Пропускная способность (THz)	Смещение (фмс)	Центральная длина волны (мкм)
1	279,729	13,1532	1,3
5	88,2542	24,3916	1,3
10	44,1271	24,3916	1,3
100	149,896	200	1,3

В таблице 2 представлены параметры спиральной фазовой пластины. В рамках данной работы рассматривается дифракционный оптический элемент с радиусом (SPP radius) равным 10 мкм, максимальной высотой (z_{\max}) – 3 мкм, показателем преломления (index n) – 1,5 и количеством шагов дискретизации секторов SPP по радиусу (steps) – 360.

Таблица II. ПАРАМЕТРЫ ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНЫ

Название параметра	Значение
Steps	360
SPP radius(um)	10
index n	1,5
z_max (um)	3
M	1,15

На рис. 1 представлены графики сечений фокального пятна по осям XY в плоскости максимальной

интенсивности при длительности импульса 1 фс (а), 5 фс (б), 10 фс (в), 100 фс (г).

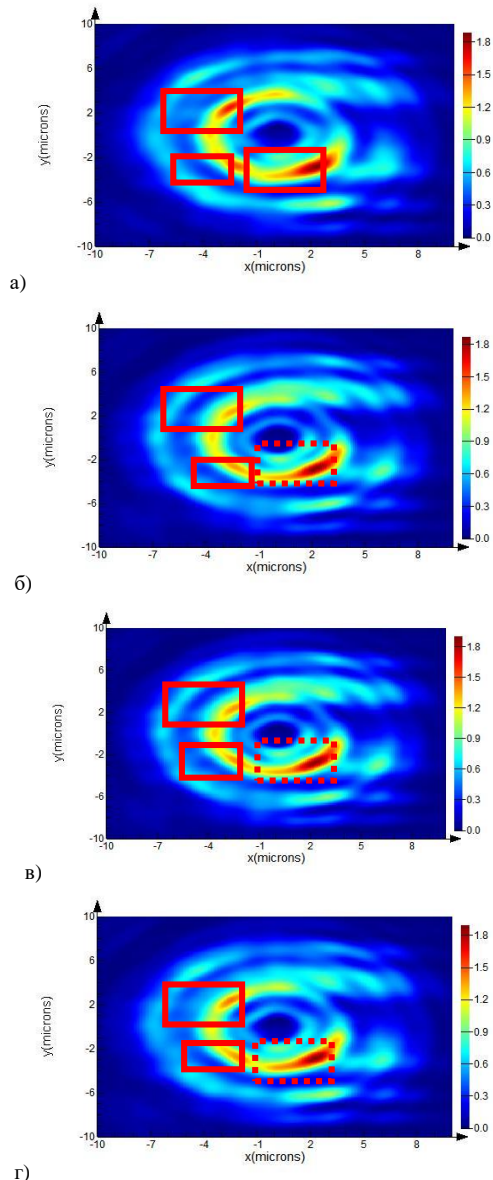


Рис. 1. Распределение интенсивности для среза по оси Z при времени импульса 1 фс (а), 5 фс (б), 10 фс (в), 100 фс (г) (сплошная рамка – локальные максимумы, пунктиром – основной)

Из рис. 1(а) видно, что структура полученной спирали неоднородна и имеет три ярко выраженных пика интенсивности. Данное наблюдение объясняется тем, что при уменьшении длительности импульса происходит расширение спектра частот, т.е. излучение фактически перестает быть монохроматическим. Таким образом дифракционный оптический элемент по типу «спиральная фазовая пластина», настроенный на конкретную длину волны начинает действовать отлично от стандартной спиральной фазовой пластины. При увеличении длины импульса до 5 фс и 10 фс соответственно, на рис. 1(б) и рис. 1(в) видно, что структура полученной спирали всё ещё неоднородна и имеет три пика. Однако наибольший из них по значению интенсивности в 1,5 раза больше второстепенных. Таким образом дифракционный оптический элемент, настроенный на конкретную длину волны начинает действовать более предсказуемо и генерирует структурированный лазерный пучок. Из рис. 1(г) видно, что структура полученной спирали для

импульса длиной 100 фс аналогична распределению интенсивности, полученной при лазерном излучении с длиной импульса 10 фс и 5 фс. Однако наблюдается уменьшение самой интенсивности максимума с 1,8 (рис. 1(в)) до 1,4 (рис. 1(г)).

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе с использованием программного продукта Lumerical были выполнены расчеты дифракции импульсных лазерных пучков на СФП с учетом трехмерной структуры. Показано изменение распределения интенсивности при уменьшении длительности импульса, которое связано с уширением спектра частот, т.е. излучение фактически перестает быть монохроматическим, поэтому формирование вихревого поля происходит с искажениями. Данные исследования представляют интерес для различных приложений, особенно связанных с использованием импульсных пучков для лазерной обработки поверхностей. В последнее время значительное внимание исследователей привлекают эффекты, связанные с воздействием лазерного излучения на азополимеры и другие фоточувствительные материалы, позволяющие формировать сложные микрорельефы на их поверхностях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №. 20-52-76021).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] April, A. Ultrashort, strongly focused laser pulses in free space, in Coherence and ultrashort pulse laser emission / A. April, F.J. Duarte. – Rijeca, Croatia: InTech, 2010. – P. 355-382.
- [2] Li, X. Fields of an ultrashort tightly focused laser pulse / X. Li, Y.I. Salamin, K.Z. Hatsagortsyan, C.H. Keitel // J. Opt. Soc. Am. B. –2016. – Vol. 33. – P. 405.
- [3] Khonina, S.N. Study of focusing in nearby light spots when illuminating diffractive optical elements with a short pulsed laser beam / S.N. Khonina, S.A. Degtyarev, A.P. Porfiryev, O.Yu. Moiseev, S.D. Poletaev, A.S. Larkin, A.B. Savelyev-Trofimov // Computer Optics. – 2015. – Vol. 39(2). – P. 187-196.
- [4] Meterko, V. Comparison of focusing pulse beams with different polarization and duration by a refractive axicon / V. Meterko, S.N. Khonina // Bulletin of the Samara State Aerospace University. – 2012. – Vol. 4(35). – P. 210-217.
- [5] Hoff, D. Tracing the phase of focused broadband laser pulses / D. Hoff, M. Krüger, L. Maisenbacher, A.M. Saylor, G.G. Paulus, P. Hommelhoff // Nat. Physics. – 2017. – Vol. 13. – P. 947-951.
- [6] Huang, Z. Three-dimensional localized Airy–Cartesian and Airy–helical–Cartesian wave packets in free space / Z. Huang, D. Deng // J. Opt. Soc. Am. A. – 2018. – Vol. 35(4). – P. 536-545.
- [7] Higgins, T.V. Nonlinear crystals: Where the colors of the rainbow begin / T.V. Higgins // Laser Focus World. – 1992. – Vol. 28. – P. 18-20.
- [8] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman // J. Phys. Rev. A. – 1992. – Vol. 45. – P. 8185-8189.
- [9] Khonina, S.N. The rotor phase filter / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, M.V. Shinkarev, V.A. Soifer, G.V. Uspleniev // J. Mod. Opt. – 1992. – Vol. 39. – P. 1147-1154.
- [10] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Chen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // Light: Science & Applications. – 2019. – Vol. 8. – P. 90.