

Моделирование распределения поверхностного электромагнитного поля мод бессердцевинного оптического волокна

М.А. Абельмас
Ульяновский государственный
технический университет
Ульяновск, Россия
abelmax1998@mail.ru

С.В. Сухов
Ульяновский филиал
Института радиотехники и
электроники
им. В.А. Котельникова РАН
Ульяновск, Россия
ssukhov@ulireran.ru

О.В. Иванов
Ульяновский филиал
Института радиотехники и
им. В.А. Котельникова РАН
Ульяновск, Россия
olegivvit@yandex.ru

Аннотация — Рассчитываются поперечные и продольные компоненты электромагнитных полей на поверхности оболочки бессердцевинного оптического волокна. Показано, что в отличие от полей внутри волокна, где преобладает поперечное поле, для поверхностного поля продольная компонента имеет тот же порядок, что и поперечные компоненты полей. Построено векторное распределение полей и проводится их сравнение внутри, под и над поверхностью оболочки волокна.

Ключевые слова — оптическое волокно, мода, пространственное распределение поля, векторное поле

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование преобразования и взаимодействия мод, распространяющихся по оболочке оптического волокна, представляет интерес в связи с разработкой различных волоконных датчиков, предназначенных для измерения параметров внешней среды [1]. При анализе распространения волоконных мод в волоконно-оптических структурах используется приближение поперечно поляризованных мод и не учитывается продольная компонента поля [2]. Однако, как было показано нами ранее, продольная компонента на границе оболочки соизмерима с поперечными компонентами [3]. Кроме того, важным параметром является вектор поверхностного поля на внешней границе оболочки волокна, который может иметь продольную компоненту.

В данной работе исследуется вопрос о направлении поляризации поверхностных полей оболочечных мод на границе раздела между оболочкой волокна и внешней средой. Численными методами рассчитывается амплитуда продольного поля для волоконных мод LP₀₁ и в зависимости от параметров волокна и строятся зависимости направления полей вокруг волокна.

II. РАСЧЁТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ МОДЫ LP₀₁

Рассмотрим распространение мод в оптическом бессердцевинном волоконном световоде, размеры которого совпадают с размерами стандартного оптического волокна. Для расчета мод волокна был применен метод, основанный на решении уравнений Максвелла в цилиндрически симметричной структуре со ступенчатым профилем показателя преломления. Использование метода позволяет записать следующие выражения для поверхностных электрических полей гибридных волоконных мод [4]:

1) внутри оболочки волокна ($r \leq a$):

$$E_z = AJ_v \left(\frac{ur}{a} \right) \sin(v\theta + \phi), \quad (1)$$

$$E_r = \left[-A \frac{j\beta}{u/a} J_v \left(\frac{ur}{a} \right) + B \frac{j\omega\mu_0}{(u/a)^2} \frac{v}{r} J_v \left(\frac{ur}{a} \right) \right] \sin(v\theta + \phi), \quad (2)$$

$$E_\theta = \left[-A \frac{j\beta}{(u/a)^2} \frac{v}{r} J_v \left(\frac{ur}{a} \right) + B \frac{j\omega\mu_0}{u/a} J_v \left(\frac{ur}{a} \right) \right] \cos(v\theta + \phi), \quad (3)$$

2) во внешней среде ($r \geq a$):

$$E_z = CK_v \left(\frac{wr}{a} \right) \sin(v\theta + \phi), \quad (4)$$

$$E_r = \left[C \frac{j\beta}{w/a} K_v \left(\frac{wr}{a} \right) - D \frac{j\omega\mu_0}{(w/a)^2} \frac{v}{r} K_v \left(\frac{wr}{a} \right) \right] \sin(v\theta + \phi), \quad (5)$$

$$E_\theta = \left[C \frac{j\beta}{(w/a)^2} \frac{v}{r} K_v \left(\frac{wr}{a} \right) + D \frac{j\omega\mu_0}{w/a} K_v \left(\frac{wr}{a} \right) \right] \cos(v\theta + \phi), \quad (6)$$

где J_v и K_v — функции Бесселя первого и второго рода, $u = ka\sqrt{n_1^2 - n_{eff}^2}$, $w = ka\sqrt{n_{eff}^2 - n_2^2}$, a — радиус оболочки волокна, $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число, n_1 — показатель преломления оболочки волокна, n_2 — показатель преломления среды, в которой находится волокно, $\beta = k_0 n_{eff}$ — постоянная распространения, v — азимутальное модовое число, λ — длина волны, μ_0 — магнитная постоянная, ω — круговая частота, j — мнимая единица, A , B , C и D — коэффициенты, которые определяются из граничных условий, r и θ — цилиндрические координаты.

На рис. 1 представлены угловые зависимости распределения электрического поля моды LP₀₁ для волокна SM1500. На рис. 1а видно, что внутри оболочки продольная компонента электрического поля E_z меньше поперечной компоненты поля E_y на два-три порядка. Однако на границе оболочки волокна с внешней средой (рис. 1б и 1в) продольная компонента E_z соизмерима с поперечной компонентой поля E_y .

Кроме того, под поверхностью оболочки волокна E_x компонента соизмерима с E_y компонентой, совпадающей с осью поляризации моды. Внутри оболочки все компоненты при изменении угла амплитуды компонент поля практически постоянны. Под поверхностью оболочки амплитуды компонент осцилируют, причём E_x имеет экстремумы при углах 45°, 135°, 225° и 315°, E_y — при углах, кратных 90°, а E_z при 90° и 270°. Над поверхностью оболочки амплитуды

компонент E_x и E_y практически постоянны, а продольная компонента такая же, как под поверхностью.

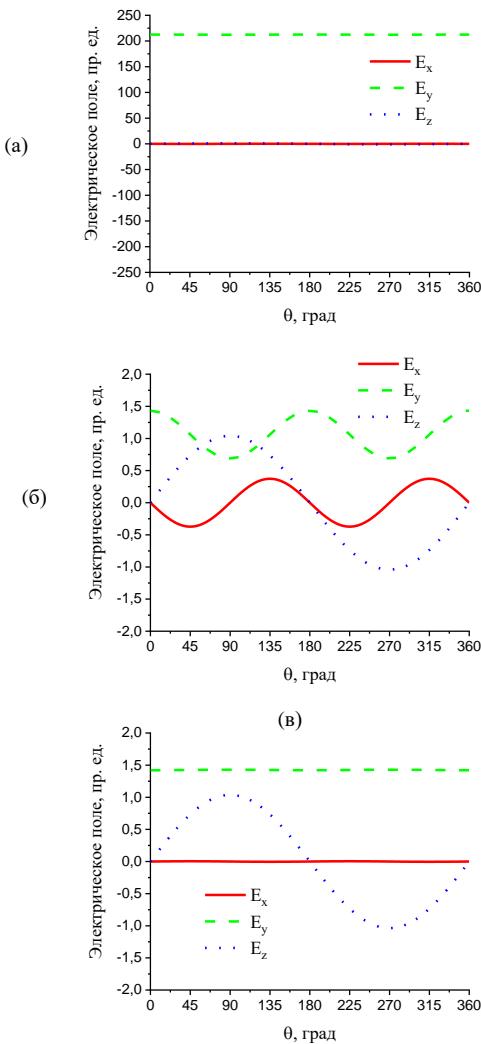


Рис. 1. Угловые зависимости компонент электрического поля моды LP01 а) внутри волокна ($r = 30$ мкм), б) под поверхностью оболочки волокна, в) над поверхностью оболочки волокна

На рис. 2 представлены распределения векторов поля внутри и на поверхности волокна. Из рис. 2а и 2в видно, что электрическое поле направлено параллельно оси поляризации внутри и над поверхностью оболочки волокна. Однако под поверхностью оболочки (рис. 2б) поле направлено к оси абсцисс под углами примерно в 111° , 69° , 111° и 69° для θ , равного 45° , 135° , 225° и 315° соответственно. Это объясняется тем, что в случае под поверхностью оболочки амплитуда E_y компоненты соизмерима с E_x компонентой.

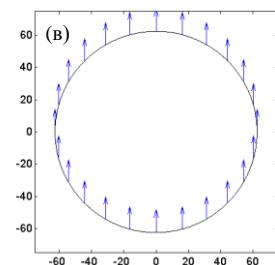
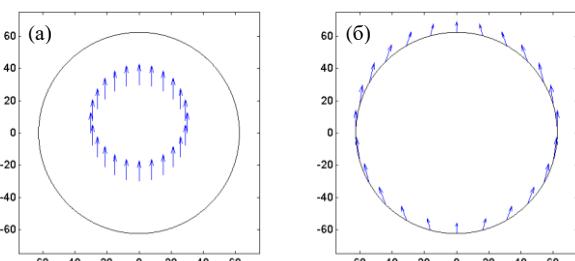


Рис.2. Векторное распределение электрического поля моды LP₀₁ : а) внутри волокна, б) под поверхностью оболочки волокна, в) над поверхностью оболочки волокна

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе построены угловые зависимости компонент электрического поля, а также графики распределения поля в пределах и за пределами оболочки волокна для мод LP₀₁. Повторно установлено, что перед границей и за границей оболочки волокна продольная компонента электрического поля соизмерима с поперечными компонентами. Также построены графики векторного распределения поля, на которых видно, что поле под поверхностью оболочки волокна направлено не строго параллельно оси поляризации моды, а присутствует ортогональная компонента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов, О.В. Оболочечные моды волоконных световодов и длиннопериодные волоконные решетки. / О.В. Иванов, С.А. Никитов. – М.: Физматлит, 2012. – 252 с.
- [2] Kawano, K. Introduction to Optical Waveguide Analysis: Solving Maxwell's Equations and the Schrodinger Equation / K. Kawano, T. Kitoh. – New York: Wiley-Interscience, 2001. – 296 p.
- [3] Абелъмас М. А., Расчёт продольного поверхностного поля оболочечных мод оптического волокна / Абелъмас М. А., Гафурова Л.И., Бакуров Д.Д., Иванов О.В. // Сборник трудов «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2021)». – Самара. – 2021.
- [4] Iizuka, K. Elements of the photonics. – New York: Wiley-Interscience, 2002. – 1197 p.