

Цилиндрический пучок второго порядка в микроструктурированном волноводе

С.С. Стафеев
ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и
фотоника» РАН
Самара, Россия
sergey.stafeev@gmail.com

А.Д. Прямыков
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук
Москва, Россия
pryamikov@fo.gpi.ru

Г.А. Алагашев
Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук
Москва, Россия
alagashevgrigory@gmail.com

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

Аннотация — В данной работе рассмотрено распространение векторного пучка второго порядка в микроструктурированном стержневом волноводе. Численно показано, что в центре волновода наблюдается область, в которой поток энергии направлен в сторону, противоположную направлению распространения пучка (область обратного потока энергии).

Ключевые слова — векторный пучок, микроструктурированный волновод, неоднородная поляризация.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое количество статей сосредоточено на изучении распространения световых пучков с сингулярностью фазы или поляризации в волноводах [1-3].

В данной работе с помощью программного обеспечения RSoft Fullwave промоделировано распространение цилиндрического векторного пучка второго порядка в микроструктурированном стержневом волноводе. При этом в центре волновода наблюдается область, в которой поток энергии направлен в сторону, противоположную направлению распространения пучка (область обратного потока энергии).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование в данной работе осуществлялось с помощью программного обеспечения RSoft Fullwave, в котором реализован расчет прохождения света через объекты микрооптики методом FDTD. Для расчета основной моды световода с заданным распределением показателя преломления использовалась встроенная в программу подпрограмма. В качестве пучка, заводимого в световод, использовался цилиндрический векторный пучок второго порядка, вектор Джонса которого равен:

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} -\sin(2\varphi) \\ \cos(2\varphi) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где φ – азимутальный угол в цилиндрической системе координат, выбранной таким образом, что ось z совпадает с осью волновода. Ранее нами было продемонстрировано, что именно для второго порядка векторного пучка на оси возникают отрицательные значения для продольной проекции вектора Пойнтинга [4].

В качестве исследуемого световода рассматривался стержневой световод [5], состоящий из шести стержней с радиусами $r = 0,684$ мкм, расположенными вдоль окружности с радиусом $R = 11,4$ мкм. Профиль исследуемого волновода приведен на рис. 1. Показатель преломления оболочки считался равным 1,45 (кварцевое стекло), показатель преломления стержня был равен 1,478 (допированное германием кварцевое стекло [5]). Структура поперечных потоков энергии для такого волновода ранее рассматривалась в работе [6]. Длина волны света в проведенном моделировании была равна $\lambda = 1$ мкм. На краях расчетной области в моделировании помещались идеально согласованные слои (PML), толщиной в одну длину волны. Шаг сетки FDTD по пространству был равен $0,01$ мкм $= \lambda/100$, шаг сетки по времени выбирался из условия Куранта.

На рис. 2 показано распределение продольной составляющей вектора Пойнтинга S_z в вычисляемой области: $S_z = \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)_z$ и для наглядности отдельно показаны зоны, в которых проекция вектора Пойнтинга

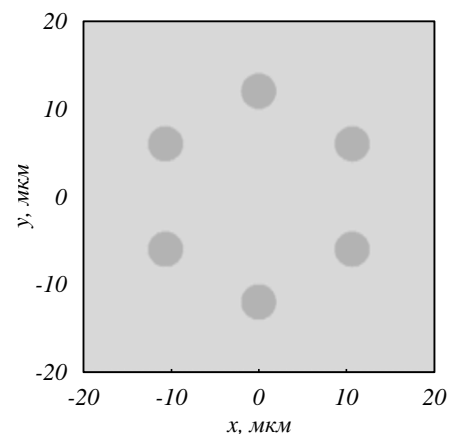


Рис. 1. Профиль исследуемого световода

на оптическую ось отрицательна. Из рис. 2 видно, что в центре световода (две области) и рядом с отдельными стержнями формируются обратные потоки энергии (проекция вектора Пойнтинга на ось z принимает отрицательные значения). Стоит отметить, что абсолютная величина проекции вектора Пойнтинга в областях обратных потоков мала, эта малость является ожидаемой, так как большие значения обратного потока проявляются только в условиях острой фокусировки [4].

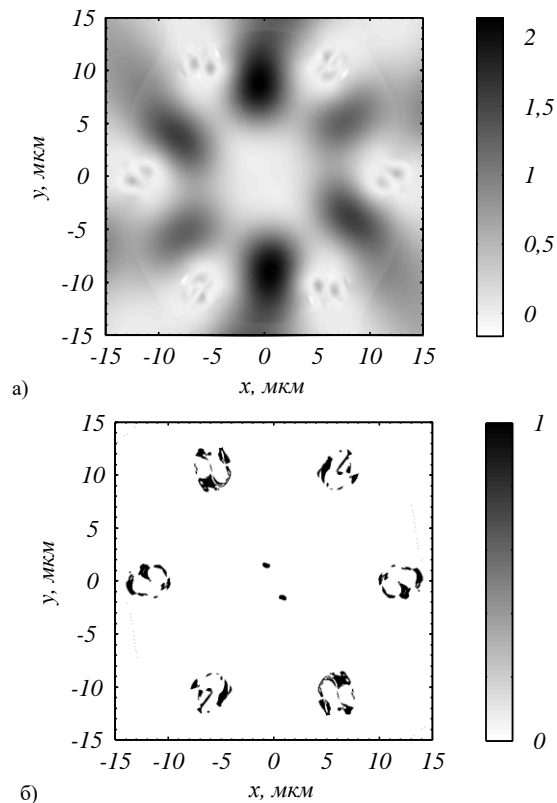


Рис. 1. Распределение продольной проекции вектора Пойнтинга в стержневом волокне (а). Области обратного потока энергии (обозначены черным) в рассчитываемом стержневом световоде (б)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено распространение цилиндрического векторного пучка второго порядка в микроструктурированном стержневом волноводе.

Численно показано, что у сформированной основной моды волновода в центре наблюдается область, в которой поток энергии направлен в сторону, противоположную направлению распространения пучка (область обратного потока энергии).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-22-00575)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hadžievski, L. Stable optical vortices in nonlinear multicore fibers / L. Hadžievski, A. Maluckov, A. M. Rubenchik, S. Turitsyn // *Light Sci. Appl.* – 2015. – Vol. 4(8). – P. 2–7.
- [2] Mao, D. Generation of polarization and phase singular beams in fibers and fiber lasers / D. Mao, Y. Zheng, C. Zeng, H. Lu, C. Wang, H. hang, W. Zhang, T. Mei, J. Zhao // *Adv. Photonics.* – 2021. – Vol. 3(1). – P. 1–18.
- [3] Tu, J. Ring-core fiber with negative curvature structure supporting orbital angular momentum modes / J. Tu, Z. Liu, S. Gao, Z. Wang, J. Zhang, B. Zhang, J. Li, W. Liu, H. Tam, Z. Li, C. Yu, C. Lu // *Opt. Express.* – 2019. – Vol. 27(15). – P. 20358–20372.
- [4] 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. – T. 11(4). – 4500810.
- [5] Egorova, O.N. Single-mode all-silica photonic bandgap fiber with 20- μm mode-field diameter / O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.F. Kosolapov, A.N. Denisov, A.D. Pryamikov, D.A. Gaponov, A.S. Biriukov, E.M. Dianov, M.Y. Salganskii, V.F. Khopin, M.V. Yashkov, A.N. Gurianov, D.V. Kuksenkov // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16(16). – P. 11735–11740.
- [6] Стафеев, С.С. Поперечные потоки энергии в all solid band gap fiber / С.С. Стафеев, А.Д. Прямикov, Г.К. Алагашев, В.В. Котляр // VIII Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2022). – 2022. – Т.1. – С. 013122.