

Формирование обратного потока путем фокусировки света кубической призмой из кварцевого стекла

В.Д. Зайцев

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
zaicev-vlad@yandex.ru

С.С. Стафеев

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

Аннотация—Используя программный пакет FullWave было проведено моделирование фокусировки света с длиной волны 633 нм кубической микропризмой с шириной основания 1266 нм. Показано, что после прохождения света через микрообъект, вблизи выходной поверхности микрообъекта наблюдался обратный поток энергии.

Ключевые слова— обратный поток энергии, микропризма, FDTD-метод, острая фокусировка света, вектор Пойнтинга.

1. ВВЕДЕНИЕ

В наши дни много исследований посвящено цилиндрическим векторным пучкам (ЦВП) из-за их уникальных свойств, проявляющихся при острой фокусировке. С помощью цилиндрических векторных пучков, можно получать фокусные пятна с размерами меньше скалярного дифракционного предела [1,2], фокусы с большой глубиной - оптические иглы [3,4], световые туннели [5,6], цепочки фокусов [7–10].

Поляризация в каждой точке СВВ линейна, но ее направление непрерывно меняется, делая один или несколько оборотов при изменении азимутального угла от 0 до 2π . Большинство работ (например, отмеченных ранее [1,3–9]) посвящено исследованию ЦВП, в которых поляризация совершает только один оборот - это радиально поляризованные пучки, в которых поляризация направлена по радиусу, или азимутально поляризованные лучи, у которых она, соответственно, направлена перпендикулярно радиусу. Но известны работы, в которых исследуются ЦВП высокого порядка, т.е. пучки, в которых направление поляризации совершает больше одного оборота [12–19].

В данной работе с помощью метода FDTD, реализованного в программе FullWave, моделировалась фокусировка цилиндрического векторного пучка кварцевым кубом ($n = 1,5$). Исследована возможность формирования обратного потока, так же исследовано влияние формы микрообъекта на величину обратного потока. Было показано, что кварцевый куб при фокусировке формирует обратный поток энергии.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Данное исследование проводилось со следующими параметрами: в качестве освещающего пучка использовался цилиндрический векторный пучок второго порядка, вектор Джонса для него равен

$$\begin{pmatrix} -\sin(2\varphi) \\ \cos(2\varphi) \end{pmatrix}, \text{ где } \varphi - \text{азимутальный угол в}$$

цилиндрической системе координат, выбранной таким образом, что ось z совпадает с направлением распространения пучка, длина волны 633 нм (поляризация освещающего пучка соответствовала цилиндрическому векторному пучку второго порядка), шаг сетки 0,015 мкм, материал микрообъекта - кварц ($n = 1,5$). На краях расчетной области помещались поглощающие слои (PML) толщиной 1 мкм, моделирующие распространение световой волны в бесконечность.

На рис. 1 и рис. 2 показан результат прохождения цилиндрического векторного пучка второго порядка через диэлектрический кубик с шириной основания $D = 2\lambda$ и такой же высотой $H = D = 2\lambda$.

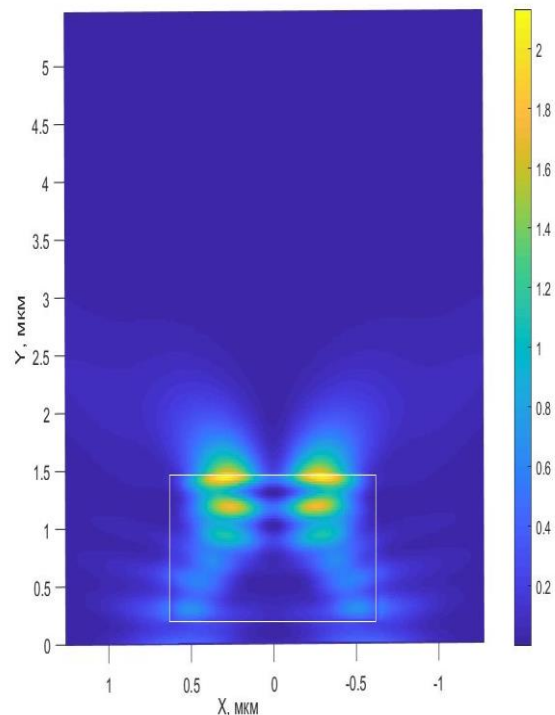


Рис. 1. Интенсивность при фокусировке диэлектрической призмой

На рис. 1 показано распределение интенсивности (плотности энергии), рассчитываемой как

$$I = I_x + I_y + I_z = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle + \langle E_z^2 \rangle,$$

а на рис. 2 показано распределение проекции вектора Пойнтинга (потока энергии) на оптическую ось

$$S = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}].$$

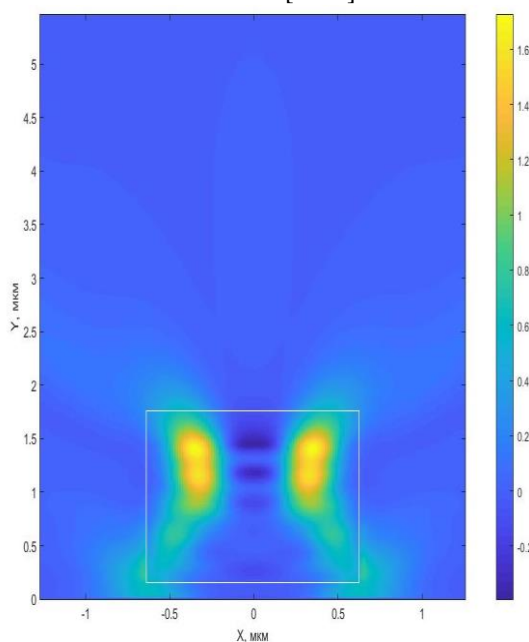


Рис. 2. Продольная компонента Умова-Пойнтинга при фокусировке диэлектрической призмой

Как видно, после прохождения света через микрокубик на его обратной стороне формируется фокусное пятно (фотонная наноструя) в виде кольца, при этом в центре кольца значения проекции вектора Пойнтинга на оптическую ось отрицательны (обратный поток световой энергии).

Как можно видеть из рисунков, при фокусировке света кубической призмой, обратный поток света наблюдается, однако, он не так выражен – максимум обратного потока меньше максимума прямого потока примерно в четыре раза.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя метод FDTD, реализованный в ПО FullWave, было проведено моделирование в котором изучалось прохождение цилиндрического векторного пучка второго порядка с длиной волны $\lambda = 633$ нм через кварцевый куб $H = 2\lambda$ ($n = 1,5$). В результате микрокуб оказался способным к генерации обратного потока энергии в фокусе. Так же отметим, что ввиду простоты изготовления кубической призмы данный эксперимент будет не трудно повторить на практике. Данные результаты могут быть полезны для манипулирования микрочастицами, которое требуется в различных областях: медицине, химии, электронике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в части «Моделирование», и Министерства науки

и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение 007-ГЗ/Ч3363/26) в части «Введение».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kotlyar, V.V. Tight focusing with a binary microaxicon / V.V. Kotlyar, S.S.Stafeev, L. O'Faolain // Optics Letters – 2011. – Vol. 36(16). – P. 3100-3102
- [2] Volotovskiy, S.G. Influence of Vortex Transmission Phase Function on Intensity Distribution in the Focal Area of High-Aperture Focusing System / S.G. Volotovskiy, N.L. Kazanskiy, S. N. Khonina // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2011. – Vol. 20(1). – P. 23-42.
- [3] Dorn, R. Sharper Focus for a Radially Polarized Light Beam / R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 91. – P. 233901.
- [4] Grosjean, T. Longitudinally polarized electric and magnetic optical nano-needles of ultra high lengths / T. Grosjean, I. Gauthier // Opt. Commun. – 2013. – Vol. 294. – P. 333-337.
- [5] Guan, J. Transversely polarized sub-diffraction optical needle with ultra-long depth of focus / J. Guan, J. Lin, C. Chen, Y. Ma, J. Tan, P. Jin // Opt. Commun. – 2017. – Vol. 404. – P. 118-123.
- [6] Yu, Y. Engineering of multi-segmented light tunnel and flattop focus with designed axial lengths and gaps / Y. Yu, H. Huang, M. Zhou, Q. Zhan // Opt. Commun. – 2018. – Vol. 407. – P. 398-401.
- [7] Zheng, C. Characterization of the focusing performance of axial line-focused spiral zone plates / C. Zheng, S. Su, H. Zang, Z. Ji, Y. Tian, S. Chen, K. Mu, L. Wei, Q. Fan, C. Wang, X. Zhu, C. Xie, L. Cao, E. Liang // Appl. Opt. – 2018. – Vol. 57(14). – P. 3802-3807.
- [8] Lin, J. Generation of longitudinally polarized optical chain by 4π focusing system / J. Lin, R. Chen, P. Jin, M. Cada, Y. Ma // Opt. Commun. – 2015. – Vol. 340. – P. 69-73.
- [9] Yu, Y. Generation of uniform three-dimensional optical chain with controllable characteristics / Y. Yu, Q. Zhan // J. Opt. – 2015. – Vol. 17(10). – P. 105606.
- [10] Xiaoqiang, Z. Focusing properties of cylindrical vector vortex beams / Z. Xiaoqiang, C. Ruishan, W. Anting // Opt. Commun. – 2018. – Vol. 414. – P. 10-15.
- [11] Rashid, M. Focusing of high order cylindrical vector beams / M. Rashid, O.M. Maragó, P.H. Jones // J. Opt. A Pure Appl. Opt. – 2009. – Vol. 11(6). – P. 065204.
- [12] Li, Y. Propagation evolution of an off-axis high-order cylindrical vector beam / Y. Li, Z. Zhu, X. Wang, L. Gong, M. Wang, S. Nie // J. Opt. Soc. Am. A. – 2014. – Vol. 31(11). – P. 2356-2361
- [13] Qi, J. Multiple-slit diffraction of high-polarization-order cylindrical vector beams / J. Qi, W. Wang, B. Pan, H. Deng, J. Yang, B. Shi, H. Shan, L. Zhang, H. Wang // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10339. – P. 1033927.
- [14] Wang, X.-L. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement / X.-L. Wang, J. Ding, W.-J. Ni, C.-S. Guo, H.-T. Wang // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32(24). – P. 3549-3551.
- [15] Chen, H. Generation of vector beam with space-variant distribution of both polarization and phase / H. Chen, J. Hao, B.-F. Zhang, J. Xu, J. Ding, H.-T. Wang // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36(16). – P. 3179-3181.
- [16] Liu, Y. Generation of perfect vortex and vector beams based on Pancharatnam-Berry phase elements / Y. Liu, Y. Ke, J. Zhou, Y. Liu, H. Luo, S. Wen, D. Fan // Sci. Rep. – 2017. – Vol. 7. – P. 44096.
- [17] Стафеев, С.С. Обратный поток энергии в фокусе цилиндрического векторного пучка / С.С. Стафеев, А.Г. Налимов, В.В. Котляр // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 744-750. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-744-750.
- [18] Stafeev, S.S. The Non-Vortex Inverse Propagation of Energy in a Tightly Focused High-Order Cylindrical Vector Beam / S.S. Stafeev, V.V. Kotlyar, A.G. Nalimov, E.S. Kozlova // IEEE Photonics J. – 2019. – Vol. 11(4). – P. 4500810.