

# ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.372.8

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МОД ПЛАНАРНЫХ W-СВЕТОВОДОВ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНТРАСТНОСТЬЮ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

© 2014 г. С. Ю. Отрохов, канд. физ.-мат. наук; Ю. К. Чаморовский, канд. физ.-мат. наук; А. Д. Шатров, доктор физ.-мат. наук

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

E-mail: OSY@ms.ire.rssi.ru

На основе численного решения дисперсионного уравнения исследованы характеристики мод плоского пятислойного W-световода с различными значениями показателя преломления промежуточного слоя. Показано, что в W-световодах при соответствующем выборе геометрических и оптических параметров можно легко обеспечить одномодовый режим в широком диапазоне длин волн, необходимую концентрацию поля в световедущей жиле большого диаметра и эффективную фильтрацию вытекающих мод.

**Ключевые слова:** плоский пятислойный W-световод, дисперсионное уравнение, показатель преломления промежуточного слоя.

Коды OCIS: 060.2400, 130.2790, 230.7390.

Поступила в редакцию: 27.05.2013.

### Введение

Интерес к оптическим волноводам W-профиля в настоящее время [1–4] обусловлен перспективой их широкого применения в различных устройствах, где требуется обеспечить одномодовый режим в заданном диапазоне длин волн, большое сечение фундаментальной моды (и, как результат, меньшую плотность мощности излучения в сердцевине), а также малые оптические потери излучения на изгибе. Выполнение последнего условия возможно при надлежащем спаде (убывании) плотности излучения в промежуточном слое W-световода (между сердцевинной и внешней оболочкой).

Добиться перечисленного выше можно путем правильного выбора конструкции W-световода, зависящей, по меньшей мере, от пяти параметров: трех значений показателя преломления  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  ( $n_1 > n_3 > n_2$ ) и величин  $a$  и  $b$  (рис. 1). Причем для создания W-световода с требуемыми параметрами можно использовать широко распространенную техно-

логию MCVD, которая в современных условиях позволяет создать световод с заданной структурой и контрастностью профиля показателя преломления. Например, изготовить W-световод с увеличенной контрастностью, т.е. относительно большой ( $n_1 - n_2$ ) и в тоже время малой ( $n_1 - n_3$ ) разностями показателей преломления слоев при необходимой степени их контроля (на уровне порядка  $10^{-3}$  [1]).

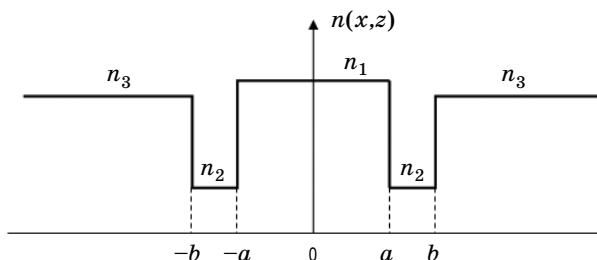


Рис. 1. Схематическая иллюстрация поперечного распределения показателя преломления в плоской пятислойной световедущей структуре.

Как следует из расчетов, именно при контрастной W-конфигурации легче соответствовать упомянутым выше требованиям.

Широко исследуемые в настоящее время фотонно-кристаллические волноводы (см., например обзор [5]), к которым относятся микроструктурированные световоды и световоды с брэгговской структурой, обладают богатым спектром свойств и в том числе позволяют получать направляемые моды большого диаметра (при этом размер сердцевины может составлять порядка  $40\lambda$  и более [6]). Однако они имеют все еще высокую чувствительность к изгибам и достаточно сложную технологию изготовления. В свою очередь W-световоды обладают меньшими возможностями по сравнению с фотонно-кристаллическими волноводами, но более простой и, следовательно, технологически менее сложной для изготовления структурой. К тому же в ряде случаев, где нежелательны появления нелинейно-оптических процессов либо, наоборот, необходимо увеличить их эффективность, а также, располагая перспективой, иметь невысокую чувствительность к изгибам, W-световоды могут оказаться намного эффективнее для некоторых применений [3], чем, по крайней мере, стандартные световоды со ступенчатым показателем преломления.

Данная работа посвящена исследованию основных характеристик мод в плоском пятислойном W-световоде в зависимости от контрастности профиля показателя преломления. Для численного расчета и построения графиков частично будут использованы результаты, полученные авторами в работе [2].

## Теория

Предполагается (см. рис. 1), что заданы величины  $n_1, n_2, n_3$ , а также  $a$  и  $b$  (в мкм) и выполнено условие

$$n_1 > n_3 > n_2. \quad (1)$$

Единственная компонента ( $\partial/\partial y = 0$ ) электрического поля TE-моды имеет вид

$$E_y = E(x)\exp(-i\beta z) \quad (2)$$

и удовлетворяет волновому уравнению

$$\frac{d^2 E(x)}{dx^2} + (k^2 n^2(x) - \beta^2) E(x) = 0, \quad (3)$$

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

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 (3) и дисперсионное уравнение для нахождения волновых чисел мод можно представить, соответственно, в виде выражений (4) и (6)

$$E(x) = \begin{cases} A \left[ 1 + \frac{w-v}{w+v} \exp[-2w(b-a)] \right] f(x) & 0 \leq x \leq a, \\ A \left[ 1 + \frac{w-v}{w+v} \exp[-2w(b-x)] \right] \exp[-w(x-a)] & a \leq x \leq b, \\ A \left[ 1 + \frac{w-v}{w+v} \right] \exp[-w(b-a)] \exp[-v(x-b)] & x \geq b \end{cases}, \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} u^2 &= k^2 n_1^2 - \beta^2, \\ w^2 &= \beta^2 - k^2 n_2^2, \\ v^2 &= \beta^2 - k^2 n_3^2, \end{aligned} \quad (5)$$

$$F(v) = wC \cos(ua) - uD \sin(ua) = 0$$

– для четных мод, (6a)

$$F(v) = wC \sin(ua) + uD \cos(ua) = 0$$

– для нечетных мод. (6b)

Здесь

$$\begin{aligned} C &= v \operatorname{ch}[w(b-a)] + w \operatorname{sh}[w(b-a)], \\ D &= w \operatorname{ch}[w(b-a)] + v \operatorname{sh}[w(b-a)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Внутренние поперечные волновые числа  $u$  и  $w$ , входящие в выражения (4), (6) и (7), следует рассматривать как функции переменной  $v$  (внешнего поперечного волнового числа  $v$ ), которые определяются по формулам

$$\begin{aligned} u^2 &= -v^2 + k^2(n_1^2 - n_3^2), \\ w^2 &= v^2 + k^2(n_3^2 - n_2^2), \end{aligned} \quad (8)$$

вытекающим из выражений (5).

Корни уравнения (6) целесообразно вычислять методом Ньютона [7]

$$v_{m+1} = v_m - \frac{F(v_m)}{F'(v_m)}. \quad (9)$$

Из формул (8) следует, что

$$\frac{dw}{dv} = \frac{v}{w}, \quad \frac{du}{dv} = -\frac{v}{u}. \quad (10)$$

Используя соотношения (10), из (6) и (7) получим явное выражение для производной от функции  $F(v)$

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

– для четных мод, (11a)

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

– для нечетных мод. (11б)

### Результаты расчетов

Напомним, что незатухающим направляемым волнам соответствуют действительные положительные значения величин  $u$ ,  $w$ , и  $v$ , которые находятся из решения дисперсионного уравнения (6) с учетом формул (8). Комплексные корни  $v = v' + iv''$  того же уравнения (6) с отрицательной действительной частью  $v' < 0$  соответствуют вытекающим волнам, потери которых рассчитываются по формуле

$$\alpha = 20 \lg(e) \times 10^6 \beta'' \text{ дБ/м}, \quad (12)$$

где  $\beta''$  подставляется численно в  $\text{мкм}^{-1}$ . И, наконец, при  $v = 0$  дисперсионное уравнение (6) переходит в уравнение для определения критических частот W-световода [2]

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

– для четных мод, (13a)

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

– для нечетных мод. (13б)

Очевидно, что параметрами, определяющими характерные свойства W-световода, являются коэффициент преломления промежуточного слоя  $n_2$  и его ширина  $(b - a)$ .

Используя соотношения (13a) и (13б) найдем границы одномодового и двухмодового режимов некоторых конфигураций W-световодов. На рис. 2a представлены расчетная зависимость частоты отсечки фундаментальной моды (нижняя граница затемненной зоны), зависимости 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 ( $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,453$ ,  $a = 9,5$  мкм,  $b = 10$  мкм). Точки, лежащие в затемненной зоне, отвечают одномодовому режиму, причем в интервале  $1,395 < n_2 < n_3$  имеем одномодовый режим с нулевой отсечкой основной моды, а на границе интервала (в данном случае при  $n_2 = 1,395$ ) указанный режим реализуется в максимальном диапазоне частот. Прямая, параллельная оси абсцисс на уровне  $\omega/c \approx 4,054$   $\text{мкм}^{-1}$ , соответствует излучению с длиной волны  $\lambda = 1,55$  мкм. Как видно из рисунка, на этой длине волны в широком диапазоне изменения коэффициента преломления ( $1 < n_2 < 1,445$ ) данный W-световод является двухмодовым, а при  $1,445 < n_2 < n_3$  становится трехмодовым.

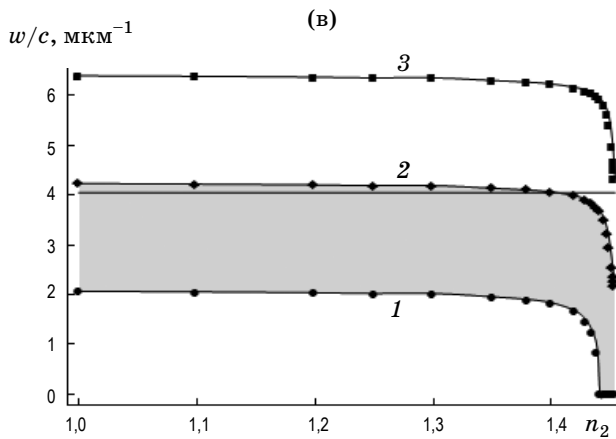
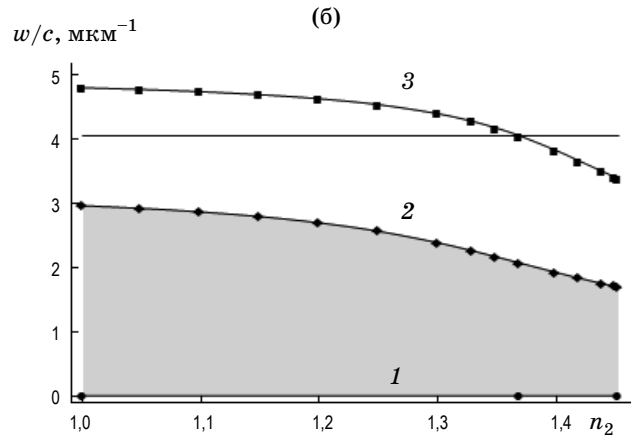
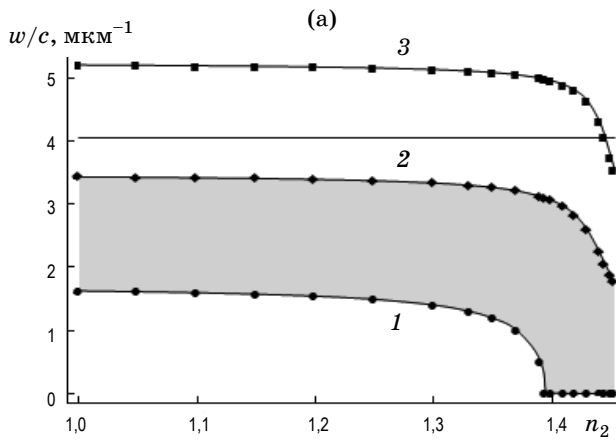
Изменим ширину промежуточного слоя рассматриваемого световода, причем сделаем это так, чтобы выполнилось условие, при котором частота отсечки основной моды оставалась бы нулевой на всем интервале изменения  $n_2$  ( $1 \leq n_2 \leq n_3$ ). Для этого воспользуемся неравенством, вытекающим из требования, чтобы правая часть выражения (13a) была больше или равна левой части при сколь угодно малом значении  $k$

$$a \geq (b - a) \frac{n_3^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_3^2}. \quad (14)$$

Очевидно, что если неравенство (14) выполняется для некоторого значения  $n_2$ , то оно тем более выполняется для больших значений:  $n_2 \leq n_2 \leq n_3$ . Перепишем неравенство (14) в виде

$$a \geq b \frac{n_3^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}. \quad (15)$$

Из неравенства (15) следует, что при  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,453$ ,  $b = 10$  мкм,  $n_2 = 1$  параметр  $a$  (полуширина световедущей жилы) должен иметь значение порядка  $9,922$   $\text{мкм} \leq a \leq b$ . Пусть  $a = 9,93$  мкм, тогда границы одномодового режима W-световода принимают вид,



**Рис. 2.** Частоты отсечки основной (1), первой нечетной (2) и второй четной (3) мод W-световода с параметрами  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,453$ ,  $a = 9,5$  мкм,  $b = 10$  мкм (а);  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,453$ ,  $a = 9,93$  мкм,  $b = 10$  мкм (б);  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,454$ ,  $a = 9,5$  мкм,  $b = 11$  мкм (в) в зависимости от коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2$  ( $1 \leq n_2 \leq n_3$ ).

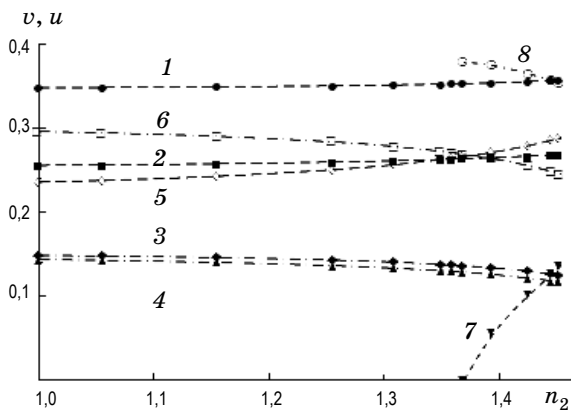
приведенный на рис. 2б. Как и ожидалось, получился световод с нулевой отсечкой основной моды на всем интервале  $1 \leq n_2 \leq n_3$ . На длине волны 1,55 мкм в диапазоне  $1 < n_2 < 1,369$  данный W-световод является двухмодовым, а при  $1,369 < n_2 < n_3$  становится трехмодовым. На длине волны 2 мкм ( $\omega/c \approx 3,14$  мкм<sup>-1</sup>) он остается двухмодовым во всем интервале  $1 \leq n_2 \leq n_3$ .

Нетрудно подобрать параметры волноводной структуры таким образом, чтобы она оказалась одномодовой для излучения на определенной длине волны, например, 1,55 мкм. Из представленного на рис. 2в расчета зон одномодового и двухмодового режимов W-световода с параметрами  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,454$ ,  $a = 9,5$  мкм,  $b = 11$  мкм 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.

Для определенности рассмотрим W-световод с редуцированным промежуточным слоем ( $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,453$ ,  $a = 9,93$  мкм,  $b = 10$  мкм). Такая структура, очевидно, не оптимальна, но удобна для представления результатов расчета характеристик мод во всем диапазоне измене-

ния коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2$  ( $1 \leq n_2 \leq n_3$ ). Вид получаемых зависимостей будет иметь общий характер для любых плоских W-световодов.

Прежде всего, воспользуемся дисперсионными уравнениями (6а) и (6б) для расчета поперечных волновых чисел  $u$ ,  $w$ , и  $v$ , определяющих поперечное распределение поля (4) направляемых (незатухающих) мод, соответственно, во внутреннем, промежуточном и внешнем слоях волновода, а также постоянную распространения  $\beta$  (5). На рис. 3 представлены зависимости внешнего поперечного числа  $v$  ( $\lambda = 1,55$  (кривая 1), 2 мкм (кривая 2)) и внутреннего поперечного числа  $u$  ( $\lambda = 1,55$  (кривая 3), 2 мкм (кривая 4)) основной моды, а также внешнего  $v$  ( $\lambda = 1,55$  мкм (кривая 5)) и внутреннего  $u$  ( $\lambda = 1,55$  мкм (кривая 6)) поперечных волновых чисел первой нечетной моды от параметра  $n_2$ . Как  $v$ , так и  $u$  незначительно изменяются во всем интервале  $1 \leq n_2 \leq n_3$ , кроме того, внутреннее волновое число  $u$  по сравнению с внешним волновым числом  $v$  слабо зависит от длины волны. Однако, такая зависимость волновых чисел характерна для мод вдали



**Рис. 3.** Зависимости внешнего поперечного волнового числа  $v$  основной моды ( $\lambda = 1,55$  (1), 2 мкм (2)) и ее внутреннего поперечного волнового числа  $u$  ( $\lambda = 1,55$  (3), 2 мкм (4)), а также внешнего и внутреннего волновых чисел первой нечетной ( $\lambda = 1,55$  мкм (5), (6)) и второй четной ( $\lambda = 1,55$  мкм (7), (8)) мод W-световода с параметрами  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,453$ ,  $a = 9,93$  мкм,  $b = 10$  мкм от коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2$ .

от их отсечки. Вблизи нее эта зависимость проявляется весьма заметно. Так при  $n_2 = 1,369$  на длине волны 1,55 мкм возникает вторая четная мода. Значения внешнего и внутреннего волновых чисел второй четной моды в интервале  $1,369 \leq n_2 \leq n_3$  теперь образуют кривые 7 и 8 соответственно, демонстрируя более крутой характер изменения.

Результат расчета промежуточного поперечного волнового числа  $w$  основной моды ( $\lambda = 1,55$  (кривая 1), 2 мкм (кривая 2)) и второй четной моды ( $\lambda = 1,55$  мкм (кривая 3)), приведенный на рис. 4, указывает на сильную зависимость  $w$  (по сравнению с  $v$  и  $u$ , см. рис. 3) от коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2$  и длины волны излучения. Зависимость  $w$  от  $n_2$  для первой нечетной моды на длине волны 1,55 мкм практически совпадает с аналогичной зависимостью для основной моды ( $w_{\text{even}} - w_{\text{odd}}/w \approx 0,01$ ) и поэтому не приводится.

Как видно из рис. 5, уменьшение  $n_2$  (усиление контрастности профиля показателя преломления волновода) увеличивает концентрацию поля в световедущем слое, что в свою очередь существенно снижает потери на изгибе в W-световодах по сравнению со стандартными ступенчатыми световодами. Причем, концентрация поля основной моды на длине волны 1,55 мкм (кривая 1) превышает аналогичную на  $\lambda = 2$  мкм (кривая 2). Ход зависимости

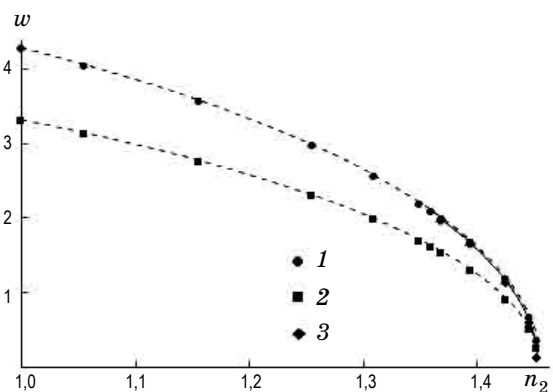
концентрации поля первой нечетной моды на  $\lambda = 1,55$  мкм имеет похожий характер (кривая 3). Степень концентрации поля оценивалась коэффициентом  $\eta = E(b)/E_{\text{max}}$  (меньшему значению коэффициента соответствует большая концентрация поля) [2]

$$\eta = \left| \frac{w \cos(ua)}{w \operatorname{ch}[w(b-a)] + v \operatorname{ch}[w(b-a)]} \right|$$

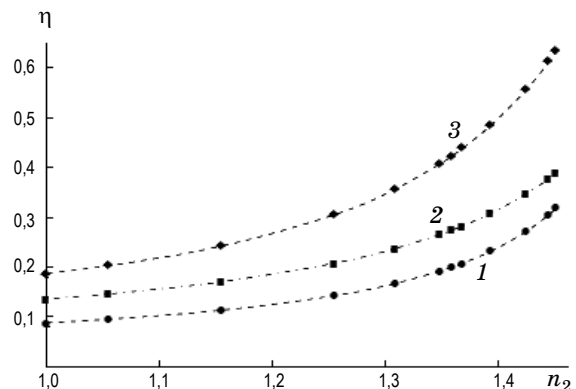
– для четных мод, (16а)

$$\eta = \left| \frac{w \sin(ua)}{w \operatorname{ch}[w(b-a)] + v \operatorname{ch}[w(b-a)]} \right|$$

– для нечетных мод. (16б)



**Рис. 4.** Зависимости промежуточного поперечного волнового числа  $w$  основной моды ( $\lambda = 1,55$  (1), 2 мкм (2)), а также промежуточного волнового числа второй четной моды ( $\lambda = 1,55$  мкм (3)) W-световода с параметрами  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,453$ ,  $a = 9,93$  мкм,  $b = 10$  мкм от коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2$ .



**Рис. 5.** Степень концентрации поля основной моды ( $\lambda = 1,55$  (1), 2 мкм (2)) и первой нечетной моды ( $\lambda = 1,55$  (3)), рассматриваемого W-световода, от коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2$ .

Заметную роль в W-световоде играют вытекающие моды. Таким модам, как отмечалось выше, соответствуют комплексные корни дисперсионных уравнений (6а) и (6б) внешних поперечных волновых чисел  $v = v' + iv''$ , определяющих мнимую часть постоянной распространения

$$\beta = \beta' - i\beta'' = \sqrt{k^2 n_3^2 + v^2} \quad (17)$$

и, в конечном счете, потери на излучение (12). Распределение корней на комплексной плоскости имеет лепестковую структуру рис. 6а [2], причем минимальными потерями обладают вытекающие моды с наименьшей мнимой частью  $|\beta''|$ . Поэтому для реализации устойчивого режима направляемых мод параметры W-световода необходимо подбирать так, чтобы обеспечивалась эффективная фильтрация вытекающих (паразитных) мод, обладающих минимальными потерями. Для этого полезно проследить за поведением волновых чисел  $v$

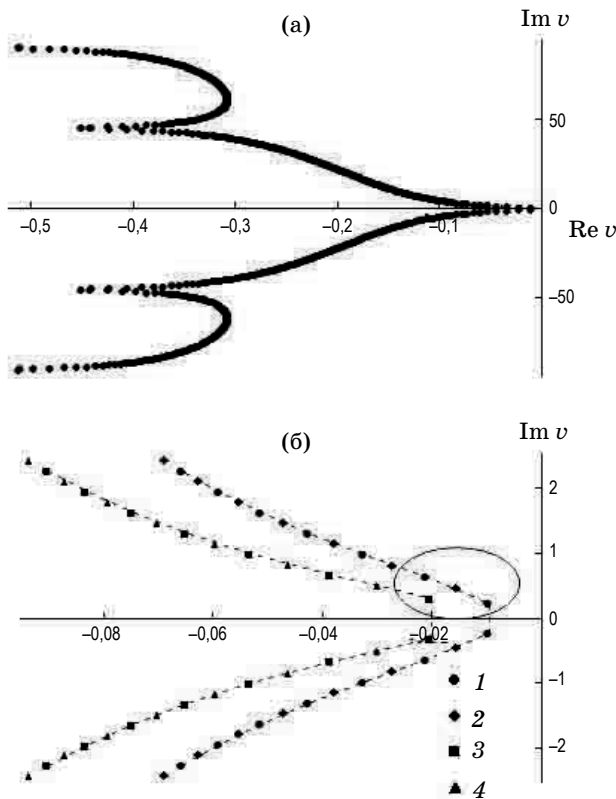


Рис. 6. Расчетные значения внешнего поперечного волнового числа  $v$  вытекающих мод ( $\lambda = 1,55$  мкм), вычисленные в диапазоне  $|v''| < 90$  (а), и первых четырнадцати (наименьших по модулю) значений  $v$  ( $\lambda = 1,55$  (1, 2), 2 мкм (3, 4)) (б) рассматриваемого W-световода при  $n_2 = 1$ .

указанных мод при изменении коэффициента преломления промежуточного слоя. Первые четырнадцать значений внешнего поперечного волнового числа  $v$  (кривые 1, 2) для вытекающих мод на  $\lambda = 1,55$  мкм и столько же значений  $v$  (кривые 3, 4) на  $\lambda = 2$  мкм, вычисленные при  $n_2 = 1$ , приведены на рис. 6б. Корни (кривые 1, 3) являются решениями дисперсионного уравнения (6а) для четных мод, а корни (кривые 2, 4) – решениями дисперсионного уравнения (6б) для нечетных мод. Отвечающие минимальным потерям корни (первые три – для вытекающих мод на длине волны 1,55 мкм (1) и один для вытекающей моды на длине волны 2 мкм (2)) выделены эллипсом. Их зависимости от коэффициента преломления промежуточного слоя показаны на рис. 7. Из рисунка видно, что при возрастании  $n_2$  (понижении контрастности профиля показателя преломления) мнимые значения корней  $|v''|$  уменьшаются. Более того, при определенном значении коэффициента преломления (в данном случае при  $n_2 \approx 1,36$ ) мнимая часть волнового числа вытекающей моды с минимальными потерями на  $\lambda = 1,55$  мкм становится равной нулю ( $v = -0,0625$ , точка 7). Положение точки 7 находится из решения системы уравнений (18)

$$\begin{cases} F(v, n_2) = 0 \\ F'(v, n_2) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Дальнейшее увеличение коэффициента преломления промежуточного слоя на  $\Delta n_2 \approx 0,01$

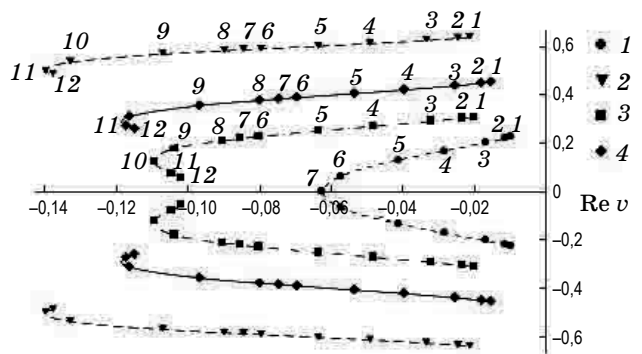


Рис. 7. Зависимость отмеченных на рис. 6 трех (наименьших по модулю) корней дисперсионного уравнения ( $\lambda = 1,55$  мкм (1–3)) и одного (наименьшего по модулю) корня ( $\lambda = 2$  мкм (4)) от значений коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2 = 1$  (1), 1,056 (2), 1,156 (3), 1,256 (4), 1,31 (5), 1,35 (6), 1,36 (7), 1,37 (8), 1,39 (9), 1,426 (10), 1,446 (11), 1,453 (12).

приводит к появлению на длине волны 1,55 мкм второй четной моды  $n_2 \approx 1,37$ ,  $\nu = 0$  (см. рис 3, кривые 7, 8).

Из сказанного выше следует, что в W-световоде с достаточно контрастным профилем показателя преломления можно обеспечить высокую степень концентрации направляемой моды и эффективную фильтрацию вытекающих мод в заданном диапазоне длин волн. Например, для структуры  $n_1 = 1,456$ ,  $n_3 = 1,454$ ,  $a = 9,5$  мкм,  $b = 11$  мкм при  $n_2 = 1,38$  – степень концентрации поля в основной моде на длине волны 1,55 мкм имеет значение  $\eta \approx 0,009$ , а затухание вытекающей моды с наименьшими потерями составляет  $\alpha \approx 54$  дБ/м.

При этом, значение коэффициента преломления промежуточного слоя  $n_2$  не должно превышать критического значения  $n_{2k}$ , при котором потери вытекающей моды на рабочей частоте становятся пренебрежимо малыми.

Отметим, что распределение поля во внешнем слое волновода резко изменяется, когда значение  $n_2$  превышает критическое значение  $n_{2k}$ , но остается меньше значения, при котором возникает новая мода:  $n_{2k} \leq n_2 \leq n_{2k} + \Delta n_2$  (в рассматриваемом случае  $\Delta n_2 \approx 0,01$ ), что может быть использовано при разработке волно-

водных ответвителей и электрооптических модуляторов.

Размер интервала  $\Delta n_2$  зависит как от частоты излучения, так и от геометрических и оптических параметров W-световода, например, в зоне двухмодового режима на рис. 2а на длине волны 1,55 мкм он имеет значение  $\Delta n_2 \approx 0,001$ .

## Заключение

В рамках плоской пятислойной модели получено и проанализировано соотношение модовой дисперсии W-световода в широком диапазоне изменения его параметров. В частности, достаточно подробно было исследовано поведение направляемых и вытекающих мод при изменении контрастности профиля показателя преломления.

Показано, что в широком наборе параметров, определяющих свойства W-световода, особую роль играет ширина и показатель преломления промежуточного слоя. Подбором подходящих значений именно этих параметров можно существенно расширить зону одномодового режима, оптимизировать размер основной моды, добиться высокой концентрации поля и, как следствие, получить малые изгибные потери излучения.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

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. V. 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. 118–1192.
3. Курбатов А.М., Курбатов Р.А. Новый оптический W-световод Panda для чувствительной катушки волоконно-оптического гироскопа // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 17. С. 23–29.
4. Курбатов А.М., Курбатов Р.А. Волоконный поляризатор на основе W-световода // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 13. С. 70–77.
5. Скибина Ю.С., Тучин В.В., Белоглазов В.И., Штейнмайер Г., Бетге Й.Л., Веделль Р., Лангхофф Н. Фотонно-кристаллические волноводы в биометрических исследованиях (обзор) // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 4. С. 284–301.
6. Лихачев М.Е., Семенов С.Л., Бубнов М.М., Дианов Е.М., Хопин В.Ф., Салганский М.Ю., Гурьянов М.А., Жамие Р., Виале П., Февриер С., Блонди Д.-М. Разработка и исследование брэгговских световодов с большим размером поля моды и малыми оптическими потерями // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 7. С. 581–586.
7. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.