

Моделирование фокусировки фемтосекундного оптического вихря зонной пластинкой

Е.С. Козлова

Институт систем обработки изображений - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

kozlova.elena.s@gmail.com

Аннотация—В данной работе с использованием метода конечных разностей во временной области с учетом зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения исследуется фокусировка фемтосекундного цилиндрического векторного пучка второго порядка бинарными зонными пластинками. Показано, что материал рельефа оказывает существенное влияние на электромагнитное поле, формируемое в фокальной плоскости.

Ключевые слова— фемтосекундный импульс, цилиндрический векторный пучок, бинарная зонная пластинка, фокусировка, обратный поток энергии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фокусировка света активно изучается уже несколько десятилетий [1]. Научные группы проявляют большой интерес к фокусировке оптических вихрей, а также к изучению различных эффектов в остром фокусе пучка [2]. Этот интерес может быть оправдан широким спектром приложений [3-5]. Другой активно развивающейся областью оптики является фемтосекундная оптика. В последнее время активно исследуются ультракороткие оптические вихри [6,7], а также ультракороткие цилиндрические векторные пучки (ЦВП) [8], особые свойства которых в фокусе: высокая интенсивность, малая длительность воздействия и орбитальный угловой момент открывают новые возможности в различных научных и технических приложениях [9,10]. В данной работе с помощью метода конечных разностей во временной области с учетом зависимости диэлектрической проницаемости от частоты излучения ((FD)²TD-метод) исследуется фокусировка ультракороткого ЦВП второго порядка бинарными зонными пластинками (ЗП), рельеф которых выполнен из разных материалов.

2. ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Бинарный рельеф ЗП можно описать зонами, радиусы которых выводятся из теории дифракции Френеля [11]. В данном исследовании рассматривалась ЗП с фокусным расстоянием $f = 532$ нм и 13 кольцами. Рельеф предполагался быть выполненным из алюминия, золота или кварцевого стекла. Модели диэлектрической проницаемости Селлмейера [12] и Друде-Лоренца [13,14] использовались для описания материалов в ходе моделирования. В качестве падающего излучения рассматривался фемтосекундный ЦВП второго порядка [15] с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Временное распределение задавалось аналогично [16]. Была промоделирована фокусировка ультракороткого ЦВП (2)-(4) длительностью 5 периодов, что эквивалентно 17 фс, и с плавным нарастанием и убыванием интенсивности в течение одного периода. Численное моделирование

проводилось с помощью пакета FullWAVE, использующего (FD)²TD-метод на параметрах сетки для расчета: пространственный шаг сетки 15 нм, шаг по псевдовремени ($\tau = ct$, c - скорость света, t - время) 7,5 нм (в соответствии с условием Куранта).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Мгновенные распределения светового поля в фокусе

В данной работе исследовались интенсивность I и продольная составляющая вектора Пойнтинга S_z в области фокуса. В этом разделе представлены результаты моделирования мгновенных распределений этих характеристик поля (рис. 1) в момент времени: 11,41 фс, 10,91 фс и 13,41 фс для ЗП из алюминия, золота и кварца, соответственно.

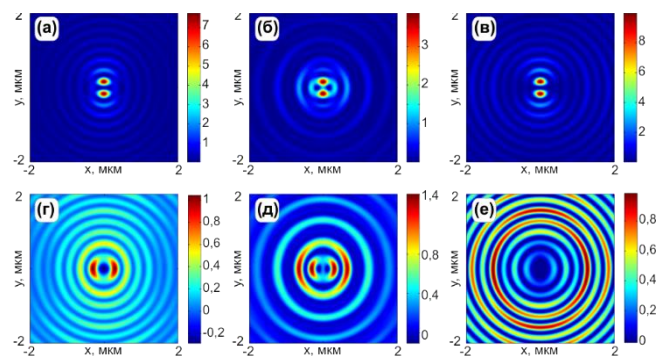


Рис. 1. Мгновенная картина интенсивности I (а-в) и продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z (г-е) ЦВП второго порядка в фокусе ЗП с рельефом из: алюминия высотой 50 нм (а,г), золота высотой 140 нм (б,д) и кварца высотой 532 нм (в,е)

На рис. 1 видно, что ЗП из кварца сформировала фокальное пятно с максимальной интенсивностью, равной $I_{max} = 10$ отн. ед. Максимальная интенсивность в фокусе алюминиевой ЗП $I_{max} = 7,62$ отн. ед. Наихудшей по эффективности является золотая ЗП. Форма фокального пятна у золотой ЗП также отличается. Мгновенное распределение продольной компоненты вектора Пойнтинга различно для всех ЗП. Из рис. 1 видно, что амплитудные ЗП имеют слабо выраженный обратный поток энергии по оси z в фокусе, а мгновенное распределение продольной компоненты вектора Пойнтинга в фокусе фазовой ЗП положительна в каждой точке. Максимальное значение обратного потока, чье распределение имеет форму круга, формирует алюминиевая ЗП. Золотая ЗП имеет 2 овальные области обратного потока энергии, расположенные по оси абсцисс.

Б. Усредненные распределения светового поля в фокусе

В этом разделе представлены усредненные по длительности импульса распределения интенсивности I и продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в фокальной плоскости (рис. 2).

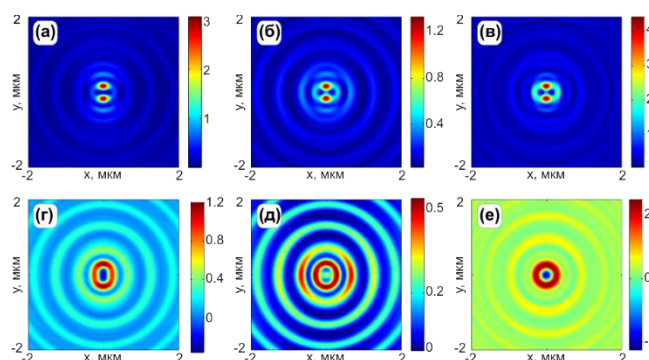


Рис. 2. Усредненная картина интенсивности I (а-в) и продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z (г-е) ЦВП второго порядка в фокусе ЗП с рельефом из: алюминия высотой 50 нм (а,г), золота высотой 140 нм (б,д) и кварца высотой 532 нм (в,е)

На рис. 2 видно, что фазовая ЗП и ЗП из золота образуют кольцо с двумя пиками в фокусе, ЗП из алюминия образует два пика. Максимальную усредненную интенсивность дает ЗП из кварца ($I_{max} = 4,3$ отн.ед.), которая выше максимальная усредненной интенсивности в фокусе алюминиевой ЗП ($I_{max} = 3$ отн.ед.) в 1,4 раза. На рис. 2 видно, что в фокусе фазовая ЗП дает область отрицательного потока энергии в центре, окруженную кольцом положительного потока энергии. ЗП из алюминия образует аналогичное распределение, но кольцо трансформируется в овал, вытянутый вдоль оси y . Обратный поток в фокусе золотой ЗП отсутствует. Максимальный обратный поток энергии формирует фазовая ЗП.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена фокусировка ультракороткой ЦВП второго порядка ЗП из различных материалов (кварц, алюминий, золото) методом $(FD)^2TD$. Показано, что материал рельефа оказывает существенное влияние на форму и максимальные значения как мгновенной, так и усредненной интенсивности, а также обратный поток энергии. Формирование обратного потока энергии возможно только для ЗП из кварца и алюминия. Показано, что максимальная интенсивность как максимальный обратный поток энергии определяется фазовой ЗП. Для алюминиевых ЗП с высотой рельефа 50 нм получены распределения полей, близкие по всем параметрам к полям, формирующимся в области фокуса фазовой ЗП. Золотая ЗП с высотой рельефа 140 нм показала себя непригодной для фокусировки ультракоротких ЦВП второго порядка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа частично финансировалась Российским научным фондом по гранту № 22-12-00137 (в части «Результаты моделирования»), а также Минобрнауки России в рамках государственного контракта с НИЦ

«Кристаллография и фотоника» РАН по договору 007-ГЗ/ЧЗ363/26 (в части «Введение»).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zuo, R. Breaking the Diffraction Limit with Radially Polarized Light Based on Dielectric Metalenses / R. Zuo, W. Liu, H. Cheng, S. Chen, J. Tian, // *Adv. Opt. Mat.* – 2018. – Vol. 6(21). – P. 1800795. DOI: 10.1002/adom.201800795.
- [2] Стафеев, С.С. Фокусировка цилиндрического векторного пучка второго порядка градиентной линзой Микаэляна / С.С. Стафеев, Е.С. Козлова, А.Г. Налимов // *Компьютерная оптика.* – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 29-33. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-633.
- [3] Rahimian, M.G. Spatially controlled nano-structuring of silicon with femtosecond vortex pulses / M.G. Rahimian, A. Jain, H. Larocque, P.B. Corkum, E. Karimi, V.R. Bhardwaj // *Sci. Rep.* – 2020. – Vol. 10. – P. 12643. DOI: 10.1038/s41598-020-69390-4.
- [4] Bunandar, D. Programmable Nanophotonics for Computation / D. Bunandar, T. Lazovich, M. Gould, R. Braid, C. Ramey, N.C. Harris // *Proceedings of IEEE 15th International Conference on Group IV Photonics (GFP).* – 2018. – P. 1-2. DOI: 10.1109/GROUP4.2018.8478744.
- [5] Singh, B.K. Particle manipulation beyond the diffraction limit using structured super-oscillating light beams / B.K. Singh, H. Nagar, Y. Roichman, A. Arie // *Light Sci. Appl.* – 2017. – Vol. 6. – P. 17050. DOI: 10.1038/lsa.2017.50.
- [6] Liebmann, M. Ultrashort Vortex Pulses with Controlled Spectral Gouy Rotation / M. Liebmann, A. Treffer, M. Bock, U. Wallrabe, R. Grunwald // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10(12). – P. 4288. DOI: 10.3390/app10124288.
- [7] Nie, J. Propagation and spatiotemporal coupling characteristics of ultra-short Gaussian vortex pulse / J. Nie, G. Liu, R. Zhang // *Optics & Laser Technology.* – 2018. – Vol. 101. – P. 446-450. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.11.033.
- [8] Zhang, T. Tunable mode-locked fiber laser to generate ultrashort cylindrical vector beams / T. Zhang, H. Hu, J. Chen, Q. Zhan // *Laser Phys. Lett.* – 2018. – Vol. 18. – P. 035102. DOI: 10.1088/1612-202X/abe301.
- [9] Li, Ye Probability distribution of the orbital angular momentum mode of the ultrashort Laguerre-Gaussian pulsed beam propagation in oceanic turbulence / Ye Li, Yi. Zhang, Yy. Zhu // *Results in Physics.* – 2018. – Vol. 11. – P. 698-705. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.10.013.
- [10] Zunkersteina, M. Formation of tubular structures and microneedles on silicon surface by doughnut-shaped ultrashort laser pulses / M. Zunkersteina, J. Hrabovsky, J. Sladek, I. Mirza, Y. Levy, N.M. Bulgakova // *Applied Surface Science.* – 2022. – Vol. 592. – P. 153228. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.153228.
- [11] 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 // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25(17). – P. 19662-19671. DOI: 10.1364/OE.25.019662.
- [12] 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 // *Phys. Rev. B.* – 2005. – Vol. 71(12). – P. 125435. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.125435.
- [13] Vial, 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 // *Appl. Phys. A.* – 2011. – Vol. 103(3). – P. 849-853. DOI: 10.1007/s00339-010-6224-9.
- [14] Rakic, A.D. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices / A.D. Rakic, A.B. Djuricic, J.M. Elazar, M.L. Majewski // *App. Opt.* – 1998. – Vol. 37(22). – P. 5271-5283. DOI: 10.1364/AO.37.005271.
- [15] Козлова, Е.С. Поперечная интенсивность в остром фокусе цилиндрического векторного пучка второго порядка / Е.С. Козлова, С.С. Стафеев, С.А. Фомченков, В.В. Подлипов, В.В. Котляр // *Компьютерная оптика.* – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 165-171. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-835.
- [16] Козлова, Е.С. Моделирование предвестников оптического ультракороткого импульса / Сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика». – 2013. – С. 43-46.