

Расчёт продольного поверхностного поля оболочечных мод оптического волокна

М.А. Абельмас¹, Л.И. Гафурова^{1,2}, Д.Д. Бакуров^{1,2}, О.В. Иванов²

¹Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

²Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Гончарова 48/2, Ульяновск, Россия, 432011

Аннотация

Исследуется роль продольной составляющей поля оптического волокна на границе раздела между оболочкой волокна и внешней средой. Численными методами рассчитывается амплитуда продольного поля для различных волоконных мод в зависимости от длины волны и параметров волокна. Показано, что в отличие от полей внутри волокна, где преобладает поперечное поле, для поверхностного поля продольная составляющая имеет тот же порядок, что и поперечные компоненты полей.

Ключевые слова

Оптическое волокно, волоконная мода, поверхностное поле

1. Введение

Преобразование и взаимодействие волоконных мод, распространяющихся по оболочке световода, представляют интерес в связи с возможностью создания различного рода волоконных датчиков, чувствительных к параметрам внешней среды [1]. При анализе распространения волоконных мод в волоконно-оптических структурах, как правило, используется приближение поперечно поляризованных мод и не учитывается продольная составляющая поля [2]. В некоторых задачах, например о преобразовании поляризации в скрученных волокнах, продольную составляющую необходимо учитывать [3]. С точки зрения создания датчиков, важным параметром является амплитуда поверхностного поля на внешней границе оболочки волокна.

В данной работе исследуется вопрос о соизмеримости продольной и поперечных составляющих полей оболочечных мод на границе раздела между оболочкой волокна и внешней средой. Численными методами рассчитывается амплитуда продольного поля для волоконных мод различных типов в зависимости от длины волны и параметров волокна.

2. Расчёт пространственного распределения полей

Рассмотрим распространение мод в оптическом световоде, размеры которого совпадают с размерами стандартного оптического волокна. Наличие сердцевинки слабо влияет на поверхностное поле на внешней оболочке волокна, поэтому пренебрежем ее влиянием. Для расчета мод волокна был применен метод декомпозиции, 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]:

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

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

$$E_{\theta} = \left[C \frac{j\beta}{(w/a)^2} \frac{v}{r} K_v \left(\frac{wr}{a} \right) + D \frac{j\omega\mu_0}{w/a} K_v' \left(\frac{wr}{a} \right) \right] \cos(v\theta + \phi), \quad (3)$$

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

На Рисунке 1 представлено пространственное распределение поля моды HE_{11} для волокна с параметрами $a = 62,5$ мкм, показатель преломления волокна $n_1 = 1,4502$, $n_2 = 1$ на длине волны $\lambda = 1,6$ мкм.

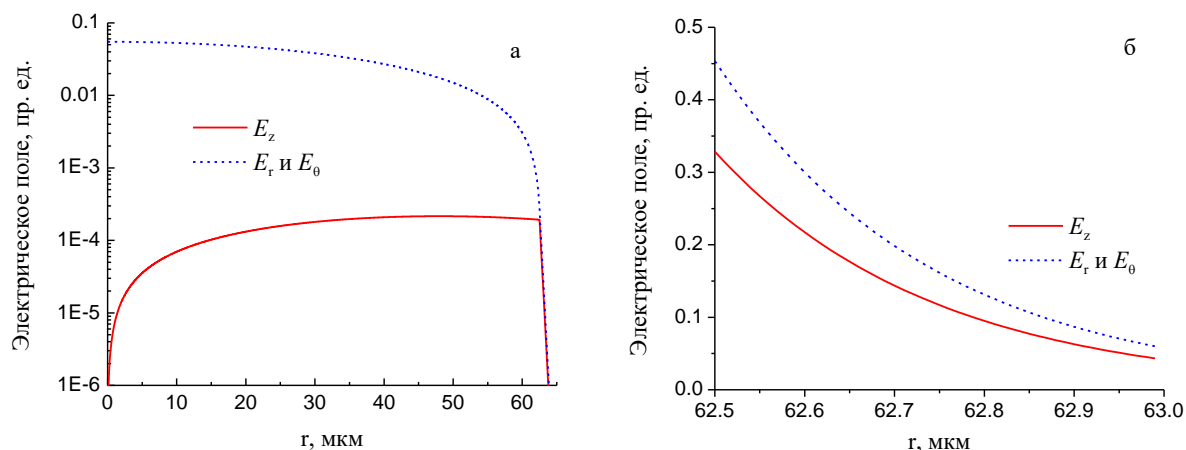


Рисунок 1: Графики полей для моды HE_{11}

Из Рисунка 1а видно, что продольная составляющая электрического поля E_z меньше поперечной E_r и азимутальной E_{θ} составляющих поля на два-три порядка. Однако на границе оболочки волокна с внешней средой (Рисунок 1б) продольная составляющая E_z соизмерима с поперечной E_r и азимутальной E_{θ} составляющими поля.

3. Заключение

Таким образом, в работе построены графики распределения поля в пределах оболочки волокна, а также на границе раздела оболочки и внешней среды. Установлено, что в отличие от полей внутри волокна, где поперечное поле превышает продольное на два-три порядка, на границе раздела оболочки и внешней среды продольная составляющая поля соизмерима с поперечной и азимутальной составляющими. В связи с этим при проектировании волоконно-оптических датчиков, основанных на взаимодействии оболочечных мод, необходим учет продольной компоненты поля.

4. 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] Smith, A.M. Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber // Appl. Opt. – 1980. – Vol. 19(15). – P. 2606-2611.
- [4] Iizuka, K. Elements of the photonics. – New York: Wiley-Interscience, 2002. – 1197 p.