

УДК 621.372.

С.Ю. Отрохов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязино, Россия

МОДЫ И ПАРАМЕТРЫ ПЛАНАРНЫХ W-СВЕТОВОДОВ

Представлены результаты численного расчета внешних поперечных волновых чисел вытекающих мод плоского W-световода в зонах одномодового и двухмодового режимов. Показано, каким образом для гарантии устойчивости одномодового или многомодового режима в нужном диапазоне длин волн необходимо подбирать геометрические и оптические параметры W-световода так, чтобы при необходимой концентрации поля направляемой моды в световодущей жиле обеспечить эффективную фильтрацию вытекающих мод.

Ключевые слова: плоский пятислойный W-световод, дисперсионное уравнение, частота отсечки, коэффициент преломления промежуточного слоя, внешнее поперечное волновое число, потери вытекающих мод.

S.Yu. Otrokhov

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering
and Electronics of Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia

MODES AND PARAMETERS OF PLANAR W-FIBERS

The results of numerical calculation of the outer transverse wave numbers of the leaking modes of a planar W-fiber in the zones of single-mode and two-mode operating condition are presented. It is shown that, to guarantee the stability of the single-mode or multimode operating condition in the desired range of wavelengths it is necessary to select the geometrical and optical parameters of the W-fiber so that at the required field concentration in the guiding optical core to provide effective filtration of the leaking modes.

In the real work not to be set by a task to pick up the optimum parameters of guiding W-fibers so what in the given range of lengths of waves λ the W-light guide would be single-mode, provided high concentration of the field in the basic mode and carried out efficient filtration of the leaking modes. To be put by the purpose to show what changes of parameters of a wave guide it is possible to correct its most important characteristics.

Keywords: planar five – layer W-fiber, dispersion relation, cutoff frequency, interlayer refractive index, outer transverse wave number, loss of leaking modes.

Введение

Обеспечить одномодовый режим в оптическом волноводе в широком диапазоне длин волн при большом сечении фундаментальной моды и малых оптических потерях излучения на изгибе возможно в волноводах W-конфигурации [1–3]. Такие световоды по ряду характеристик уступают фотонно-кристаллическими волноводами, но обладают более простой и, следовательно, технологически менее

сложной для изготовления структурой, и в некоторых применениях [4] могут оказаться намного эффективнее, чем, по крайней мере, стандартные световоды со ступенчатым показателем преломления.

Световедущая структура W-световода зависит от пяти параметров: трех значений показателей преломления n_1 , n_2 , n_3 , ($n_1 > n_3 > n_2$) и величин a и b (рис. 1).

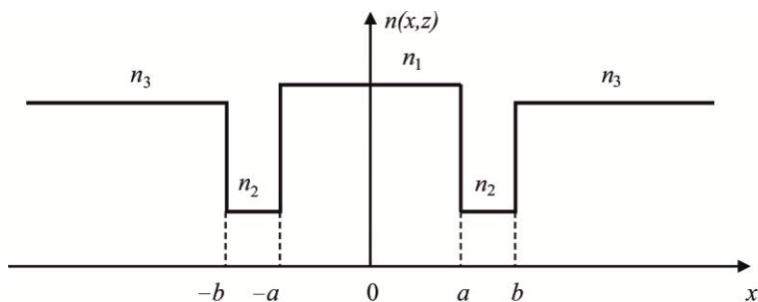


Рис. 1. Схема поперечного распределения показателя преломления в плоской пятислойной световедущей структуре

В современных условиях технология MСVD позволяет изготовить W-световод с заданной структурой, например, с увеличенной контрастностью, т.е. большой $n_1 - n_2$ и малой $n_1 - n_3$ разностью показателей преломления слоев при необходимой степени их контроля (на уровне $\sim 10^{-3}$ [1]) и точностью ширины слоев (на уровне $\sim 10^{-2}$ мкм). Подбором именно этих параметров можно существенно расширить зону одномодового режима, оптимизировать размер основной моды, добиться высокой концентрации поля [3]. Однако заметную роль в таких волноводах играют паразитные (вытекающие) моды [2].

Целями настоящей работы являются исследование характеристик вытекающих мод для различных конфигураций плоских W-световодов и выбор условий для их эффективной фильтрации. Для численного расчета и построения графиков частично будут использованы результаты, полученные в работах [2, 5].

Теория

Единственная электрическая компонента ТЕ-моды, распространяющаяся вдоль оси z в такой структуре, имеет вид:

$$E_y = E(x) \exp(-i\beta z) \quad (1)$$

и удовлетворяет волновому уравнению:

$$d^2 E(x) / dx^2 + (k^2 n^2(x) - \beta^2) E(x) = 0, \quad (2)$$

где β – постоянная распространения моды, $\beta = \beta' - i\beta''$; $k = \omega/c$.

Используя условия непрерывности функций $E_y \sim E(x)$ и $H_z \sim dE(x)/dx$ в точках $x = a$ и $x = b$ решение уравнения (2) и дисперсионное уравнение для нахождения волновых чисел мод можно представить соответственно в виде (3) и (5):

$$E(x) = \begin{cases} A \left[1 + \left(\frac{(w-v)}{(w+v)} \right) \exp(-2w(b-a)) \right] f(x) & 0 \leq x \leq a, \\ A \left[1 + \left(\frac{(w-v)}{(w+v)} \right) \exp(-2w(b-x)) \right] \exp[-w(x-a)] & a \leq x \leq b, \\ A \left[1 + \left(\frac{(w-v)}{(w+v)} \right) \right] \exp[-w(b-a)] \exp[-v(x-b)] & x \geq b, \end{cases} \quad (3)$$

где $f(x) = \cos(ux) / \cos(ua)$ – для четных мод, $f(x) = \sin(ux) / \sin(ua)$ – для нечетных мод, u, w, v – поперечные волновые числа:

$$\begin{aligned} u^2 &= k^2 n_1^2 - \beta^2, \\ w^2 &= \beta^2 - k^2 n_2^2, \\ v^2 &= \beta^2 - k^2 n_3^2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$F(v) = wC \cos(ua) - uD \sin(ua) = 0 \quad \text{– для четных мод,} \quad (5a)$$

$$F(v) = wC \sin(ua) + uD \cos(ua) = 0 \quad \text{– для нечетных мод.} \quad (5б)$$

Здесь

$$\begin{aligned} C &= vch[w(b-a)] + wsh[w(b-a)], \\ D &= wch[w(b-a)] + vsh[w(b-a)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Внутреннее поперечное волновое число u и промежуточное поперечное волновое число w , входящие в выражения (3), (5) и (6), удобно рассматривать как функции переменной внешнего поперечного волнового числа v , которые определяются с учетом (4) по формулам:

$$\begin{aligned} u^2 &= -v^2 + k^2(n_1^2 - n_3^2), \\ w^2 &= v^2 + k^2(n_3^2 - n_2^2). \end{aligned} \quad (7)$$

Корни дисперсионного уравнения (5) удобно вычислять методом Ньютона [6]:

$$v_{m+1} = v_m - \frac{F(v_m)}{F'(v_m)}. \quad (8)$$

Из соотношений (7) легко получить, что

$$\frac{dw}{dv} = \frac{v}{w}, \quad \frac{du}{dv} = -\frac{v}{u}. \quad (9)$$

Принимая во внимание (9), (5) и (6), получим выражение для производной от функции $F(v)$:

для четных мод:

$$\begin{aligned} F'(v) &= C \left\{ \frac{v}{w} \cos(ua) + \left[-\frac{u}{w} + \frac{v(w^2 + u^2)}{uw} a - \frac{uv}{w} b \right] \sin(ua) \right\} + \\ &+ D \left\{ (1 + vb) \cos(ua) + \frac{v}{u} \sin(ua) \right\}; \end{aligned} \quad (10a)$$

для нечетных мод:

$$\begin{aligned} F'(v) &= C \left\{ \frac{v}{w} \sin(ua) - \left[-\frac{u}{w} + \frac{v(w^2 + u^2)}{uw} a - \frac{uv}{w} b \right] \cos(ua) \right\} + \\ &+ D \left\{ (1 + vb) \sin(ua) - \frac{v}{u} \cos(ua) \right\}. \end{aligned} \quad (10б)$$

Необходимые выражения для расчета частоты отсечки у четных и нечетных мод в W-световоде находятся при $v=0$ из (5). С учетом (6) и (7) получим:

для четных мод:

$$\frac{\sqrt{n_3^2 - n_2^2}}{\sqrt{n_1^2 - n_3^2}} th \left[k \sqrt{n_3^2 - n_2^2} (b - a) \right] = \operatorname{tg} \left[ka \sqrt{n_1^2 - n_3^2} \right]; \quad (11a)$$

для нечетных мод:

$$\frac{\sqrt{n_3^2 - n_2^2}}{\sqrt{n_1^2 - n_3^2}} th \left[k \sqrt{n_3^2 - n_2^2} (b - a) \right] = -\operatorname{ctg} \left[ka \sqrt{n_1^2 - n_3^2} \right]. \quad (11б)$$

Результаты численных расчетов

Направляемым, незатухающим волнам соответствуют вещественные корни уравнения (5), обладающие свойством $\nu > 0$. Вытекающим волнам соответствуют комплексные корни $\nu = \nu' + i\nu''$, для которых $\nu' < 0$.

Используя расчетные значения для ν , найдем постоянные распространения β и потери α вытекающих мод по формулам:

$$\beta = \sqrt{k^2 n_3^2 + \nu^2}, \quad (12)$$

$$\alpha = 20 \lg(e) \cdot 10^6 \beta'' \text{ дБ/м}, \quad (13)$$

здесь величина β'' имеет размерность мкм^{-1} .

В настоящей работе получены результаты расчета границ одномодового и двухмодового режимов для двух конфигураций плоских W-световодов во всем диапазоне изменения коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 , а также волновых характеристик для направляемых и паразитных (вытекающих) мод на $\lambda_1 = 1,55 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 2 \text{ мкм}$, $\lambda_3 = 3 \text{ мкм}$.

На рис. 2 представлены (рассчитанные по формулам (11a) и (11б)) зависимости частоты отсечки основной моды (нижняя граница затемненной зоны), частоты отсечки первой нечетной моды (верхняя граница затемненной зоны) и частоты отсечки второй четной моды (верхняя кривая) от коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$) W-световода с фиксированными значениями параметров ($n_1 = 1,456$, $n_3 = 1,453$, $a = 9,5 \text{ мкм}$, $b = 10 \text{ мкм}$). Точки, лежащие в затемненной зоне, отвечают одномодовому режиму, причем в интервале $1,395 \leq n_2 \leq n_3$ имеем одномодовый режим с нулевой

отсечкой основной моды, а на границе интервала (при $n_2 = 1,395$) этот режим реализуется в максимальном диапазоне частот. Прямая (4), параллельная оси абсцисс на уровне $\frac{\omega}{c} \approx 2,094 \text{ мкм}^{-1}$, соответствует излучению с длиной волны $\lambda = 3 \text{ мкм}$; прямая (5) на уровне $\frac{\omega}{c} \approx 3,14 \text{ мкм}^{-1}$ соответствует излучению с длиной волны $\lambda = 2 \text{ мкм}$; прямая (6) на уровне $\frac{\omega}{c} \approx 4,054 \text{ мкм}^{-1}$ соответствует длине волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$. В частности, из рис. 2 видно, что на длине волны 1,55 мкм в диапазоне $(1 < n_2 < 1,445)$ данный W-световод является двухмодовым, а при $1,445 < n_2 < n_3$ становится трехмодовым.

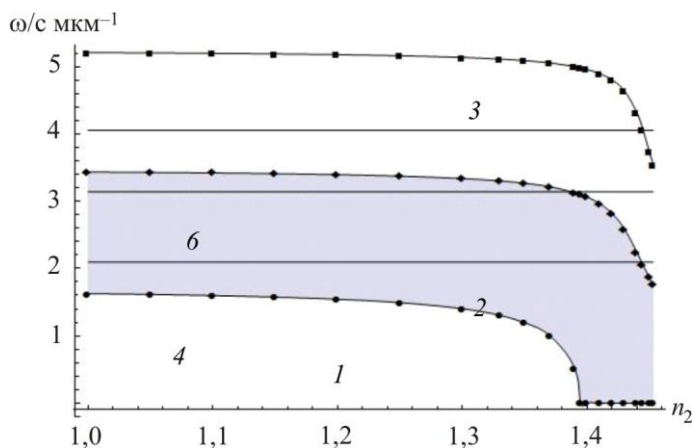


Рис. 2. Частоты отсечки основной (1), первой нечетной (2) и второй четной (3) мод W-световода с параметрами $n_1 = 1,456$, $n_3 = 1,453$, $a = 9,5 \text{ мкм}$, $b = 10 \text{ мкм}$ в зависимости от коэффициента преломления промежуточного слоя

$$n_2 (1 \leq n_2 \leq n_3)$$

Что касается волновых характеристик направляемых и вытекающих мод рассматриваемого волновода, то они находятся из решения дисперсионных уравнений (5а) и (5б) с учетом (6). Зададим для определенности $n_2 = 1,38$, тогда на длине волны $\lambda_1 = 1,55 \text{ мкм}$ для основной моды из (5а) и первой нечетной моды из (5б) с учетом (6) и (7) будем иметь:

$$\begin{cases} v_1(\text{осн}) = 0,345667, & u_1(\text{осн}) = 0,154655, & w_1(\text{осн}) = 1,87558, \\ v_1(\text{нч}) = 0,219465, & u_1(\text{нч}) = 0,308609, & w_1(\text{нч}) = 1,85647, \end{cases} \quad (14)$$

на длинах волн $\lambda_2 = 2$ мкм и $\lambda_3 = 3$ мкм при выбранных параметрах имеем только одномодовые режимы и получим соответственно:

$$v_2(\text{осн}) = 0,25211, \quad u_2(\text{осн}) = 0,150242, \quad w_2(\text{осн}) = 1,45075 \quad (15)$$

$$v_3(\text{осн}) = 0,138076, \quad u_3(\text{осн}) = 0,138621, \quad w_3(\text{осн}) = 0,962409. \quad (16)$$

Подставляя результаты (14 – 16) в (3), найдем распределение поля в данном W-световоде. (Ниже в таблице приведены результаты расчета концентрации поля $\eta = E(b) / E_{\max}$ с использованием данных (14 – 16)).

Распределение комплексных корней (значений внешнего поперечного волнового числа v) для вытекающих мод рассматриваемого световода представлено на рис. 3. Корни получены из решения дисперсионных уравнений (5а) и (5б) в диапазоне $|v''| < 20$ для трех длин волн. Распределение корней имеет «лепестковую» структуру [2]. (Четыре действительных корня: $v_1(\text{осн})$, $v_1(\text{нч})$, $v_2(\text{осн})$, $v_3(\text{осн})$ соответствующие направляемым модам, на рис. 3 не показаны). Чтобы не перегружать рис. 3 значения корней, полученные из решения дисперсионного уравнения (5б) для нечетных мод, представлены только на кривой 1,2 ($\lambda_1 = 1,55$ мкм). Они лежат на одной кривой с корнями уравнения (5а) для четных мод и располагаются эквидистантно между ними по мнимой оси (отмечены пирамидами). То же самое имеет место и для кривой 3 ($\lambda_1 = 2$ мкм) и кривой 4 ($\lambda_1 = 3$ мкм).

Минимальными потерями обладают вытекающие моды с наименьшей мнимой частью $|\beta''|$. Так, на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм наименьшие потери $\alpha(\text{ч}) \approx 1,9 \cdot 10^3$ дБ/м имеет вытекающая мода с наименьшей по модулю действительной частью поперечного волнового числа v , рассчитанного из дисперсионного уравнения (5а) для четных мод. На рис. 3 это крайний правый корень на кривой 1,2. (Результаты расчета потерь паразитных мод с наименьшей по модулю действительной частью поперечного волнового числа v на других длинах волн приводятся в таблице).

Результаты численных расчетов концентрации поля направляемых мод и потерь вытекающих мод для двух конфигураций W-световодов

| Первая конфигурация плоского W-световода | | | |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| λ , мкм | $n_1 = 1,456, n_2 = 1,38, n_3 = 1,453,$ $a = 9,5$ мкм, $b = 10$ мкм | | |
| $\lambda_1 = 1,55$ | $\eta(o) = 0,0606353$ | $\eta(1\text{нч}) = 0,131087$ | $\alpha(\text{ч}) = 1925,76$ дБ/м; $\alpha(\text{нч}) = 6019,65$ дБ/м |
| $\lambda_2 = 2$ | $\eta(o) = 0,10126$ | – | $\alpha(\text{ч}) = 7987,13$ дБ/м; $\alpha(\text{нч}) = 475,419$ дБ/м |
| $\lambda_3 = 3$ | $\eta(o) = 0,211113$ | – | $\alpha(\text{ч}) = 39314,4$ дБ/м; $\alpha(\text{нч}) = 11488,8$ дБ/м |
| Вторая конфигурация плоского W-световода | | | |
| λ , мкм | $n_1 = 1,456, n_2 = 1,38, n_3 = 1,454,$ $a = 9,5$ мкм; $b = 11$ мкм | | |
| $\lambda_1 = 1,55$ | $\eta(o) = 0,00876419$ | – | $\alpha(\text{ч}) = 52,8371$ дБ/м; $\alpha(\text{нч}) = 3,00572$ дБ/м |
| $\lambda_2 = 2$ | $\eta(o) = 0,0214917$ | – | $\alpha(\text{ч}) = 437,663$ дБ/м; $\alpha(\text{нч}) = 89,4373$ дБ/м |
| $\lambda_3 = 3$ | $\eta(o) = 0,0708812$ | – | $\alpha(\text{ч}) = 5908,62$ дБ/м; $\alpha(\text{нч}) = 1549,06$ дБ/м |

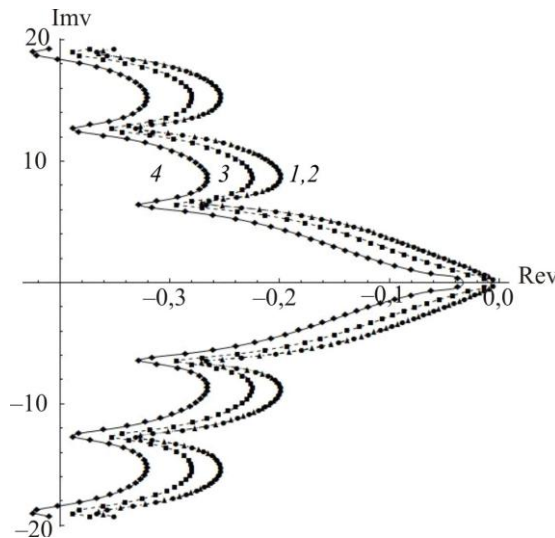


Рис. 3. Расчетные значения внешнего поперечного волнового v для вытекающих мод ($\lambda = 1,55$ мкм(1,2), 2 мкм(3), 3 мкм(4)) плоского пятислойного W-световода с параметрами ($n_1 = 1,456, n_2 = 1,38, n_3 = 1,453, a = 9,5$ мкм, $b = 10$ мкм);
 ● – 1, ▲ – 2, ■ – 3, ◆ – 4

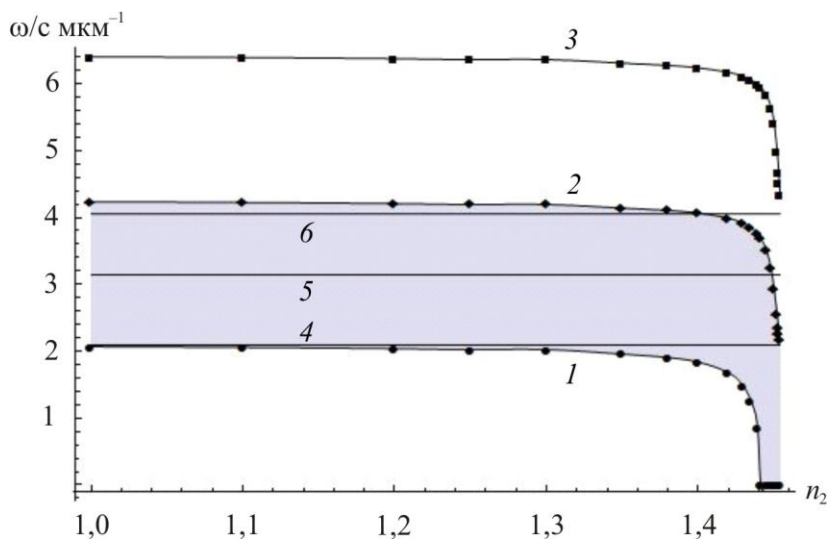


Рис. 4. Частоты отсечки основной (1), первой нечетной (2) и второй четной (3) мод W-световода с параметрами ($n_1 = 1,456$, $n_3 = 1,454$, $a = 9,5$ мкм, $b = 11$ мкм) в зависимости от коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$)

Рассмотрим W-световод, в котором на широком интервале изменения коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 осуществляется одномодовый режим на $\lambda_1 = 1,55$ мкм, $\lambda_2 = 2$ мкм, $\lambda_3 = 3$ мкм (как вариант, см. рис. 4).

На рис. 4 представлены результаты расчета зон одномодового (затемненная зона) и двухмодового режимов W-световода с параметрами $n_1 = 1,456$, $n_3 = 1,454$, $a = 9,5$ мкм, $b = 11$ мкм. Обозначения те же, что и на рис. 2. Из рис. 4 следует, что на длине волны 1,55 мкм в диапазоне $1 < n_2 < 1,4$ данный W-световод является одномодовым, а при $1,4 < n_2 < n_3$ становится двухмодовым. На длине волны 3 мкм (прямая 4, параллельная оси абсцисс) он одномодовый на всем диапазоне изменения n_2 .

Полагая $n_2 = 1,38$, из решения дисперсионного уравнения (5а) для четных мод (при выбранных параметрах, имеем только одномодовые режимы на длинах волн $\lambda_1 = 1,55$ мкм, $\lambda_2 = 2$ мкм, $\lambda_3 = 3$ мкм) с учетом (6) и (7) получим значения волновых характеристик направляемых мод:

$$v_1(\text{осн}) = 0,266707, \quad u_1(\text{осн}) = 0,156534, \quad w_1(\text{осн}) = 1,87543, \quad (17)$$

$$v_2(\text{осн}) = 0,183656, \quad u_2(\text{осн}) = 0,153989, \quad w_2(\text{осн}) = 1,45036, \quad (18)$$

$$v_3(\text{осн}) = 0,0610274, \quad u_3(\text{осн}) = 0,147665, \quad w_3(\text{осн}) = 0,961063. \quad (19)$$

Выше в таблице приведены результаты расчета концентрации поля η с использованием данных (17 – 19).

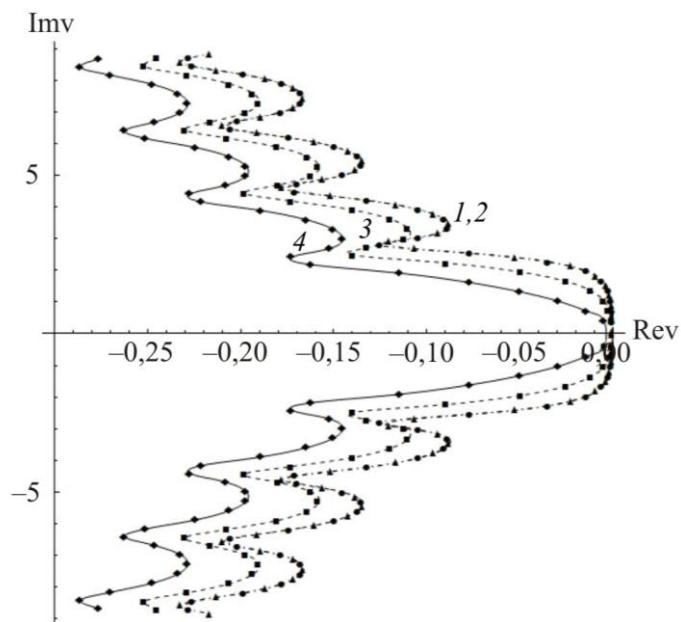


Рис. 5. Расчетные значения внешнего поперечного волнового v для вытекающих мод ($\lambda = 1,55$ мкм (1, 2), 2 мкм (3), 3 мкм (4)) плоского пятислойного W-световода с параметрами ($n_1 = 1,456$, $n_2 = 1,38$, $n_3 = 1,454$, $a = 9,5$ мкм, $b = 11$ мкм);
 ● – 1, ▲ – 2, ■ – 3, ◆ – 4

На рис. 5. показаны расчетные значения внешнего поперечного волнового числа v для вытекающих мод W-световода второй конфигурации (с зонами см. рис. 4). Корни получены из решения дисперсионных уравнений (5а) и (5б). Однако в новой конфигурации три боковых лепестка, с меньшим количеством корней в каждом из них, уложились диапазоне $|v''| < 9$ для трех длин волн. Три действительных корня: $v_1(\text{осн})$, $v_2(\text{осн})$ и $v_3(\text{осн})$ (17) – (19), соответствующие направляемым модам, на рис. 5 не показаны. Как и в

предыдущем случае, чтобы не перегружать рис. 5, значения корней, полученные из решения дисперсионного уравнения (5б) для нечетных мод, представлены только на кривой 1,2 ($\lambda_1 = 1,55$ мкм). Как и в рассмотренном выше случае, они лежат на одной кривой с корнями уравнения (5а) для четных мод и располагаются эквидистантно между ними по мнимой оси (отмечены пирамидами). То же самое имеет место для кривой 3 ($\lambda_1 = 2$ мкм) и кривой 4 ($\lambda_1 = 3$ мкм). В данном случае, в отличие от предыдущего, корень с наименьшей по модулю действительной частью поперечного волнового числа v на длине волны 1,55 мкм получен из дисперсионного уравнения (5б) для нечетных мод. На рис. 5 это крайний правый корень на кривой 1,2.

Важно отметить, что потери этой паразитной моды составляют всего $\alpha(\text{нч}) \approx 3$ дБ/м, что не позволяет обеспечить для неё эффективную фильтрацию и реализовать устойчивый одномодовый режим направляемой моды на $\lambda_1 = 1,55$ мкм для данной конфигурации W-световода.

Результаты численных расчетов концентрации поля направляемых мод и потерь вытекающих мод для двух конфигураций планарных W-световодов: ($n_1 = 1,456, n_2 = 1,38, n_3 = 1,453, a = 9,5$ мкм, $b = 10$ мкм) и ($n_1 = 1,456, n_2 = 1,38, n_3 = 1,454, a = 9,5$ мкм; $b = 11$ мкм) представлены в таблице выше.

Степень концентрации поля оценивалась коэффициентом $\eta(o)$ для фундаментальной (основной) моды и $\eta(1\text{нч})$ для первой нечетной моды по формулам:

$$\eta = \left| \frac{w \cos(ua)}{w \operatorname{ch} [w(b-a) + v \operatorname{sh}(b-a)]} \right| - \text{для четных мод,} \quad (20a)$$

$$\eta = \left| \frac{w \sin(ua)}{w \operatorname{ch} [w(b-a) + v \operatorname{sh} [w(b-a)]]} \right| - \text{для нечетных мод.} \quad (20б)$$

Меньшему значению коэффициента $\eta = E(b)/E_{\max}$ соответствует бóльшая концентрация поля.

В настоящей работе не ставилось задачей подобрать оптимальные параметры n_1, n_2, n_3, a, b так, чтобы в заданном диапазоне длин волн λ волновод был одномодовым, обеспечивал высокую концентрацию поля в основной моде $\eta \ll 1$ и осуществлял эффективную фильтрацию паразитных (вытекающих) мод. Ставилось целью показать, какими изменениями параметров волновода можно корректировать его наиболее важные характеристики.

Из таблицы видно, что для обеих конфигураций концентрация поля возрастает с уменьшением длины волны излучения.

Для обеих конфигураций в зонах одномодового режима вытекающие моды, рассчитанные из дисперсионного уравнения (5б) для нечетных мод, имеют меньшие потери, чем вытекающие моды, рассчитанные из дисперсионного уравнения (5а) для четных мод. Причем их потери возрастают с увеличением длины волны λ по мере удаления от частоты отсечки первой нечетной моды (верхних границ затемненных зон, см. рис. 2, 4).

На примере второй конфигурации W-световода мы имеем наибольшую (из рассмотренных случаев) концентрацию поля $\eta \ll 0,01$ для основной моды на длине волны 1,55 мкм, а также достаточную степень фильтрации паразитной моды с наименьшей по модулю действительной частью поперечного волнового числа ν , полученного из дисперсионного уравнения (5а) для четных мод. Потери этой моды составляют $\alpha(\text{ч}) \approx 53$ дБ/м. Однако для вытекающей моды с наименьшей по модулю действительной частью поперечного волнового числа ν , рассчитанного из дисперсионного уравнения (5б) для нечетных мод, потери составляют всего $\alpha(\text{нч}) \approx 3$ дБ/м, что не позволяет обеспечить для неё эффективную фильтрацию и реализовать устойчивый одномодовый режим направляемой моды на $\lambda_1 = 1,55$ мкм. Малые потери вытекающей моды в данном случае связаны с тем, что в W-световоде с параметрами: $n_1 = 1,456, n_2 = 1,38, n_3 = 1,454, a = 9,5$ мкм, $b = 11$ мкм на длине 1,55 мкм мы находимся вблизи границы перехода из одномодового в двухмодовый режим. Изменение коэффициента преломления промежуточного слоя на $\Delta n_2 \approx 0,02$ приведет к возникновению нечетной моды дополнительно к основной мо-

де, в соответствии с сохранением общего числа корней дисперсионного уравнения [5].

Для первой конфигурации W-световода на длине волны 1,55 мкм мы имеем обратную ситуацию для потерь вытекающих мод по сравнению с ситуацией для второй конфигурации, рассмотренной выше. Меньшие потери $\alpha(\text{ч}) \approx 1,9 \times 10^3$ дБ/м имеет вытекающая мода с параметрами, вычисленными из дисперсионного уравнения (5а) для четных мод, по сравнению с потерями $\alpha(\text{нч}) \approx 6,0 \times 10^3$ дБ/м вытекающей моды с параметрами, вычисленными из дисперсионного уравнения (5б) для нечетных мод. Это связано с тем, что переход из двухмодового режима к трехмодовому приводит к возникновению второй четной моды.

Из данных, приведенных в таблице, видно, что наилучшими характеристиками в заданном диапазоне длин волн обладает W-световод, параметры которого подобраны так, чтобы нужный диапазон длин волн находился ближе к середине зоны выбранного режима работы.

Заключение

Получены результаты численного расчета волновых характеристик направляемых и вытекающих (паразитных) мод планарных W-световодов с различными параметрами.

Показано, что для получения устойчивого одномодового режима в нужном диапазоне длин волн необходимо подобрать параметры W-световода так, чтобы этот диапазон длин волн находился ближе к середине зоны выбранного режима работы. Важно при этом добиваться того, чтобы наименьшие потери вытекающих мод оставались достаточными для их эффективной фильтрации.

Для получения необходимой концентрации поля основной моды следует выбирать, по возможности, более контрастный профиль поперечного распределения показателя преломления W-световода. Подбором ширины $(b - a)$ и показателя преломления промежуточного слоя n_2 можно существенно расширить зону одномодового режима, оптимизировать размер основной моды.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Very high numerical aperture fibers / W.J. Wadsworth, R.M. Percival, G. Bouwmans, J.C. Knight, T.A. Birks, T.D. Hedley, P.St.J. Russell // *IEEE, Photonics Technology Letters*. – 2004. – Vol. 16. – № 3. – P. 843–845.
2. Отрохов С.Ю., Чаморовский Ю.К., Шатров А.Д. Вытекающие моды W-световодов с большой разностью в профиле показателя преломления // *Радиотехника и электроника*. – 2010. – Т. 55, № 10. – С. 1185–1192.
3. Отрохов С.Ю., Чаморовский Ю.К., Шатров А.Д. Основные характеристики мод и контрастность профиля показателя преломления W-световода // *Радиотехника и электроника*. – 2012. – Т. 57. – № 8. – С. 910–917.
4. Курбатов А.М., Курбатов Р.А. Новый оптический W-световод Panda для чувствительной катушки волоконно-оптического гироскопа // *Письма в ЖТФ*. – 2010. – Т. 36, вып. 17. – С. 23–29.
5. Отрохов С.Ю., Чаморовский Ю.К., Шатров А.Д. Характеристики мод планарных W-световодов с произвольной контрастностью профиля показателя преломления // *Оптический журнал*. – 2014. – Т. 81, № 1. – С. 59–65.
6. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 598 с.

References

1. Wadsworth W.J., Percival R.M., Bouwmans G., Knight J.C., Birks T.A., Hedley T.D., Russell P.St.J. Very high numerical aperture fibers. *IEEE, Photonics Technology Letters*, 2004, vol. 16, no. 3, pp. 843-845.
2. Otrokhov S.Iu., Chamorovskii Iu.K., Shatrov A.D. Vytakaiushchie mody W-svetovodov s bol'shoi raznost'iu v profile pokazatel'ia prelomleniia [Leaky modes of W-fibres with a large difference in the refractive index profile]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1185-1192.
3. Otrokhov S.Iu., Chamorovskii Iu.K., Shatrov A.D. Osnovnye kharakteristiki mod i kontrastnost' profil'ia pokazatel'ia prelomleniia W-svetovoda [Main Mode Characteristics and Contrast of the W-Film Refractive Index Profile]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2012, vol. 57, no. 8, pp. 910-917.

4. Kurbatov A.M., Kurbatov R.A. Novyi opticheskii W-svetovod Panda dlia chuvstvitel'noi katushki volokonno-opticheskogo gi-roskopa [New Panda optical W-light guide for sensing coil of fiber optic gyroscope]. *Pis'ma v ZhTF*, 2010, vol. 36, iss. 17, pp. 23-29.

5. Otrokhov S.Iu., Chamorovskii Iu.K., Shatrov A.D. Kharakteri-stiki mod planarnykh W-svetovodov s proizvol'noi kontrastnost'iu profilia pokazatel'ia prelomleniia [Mode Characteristics of Planar W-Fibres with Arbitrary Contrast of the Refractive Index Profile]. *Opticheskii zhurnal*, 2014, vol. 81, no. 1, pp. 59-65.

Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennye metody [Numerical Methods]. Moscow: Nauka, 1987, 598 p.