

Д. ф.-м. н. А. М. ГОМИЛКО, к. т. н. В. Б. КАТОК,  
к. ф.-м. н. В. С. МАЛЮГА, к. ф.-м. н. Е. Б. ОМЕЦИНСКАЯ

Дата поступления в редакцию  
14.09 1998 г.  
Оппонент к. т. н. Т. В. МАКАРОВ

Украина, г. Киев, Ин-т гидромеханики НАНУ,  
НИЦ линейно-кабельных сооружений

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОМОДОВОГО W-ВОЛОКНА

*Исследуется одномодовое W-волокно с непрерывным профилем показателя преломления, описываемым полиномом четвертой степени.*

*The singlemode W-fiber with continuous profile of reflecting described by the fourth-order polynomial is investigated.*

Для создания высокоскоростных систем передачи с большой информационной емкостью требуется разработка волоконных световодов (ВС) с улучшенными характеристиками. Передаточные характеристики ВС сильно зависят от профиля показателя преломления (ППП), определяющего распределение диэлектрической проницаемости в поперечном сечении световода. Одномодовые ВС круглого поперечного сечения с внеосевым провалом ППП (W-образный ступенчатый профиль) обладают высокой локализацией световой мощности в сердцевине волокна и расширенным одномодовым диапазоном нормированной частоты, что позволяет получить большие размеры сердцевины и диаметра модового поля в сравнении с одноступенчатым ВС и поэтому облегчает введение в световод излучения, а также стыковку волокон.

Исследование электродинамических характеристик ВС базируется на решении вытекающих из уравнений Максвелла точных волновых уравнений или приближенного уравнения линейно-поляризованных волн (LP-мод), не имеющих точного решения для световода с произвольной формой ППП. В случае W-волокна со ступенчатым профилем для волновых уравнений известно точное решение, на основании которого исследованы указанные выше преимущества данного типа волокон [1, с. 351]. Однако в реальных световодах ППП является градиентным, т. е. имеет непрерывный характер, с плавным переходом профиля сердцевины волокна к однородной оболочке и, по крайней мере, с одной точкой перегиба в пределах сердцевины. Это обусловлено технологией изготовления оптического волокна (ОВ). Поэтому целесообразен детальный анализ W-волокна с непрерывным ППП.

Для градиентных волокон круглого сечения известно точное решение волнового уравнения LP-мод

лишь в случае непрерывного параболического ППП и некоторых, не характерных для практики, частных видов ППП [2, с. 280]. В случае произвольного градиентного профиля сердцевины световода, в т. ч. W-образного типа, при решении волнового уравнения применяют приближенные численные и аналитические методы.

Настоящая работа посвящена исследованию электродинамических характеристик одномодового W-волокна с непрерывным профилем показателя преломления, описываемым полиномом четвертой степени.

Применение уравнений Максвелла к исследованию распространения электромагнитных волн вдоль оси Z оптического волокна круглого поперечного сечения с радиально неоднородным распределением показателя преломления (ПП) в сердцевине и диэлектрически однородной оболочкой приводит к краевой задаче [1, с. 383]

$$\left\{ \frac{d^2}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{d}{dR} + \left[ k^2 n^2(R) - \beta^2 - \frac{1}{R^2} \right] \right\} F_l(R) = 0, \quad (1)$$

$$0 \leq R \leq 1;$$

$$\left. \frac{1}{F_l} \frac{dF_l}{dR} \right|_{R=1} = \frac{V \sqrt{B} K_1'(V \sqrt{B})}{K_1(V \sqrt{B})}, \quad (2)$$

где  $F_l(R)$  — волноводная функция, посредством которой известными формулами [2, с. 260] выражаются распределения напряженностей электрического и магнитного полей в поперечном сечении волокна, имеющие множитель  $\exp[-i(\omega t - \beta z - \nu \theta)]$  ( $i = \sqrt{-1}$ );

$K_1$  — функция Макдональда 1-го порядка;  
 $R = r/a$ ,  $\theta$  — соответственно безразмерная радиальная и азимутальная координаты точки поперечного сечения волокна с радиусом сердцевины  $a$ ;

$z$  — продольная координата;

$\nu$ ,  $l = \nu \pm 1$  — азимутальное число и азимутальный параметр направляемой световодом моды,  $l = 0, 1, 2, \dots$ ;

$k = \omega/c$  — волновое число;

$c$  — скорость света в свободном пространстве;

$\omega, \beta$  — циклическая частота и продольная постоянная распространения моды;

$n(R)$  — радиальное распределение ПП в сердцевине волокна;

$V, B$  — нормированная частота и безразмерный фазовый параметр световода:

$$V = ak \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = akn_1 \sqrt{2\Delta}; \quad (3)$$

$$B = \frac{\beta^2/k^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2$  — максимальное значение ПП соответственно в сердцевине и в оболочке;

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1.$$

Значение волноводной функции  $F_l(R)$  в оболочке ( $R \geq 1$ ) пропорционально значению функции  $K_l(V\sqrt{BR})$ , обеспечивающей экспоненциальное затухание электромагнитного поля при  $R \rightarrow \infty$ . Соответствующий коэффициент пропорциональности находится из условия непрерывности волновой функции при  $R=1$  на границе между сердцевиной и оболочкой. Граничное условие (2) также получено из требования согласования полей в сердцевине и оболочке.

Волновое уравнение (1) для LP-мод справедливо в приближении слабонаправляющих световодов при малом значении параметра  $\Delta$ . Для реальных ОВ разность между значением ПП в сердцевине и оболочке составляет всего несколько процентов или доли процента, т. е. имеет место условие малой направленности мод —  $\Delta \ll 1$ .

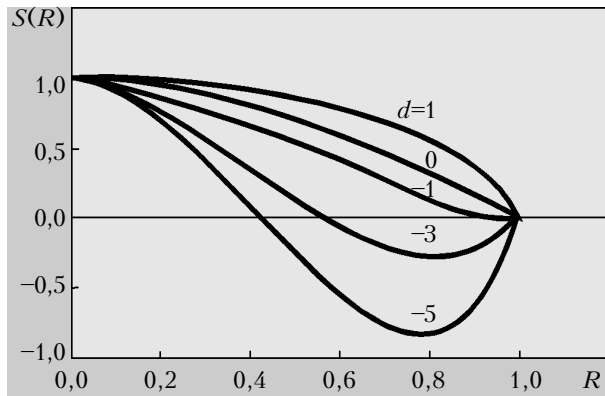


Рис. 1. Нормированный профиль показателя преломления, описываемый полиномиальной формулой при разных значениях параметра  $d$

Для исследования влияния параметров W-образного ППП на электродинамические характеристики градиентного световода опишем распределение ПП в его сердцевине полиномом четвертой степени вида

$$n(R) = n_1 \{1 - \Delta[(1-d)R^2 + dR^4]\}, \quad 0 \leq R \leq 1, \quad d \leq 1. \quad (6)$$

На рис. 1 изображены графики нормированной функции ППП (6) для разных значений параметра  $d$  профиля:

$$S(R) = 1 - (1-d)R^2 - dR^4. \quad (7)$$

Величина  $S(R)$  отражает ППП в нормированном виде и пропорциональна отклонению ПП в сердцевине от его значения  $n_2$  в оболочке ОВ. В области однородной оболочки ( $R \geq 1$ )  $S(R)$  имеет нулевое значение. Выбор профиля в виде (6) обеспечивает его непрерывность в точке  $R=1$  перехода от сердцевины к оболочке ( $S(R)=0$ ). Значения 1 и 0 параметра  $d$  профиля определяют, согласно (6), известные профили соответственно четвертой и второй степени (квадратичный ППП). Для значений  $d < -1$  полиномиальный профиль (6) становится W-образным; с уменьшением параметра  $d$  глубина и ширина внеосевого провала ППП увеличиваются. Граничное значение  $d=-1$  определяет профиль с плавным изменением ПП при переходе от сердцевины к оболочке ( $S'(1)=0$ ), имеющий точку перегиба в области сердцевины. Такой профиль в большей степени соответствует реальному по сравнению с известным параболическим ( $d=0$ ), в случае которого имеется точное решение краевой задачи (1), (2).

Краевая задача (1), (2) для волновой функции  $F_l(R)$  решалась в вариационной постановке [1, с. 444] методом Ритца. На основании ее решения для конкретного вида ППП сердцевины ОВ в виде (6) исследовано влияние величины параметра  $d$  на значение границ диапазона  $V$  и коэффициента локализации в сердцевине волокна световой мощности

$$\Gamma(V) = \frac{\int_0^1 F_l^2(R) R dR}{\int_0^\infty F_l^2(R) R dR}, \quad l = 0. \quad (8)$$

Границы одномодовой полосы [ $V_{c1}, V_{c2}$ ] нормированных частот рассчитывались из дисперсионного соотношения  $f(B, V)=0$ , вытекающего из граничного условия (2), при нулевом значении фазового параметра  $B$  световода (уравнения частот отсечек LP-мод). Величины  $V_{c1}, V_{c2}$  являются соответственно частотами отсечек основной моды ( $l=0$ ) и следующей за ней первой старшей моды ( $l=1$ ). В области значений нормированной частоты  $V$ , меньших частоты отсечки моды, эта мода не существует, т. е. отсутствует ее дисперсионная зависимость  $B(V)$ .

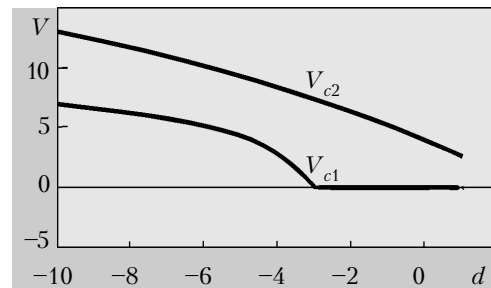


Рис. 2. Границы одномодового диапазона нормированной частоты в зависимости от величины параметра  $d$

Результаты расчета границ одномодового диапазона нормированных частот для световодов с полиномиальным ППП (6) в зависимости от величины параметра  $d$  профиля представлены на рис. 2.

Известный для ступенчатого W-волокна сдвиг частоты отсечки  $V_{c1}$  основной моды в область ее положительных значений [1, с. 351] имеет место и в случае градиентного W-волокна с полиномиальным профилем (6). Как видно из рис. 2, этот сдвиг имеет место для значений параметра профиля  $d < -3$  и наступает при его критической величине  $d = -3$ , соответствующей нулевому значению объема профиля ( $\Omega$ ).

$$\Omega = \int_0^1 S(R)RdR = \frac{3+d}{12}. \quad (9)$$

При уменьшении параметра  $d$  глубина и ширина внеосевого провала W-профиля (рис. 1) увеличиваются, отрицательное значение объема профиля уменьшается, а границы  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  одномодовой полосы нормированных частот сдвигаются в область бóльших значений (рис. 2). Как видно из рис. 2, определяющая ширину одномодовой полосы частот разность ( $V_{c2} - V_{c1}$ ) имеет наибольшую величину при критическом значении параметра профиля  $d = -3$ .

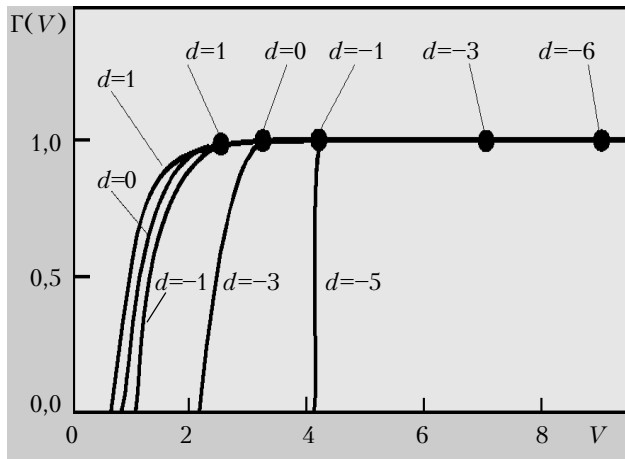


Рис. 3. Зависимость коэффициента локализации мощности в сердцевине световода для основной моды от нормированной частоты при разных значениях параметра  $d$ ; отмечены границы  $V_{c2}$  одномодового диапазона частот ( $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ )

На рис. 3 приведены результаты расчета коэффициента  $\Gamma(V)$  для основной моды при разных значениях параметра  $d$ . Как видно из рисунка, в случае W-образного профиля ( $d < -1$ ) обеспечивается высокое значение  $\Gamma(V)$  практически во всей одномодовой полосе частот, что не имеет места для монотонных профилей ( $d \geq -1$ ), в т. ч. и для параболичес-

кого ( $d=0$ ). При уменьшении значения параметра  $d$  W-профиля эффект локализации в сердцевине волокна мощности поля основной моды увеличивается.

Для сопоставления электродинамических характеристик W-волокон (градиентного с полиномиальным профилем и ступенчатого), имеющих одинаковые значения глубины ( $\gamma$ ) и ширины ( $h$ ) внеосевого провала, определяемых, согласно (6), формулами

$$\gamma = \left| 1 + \frac{(1-d)^2}{4d} \right|; \quad h = 1 - \frac{1}{\sqrt{-d}}, \quad (10)$$

найдено значение объема профиля для соответствующего ступенчатого W-волокна:

$$\Omega = \frac{d^3 + 3d^2 - d + 1}{8d^2}. \quad (11)$$

Согласно (11), нулевое значение объема профиля ступенчатого W-волокна имеет место при критическом значении параметра  $d \approx -3,383$ , меньшем значения  $d = -3$  для волокна с градиентным W-профилем (6).

Таким образом, на основании решения краевой задачи для волнового уравнения LP-мод в вариационной постановке методом Ритца исследованы электродинамические характеристики градиентного W-волокна с непрерывным ППП, описываемым однопараметрическим полиномом 4-й степени.


Установлено, что W-волокно с непрерывным профилем обеспечивает лучшую локализацию излучения в сердцевине волокна и одномодовый режим в области более высоких значений нормированной частоты по сравнению со ступенчатым W-волокном, имеющим те же величины глубины и ширины внеосевого провала профиля.

Найдено условие сдвига частоты отсечки основной моды в область положительных значений для градиентного W-волокна и установлено его наглядное истолкование, справедливое для W-волокон обоих типов: сдвиг частоты отсечки основной моды имеет место при отрицательном значении величины объема профиля; для ступенчатого W-волокна этот сдвиг наступает при больших значениях глубины и ширины внеосевого провала профиля.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. — М.: Мир, 1984.
2. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. — М.: Радио и связь, 1987.

в портфеле редакции



в портфеле редакции

в портфеле редакции

- Классификационный анализ акустооптических устройств управления лазерным пучком. В. В. Данилов (Украина, г. Донецк)
- Метод проверки значимости оценок коэффициентов модели. С. Г. Федорченко (Молдова, г. Тирасполь)
- Об одном способе обработки экспертных оценок. Д. А. Сеченов, М. Д. Скубилин, В. В. Поляков (Россия, г. Таганрог)

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции

в портфеле редакции