

# 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  
olegivit@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

## 1. 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 LP<sub>01</sub> и в зависимости от параметров волокна и строятся зависимости направления полей вокруг волокна.

## 2. РАСЧЁТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ДЛЯ МОДЫ LP<sub>01</sub>

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,  $\lambda$  – длина волны,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\omega$  – круговая частота,  $j$  – мнимая единица,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  – коэффициенты, которые определяются из граничных условий,  $r$  и  $\theta$  – цилиндрические координаты.

На рис. 1 представлены угловые зависимости распределения электрического поля моды LP<sub>01</sub> 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 осциллируют, 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.

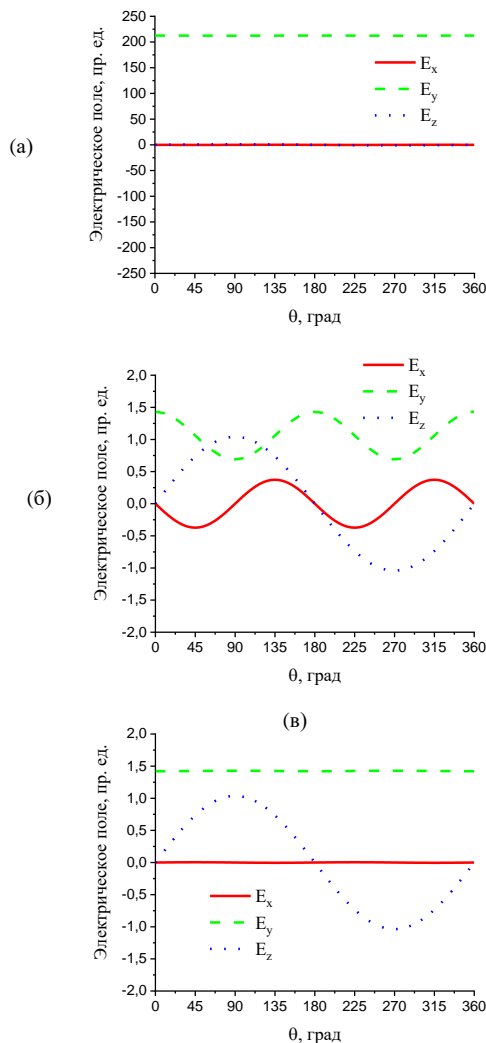


Рис. 1. Угловые зависимости компонент электрического поля моды  $LP_{01}$  а) внутри волокна ( $r = 30 \mu\text{м}$ ), б) под поверхностью оболочки волокна, в) над поверхностью оболочки волокна

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  $111^\circ$ ,  $69^\circ$ ,  $111^\circ$  и  $69^\circ$  для  $\theta$ , равного  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  и  $315^\circ$  соответственно. Это объясняется тем, что в случае под поверхностью оболочки амплитуда  $E_y$  компоненты соизмерима с  $E_x$  компонентой.

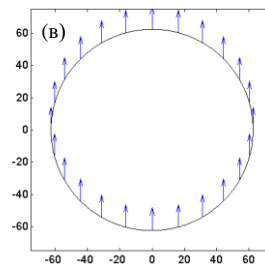
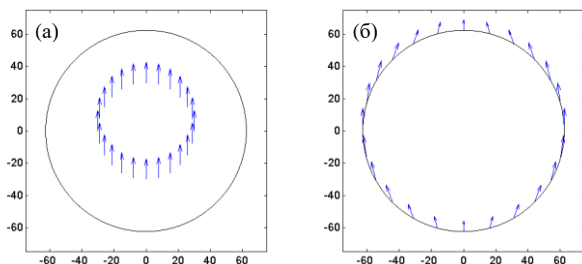


Рис.2. Векторное распределение электрического поля моды  $LP_{01}$  : а) внутри волокна, б) под поверхностью оболочки волокна, в) над поверхностью оболочки волокна

### 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  $LP_{01}$ . 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] Абельмас М. А., Расчёт продольного поверхностного поля оболочечных мод оптического волокна / Абельмас 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.