

Переходные зоны в планарных W-световодах

© С.Ю. Отрохов

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
141190 Фрязино, Московская обл., Россия
e-mail: osy@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 31.01.2019 г.
В окончательной редакции 25.06.2019 г.
Принята к публикации 08.07.2018 г.

На основе численного решения дисперсионного уравнения исследованы переходные зоны на границах одномодового и двухмодового режимов для некоторых конфигураций планарных W-световодов. Показано, что размеры рассмотренных переходных зон на частотах отсечки основной, первой нечетной и второй четной мод существенно зависят от геометрических и оптических параметров W-световодов. Указанные обстоятельства важно учитывать при подборе параметров W-световодов с тем, чтобы обеспечить в них устойчивый одномодовый или многомодовый режим, необходимую концентрацию поля и эффективную фильтрацию вытекающих мод.

Ключевые слова: плоский пятислойный W-световод, дисперсионное уравнение, частота отсечки, переходная зона, коэффициент преломления промежуточного слоя, внешнее поперечное волновое число, вытекающие моды.

DOI: 10.21883/OS.2019.12.48703.37-19

Введение

Интерес к исследованию свойств W-световодов связан с тем, что они по ряду характеристик намного эффективнее, чем по крайней мере стандартные световоды со ступенчатым показателем преломления. В таких световодах можно обеспечить одномодовый режим при большом сечении фундаментальной моды и малых оптических потерях излучения на изгибе [1–3].

Световедущая структура плоского 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 , определяющих ширину слоев волновода (рис. 1).

Подбором именно этих параметров при необходимой степени контроля показателей преломления слоев (на уровне $\sim 10^{-3}$ [1]) и точности ширины слоев (на уровне $\sim 10^{-2} \mu\text{m}$) можно существенно расширить зону одномодового режима, оптимизировать размер основной моды, добиться высокой концентрации поля [3–5]. Однако переходные зоны [4] от одного режима излучения к другому, например, от одномодового к двухмодовому

в зависимости от параметров волновода пока мало исследованы.

Целью настоящей работы является определение границ переходной зоны в W-световодах; а именно переходной зоны из режима вытекающих мод к одномодовому режиму на частоте отсечки основной моды, от одномодового режима к двухмодовому на частоте отсечки первой нечетной моды и от двухмодового режима к трехмодовому на частоте отсечки второй четной моды при всех допустимых значениях коэффициента преломления промежуточного слоя $1 \leq n_2 \leq n_3$.

Структура плоского пятислойного W-световода может служить моделью круглого трехслойного световода. Расчет плоских световодов много проще расчетов световода с круглым сечением, хотя физика явлений в них одна и та же.

Для численного расчета и построения графиков частично будут использованы результаты, полученные в работах [4,5].

Теория

Дисперсионные уравнения для нахождения волновых чисел мод плоского W-световода имеют вид [4,5]

$$F(v) = wC \cos(ua) - uD \sin(ua) = 0 \text{ — для четных мод,} \quad (1a)$$

$$F(v) = wC \sin(ua) + uD \cos(ua) = 0 \text{ — для нечетных мод.} \quad (1b)$$

Здесь

$$C = vch[w(b-a)] + vsh[w(b-a)],$$

$$D = wch[w(b-a)] + vsh[w(b-a)], \quad (2)$$

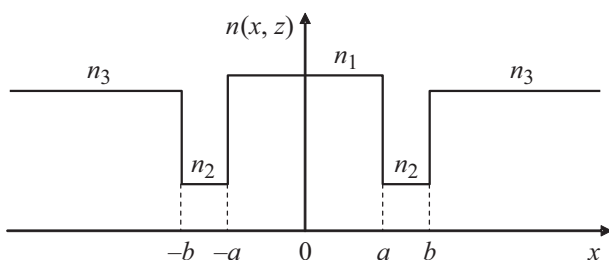


Рис. 1. Схема поперечного распределения показателя преломления в плоской пятислойной световедущей структуре.

u, w, v — поперечные волновые числа (определяют поперечное распределение поля в волноводе)

$$\begin{aligned} u^2 &= k^2 n_1^2 - \beta^2, \\ w^2 &= \beta^2 - k^2 n_2^2, \\ v^2 &= \beta^2 - k^2 n_3^2, \end{aligned} \tag{3}$$

$k = \omega/c, \beta = \beta' - i\beta''$ — постоянная распространения моды, мнимая часть которой определяет потери вытекающей моды:

$$\alpha = 20 \lg(e) \cdot 10^6 \beta'' \text{ dB/m.} \tag{4}$$

Здесь величина β'' имеет размерность μm^{-1} .

Внутреннее поперечное волновое число u , промежуточное поперечное волновое число w и постоянную распространения β , входящие в выражения (1)–(3), удобно рассматривать как функции переменной внешнего поперечного волнового числа v , которые определяются с учетом (3) по формулам

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

Корни дисперсионного уравнения (1) удобно вычислять методом Ньютона [6]

$$v_{m+1} = v_m - \frac{F(v_m)}{F'(v_m)}. \tag{6}$$

Из соотношений (5) легко получить, что

$$\frac{dw}{dv} = \frac{v}{w}, \quad \frac{du}{dv} = -\frac{v}{u}. \tag{7}$$

Принимая во внимание (1), (2) и (7), получим выражение для производной от функции $F(v)$

$$\begin{aligned} F'(v) &= C \left\{ \frac{v}{w} \cos(ua) + \left[\frac{v(w^2 + u^2)}{uw} a - \frac{u}{w} (1 + bv) \right] \right. \\ &\quad \left. \times \sin(ua) \right\} + D \left\{ (1 + bv) \cos(ua) + \frac{v}{u} \sin(ua) \right\} \\ &\text{— для четных мод,} \end{aligned} \tag{8a}$$

$$\begin{aligned} F'(v) &= C \left\{ \frac{v}{w} \sin(ua) - \left[\frac{v(w^2 + u^2)}{uw} a - \frac{u}{w} (1 + bv) \right] \right. \\ &\quad \left. \times \cos(ua) \right\} + D \left\{ (1 + bv) \sin(ua) - \frac{v}{u} \cos(ua) \right\} \\ &\text{— для нечетных мод.} \end{aligned} \tag{8b}$$

Необходимые выражения для расчета частоты отсечки u четных и нечетных мод в W -световоде находятся при $v = 0$ из (1). С учетом (2) и (5) получим

$$\frac{\sqrt{n_3^2 - n_2^2}}{\sqrt{n_1^2 - n_3^2}} \text{th} \left[k \sqrt{n_3^2 - n_2^2} (b - a) \right] = \text{tg} \left[ka \sqrt{n_1^2 - n_3^2} \right] \tag{9a}$$

— для четных мод,

$$\frac{\sqrt{n_3^2 - n_2^2}}{\sqrt{n_1^2 - n_3^2}} \text{th} \left[k \sqrt{n_3^2 - n_2^2} (b - a) \right] = -\text{ctg} \left[ka \sqrt{n_1^2 - n_3^2} \right] \tag{9b}$$

— для нечетных мод.

Результаты численных расчетов

Напомним, что направляемым, незатухающим волнам соответствуют вещественные корни уравнения (1), обладающие свойством $v > 0$. Вытекающим волнам соответствуют комплексные корни $v = v' + iv''$, для которых $v' < 0$.

В работе [4] с использованием (9a) и (9b) были рассчитаны границы одномодового и двухмодового режимов для некоторых конфигураций W -световодов. Кроме этого, при анализе поведения вытекающих мод с минимальными потерями было отмечено, что при возрастании коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 (понижения контрастности профиля показателя преломления) мнимые значения $|v''|$ уменьшаются. Более того, при определенном критическом значении коэффициента преломления n_{2k} мнимая часть волнового числа вытекающей моды становится равной нулю, а следовательно, и мнимая часть постоянной распространения $\beta = \beta' - i\beta'' = \sqrt{k^2 n_3^2 + v^2}$, отвечающая за потери, становится пренебрежимо малой.

Для наглядности представления результатов расчетов первоначально рассмотрим W -световод с редуцированным промежуточным слоем ($n_1 = 1.456, n_3 = 1.453, a = 9.93 \mu\text{m}, b = 10 \mu\text{m}$). Как отмечалось в [4], такая структура, очевидно, не оптимальна, более того, технологически промежуточный слой с толщиной $(b - a) = 70 \text{ nm}$ при современной технологии изготовления световодов (MCVD) не может быть встроен в структуру световода без существенных нарушений. Однако такая структура удобна для графического представления рассчитанных характеристик мод во всем диапазоне изменения коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$). Вид получаемых зависимостей имеет общий характер для любых плоских W -световодов.

На рис. 2 представлены зависимости расчетных значений четырех внешних поперечных волновых чисел вытекающих мод с наименьшими потерями для W -световода

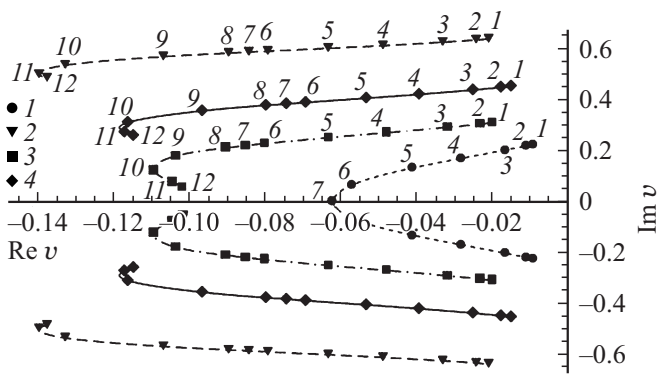


Рис. 2. Зависимость комплексных корней дисперсионного уравнения (трех наименьших по модулю на длине волны $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ (1), (2), (4) и одного на длине волны $\lambda = 2 \mu\text{m}$ (3) от значений коэффициента преломления промежуточного слоя $n_2 = 1$ (1), 1.056 (2), 1.156 (3), 1.256 (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).

с параметрами $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, $a = 9.93 \mu\text{m}$, $b = 10 \mu\text{m}$ во всем диапазоне изменения коэффициента преломления промежуточного слоя $1 \leq n_2 \leq n_3$.

Корни (кривые 1–3) являются решениями дисперсионного уравнения (1а) для четных мод, а корни (кривая 4) решениями дисперсионного уравнения для нечетных мод (1б). При $n_2 \approx 1.36$ мнимая часть волнового числа вытекающей моды с минимальными потерями на $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ становится равной нулю ($v = -0.0625$, точка 7).

Дисперсионное уравнение (1) трансцендентное с несимметричными корнями относительно нуля действительной оси. Положение точки 7 на действительной оси соответствует дважды вырожденному корню уравнения (1) и находится из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} F(v, n_2) = 0, \\ F'(v, n_2) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

В данном случае, как указано выше, при расчете точки 7 использованы выражения $F(v, n_2)$ и $F'(v, n_2)$ для четных мод. Именно эта вытекающая мода в силу сохранения общего числа корней дисперсионного уравнения станет второй четной модой трехмодового режима.

Если параметры W-световода выбраны так, что на данной длине волны значение коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 удовлетворяет системе уравнений (10), то будем считать, что он находится в состоянии у нижней границы переходной зоны n_{2k} .

В рассматриваемом случае дальнейшее увеличение коэффициента преломления промежуточного слоя на $\Delta n_2 \approx 0.01$ переводит W-световод в режим отсечки второй четной моды (появлению на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ второй четной моды с $v = 0$).

Таким образом, естественно считать, что W-световод с выбранными параметрами на данной длине волны

находится у верхней границы переходной зоны, если значение n_2 удовлетворяет одному из уравнений (9).

Используя соотношения (9а) и (9б), найдем границы одномодового и двухмодового режимов (верхние границы переходных зон), а также нижние границы переходных зон из решения системы уравнений (10) с использованием (1а), (1б) и (8а), (8б). Для наглядности зоны одномодового режима на рисунках будем выделять затемнением.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости частоты отсечки первой нечетной моды (верхняя граница затемненной зоны, кривая 2) и частоты отсечки второй четной моды (кривая 3), а также расчетные зависимости нижних границ переходных зон (кривые 4 и 5) от коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$) для W-световода с фиксированными значениями параметров ($n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, $a = 9.93 \mu\text{m}$, $b = 10 \mu\text{m}$). Прямая (6) —

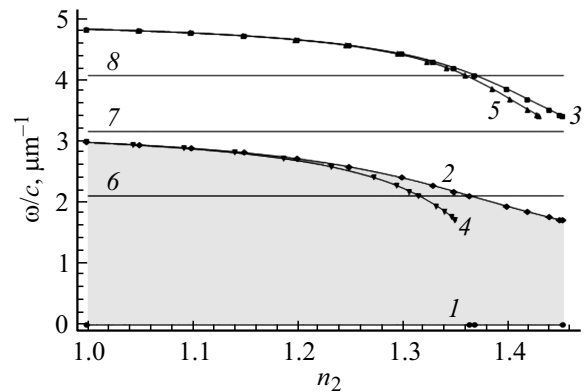


Рис. 3. Частоты отсечки основной (1), первой нечетной (2) и второй четной (3) мод W-световода с параметрами $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, $a = 9.93 \mu\text{m}$, $b = 10 \mu\text{m}$, а также нижние границы переходных зон (кривые 4 и 5) в зависимости от коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$).

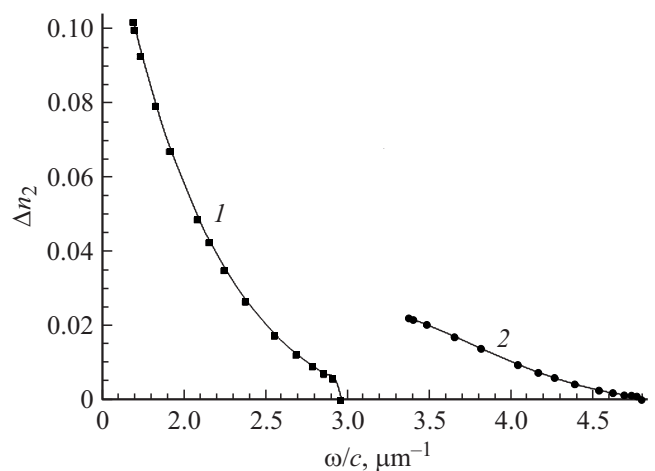


Рис. 4. Зависимость ширины переходной зоны из одномодового режима в двухмодовый (1), из двухмодового в трехмодовый (2) от частоты излучения ω/c для W-световода с параметрами $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, $a = 9.93 \mu\text{m}$, $b = 10 \mu\text{m}$.

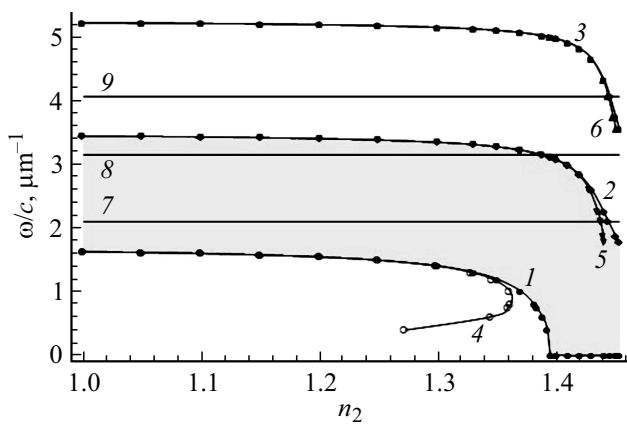


Рис. 5. Частоты отсечки основной (1), первой нечетной (2) и второй четной (3) мод *W*-световода с параметрами $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, $a = 9.5 \mu\text{m}$, $b = 10 \mu\text{m}$, а также нижние границы переходных зон (кривые 4, 5 и 6) в зависимости от коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$).

параллельная оси абсцисс на уровне $\omega/c \approx 2.094 \mu\text{m}^{-1}$, соответствует излучению с длиной волны $\lambda = 3 \mu\text{m}$;

прямая (7) на уровне $\omega/c \approx 3.14 \mu\text{m}^{-1}$ соответствует излучению с длиной волны $\lambda = 2 \mu\text{m}$; прямая (8) на уровне $\omega/c \approx 4.054 \mu\text{m}^{-1}$ соответствует длине волны $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

W-световод с такими параметрами имеет нулевую отсечку основной моды на всем интервале ($1 \leq n_2 \leq n_3$). На длине волны $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ширина переходной зоны составляет $\Delta n_2 \approx 0.0095$, а на длине волны $\lambda = 3 \mu\text{m}$ $\Delta n_2 \approx 0.0487$. На длине волны $\lambda = 2 \mu\text{m}$ он остается двухмодовым во всем интервале $1 \leq n_2 \leq n_3$.

На рис. 4 наглядно показано, что ширина переходных зон $\Delta n_2 = n_{2cutoff} - n_{2k}$ существенно зависит от частоты излучения и может существенно возрастать с увеличением длины волны.

Рассмотрим *W*-световод с фиксированными значениями параметров: $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, $a = 9.5 \mu\text{m}$, $b = 10 \mu\text{m}$ и переменным значением n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$) [5].

На рис. 5 представлены (рассчитанные по формулам (9)) зависимость частоты отсечки основной моды (нижняя граница затемненной зоны), частоты отсечки первой нечетной моды (верхняя граница затемненной зоны) и зависимость частоты отсечки второй четной моды (верхняя кривая), а также полученные из решений

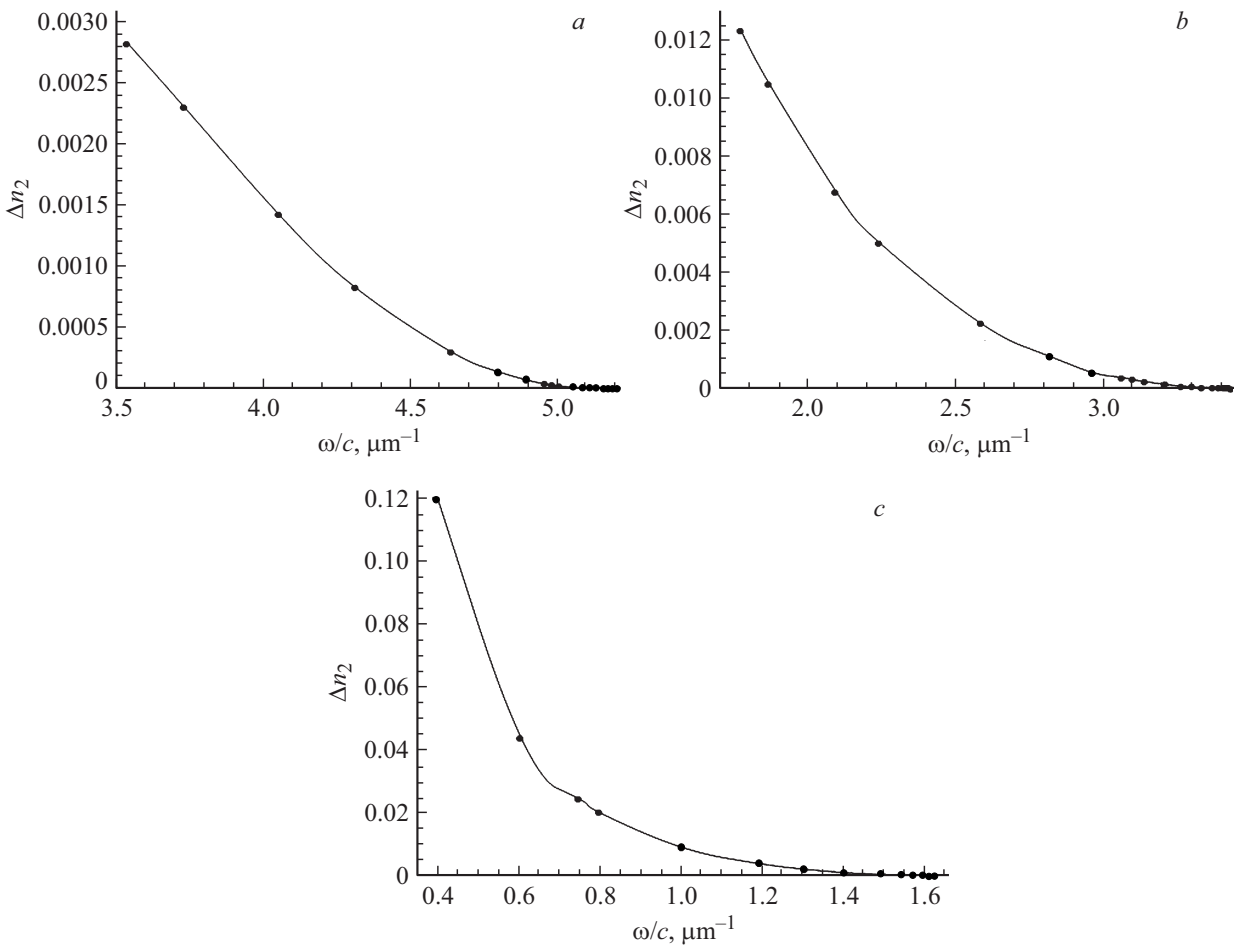


Рис. 6. Зависимость ширины переходной зоны из двухмодового режима в трехмодовый (а); из одномодового режима в двухмодовый (b); из режима вытекающих мод в одномодовый (c) от частоты излучения ω/c для *W*-световода с параметрами $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.453$, $a = 9.5 \mu\text{m}$, $b = 10 \mu\text{m}$.

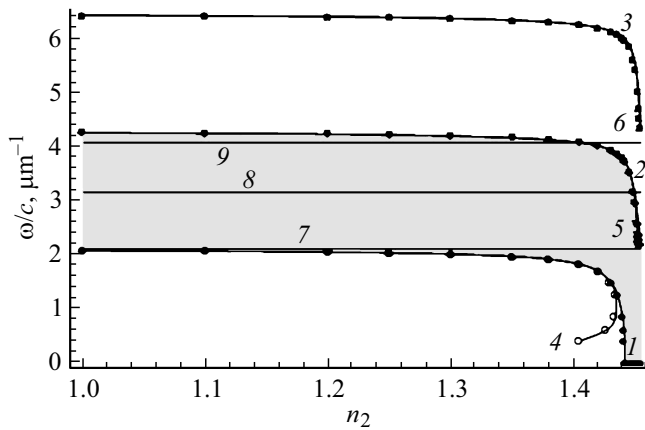


Рис. 7. Частоты отсечки основной (1), первой нечетной (2) и второй четной (3) мод W-световода с параметрами $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.454$, $a = 9.5 \mu\text{m}$, $b = 11 \mu\text{m}$, а также нижние границы переходных зон (кривые 4, 5 и 6) в зависимости от коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$).

системы уравнений (10), зависимости нижних границ переходных зон (кривые 4–6) от коэффициента прелом-

ления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$). Параллельные оси абсцисс прямые 7, 8 и 9 соответствуют длинам волн соответственно ($\lambda = 3, 2, 1.55 \mu\text{m}$). На длине волны $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ширина переходной зоны составляет $\Delta n_2 \approx 0.00142$ (рис. 6, a), на длине волны $\lambda = 2 \mu\text{m}$ $\Delta n_2 \approx 0.00023$ (рис. 6, b), а на длине волны $\lambda = 3 \mu\text{m}$ $\Delta n_2 \approx 0.00675$ (рис. 6, b). Ширина зоны перехода из режима вытекающих мод в одномодовый режим резко возрастает для длинных волн излучения (рис. 5 и 6, c).

Ширина переходной зоны Δn_2 на соответствующей длине волны λ из двухмодового режима в трехмодовый для последних десяти точек по оси абсцисс ω/c (рис. 6, a) изменяется (справа налево) от $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ до $\sim 1 \cdot 10^{-5}$, из одномодового режима в двухмодовый (рис. 6, b) от $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ до $\sim 1 \cdot 10^{-4}$, из режима вытекающих мод в одномодовый режим (рис. 6, c) от $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ до $\sim 1 \cdot 10^{-2}$, поэтому эти точки, отвечающие наиболее контрастным профилям показателя преломления W-световода, в выбранном масштабе практически совпадают с осями абсцисс.

Наконец, рассмотрим W-световод, в котором на широком интервале изменения коэффициента преломления

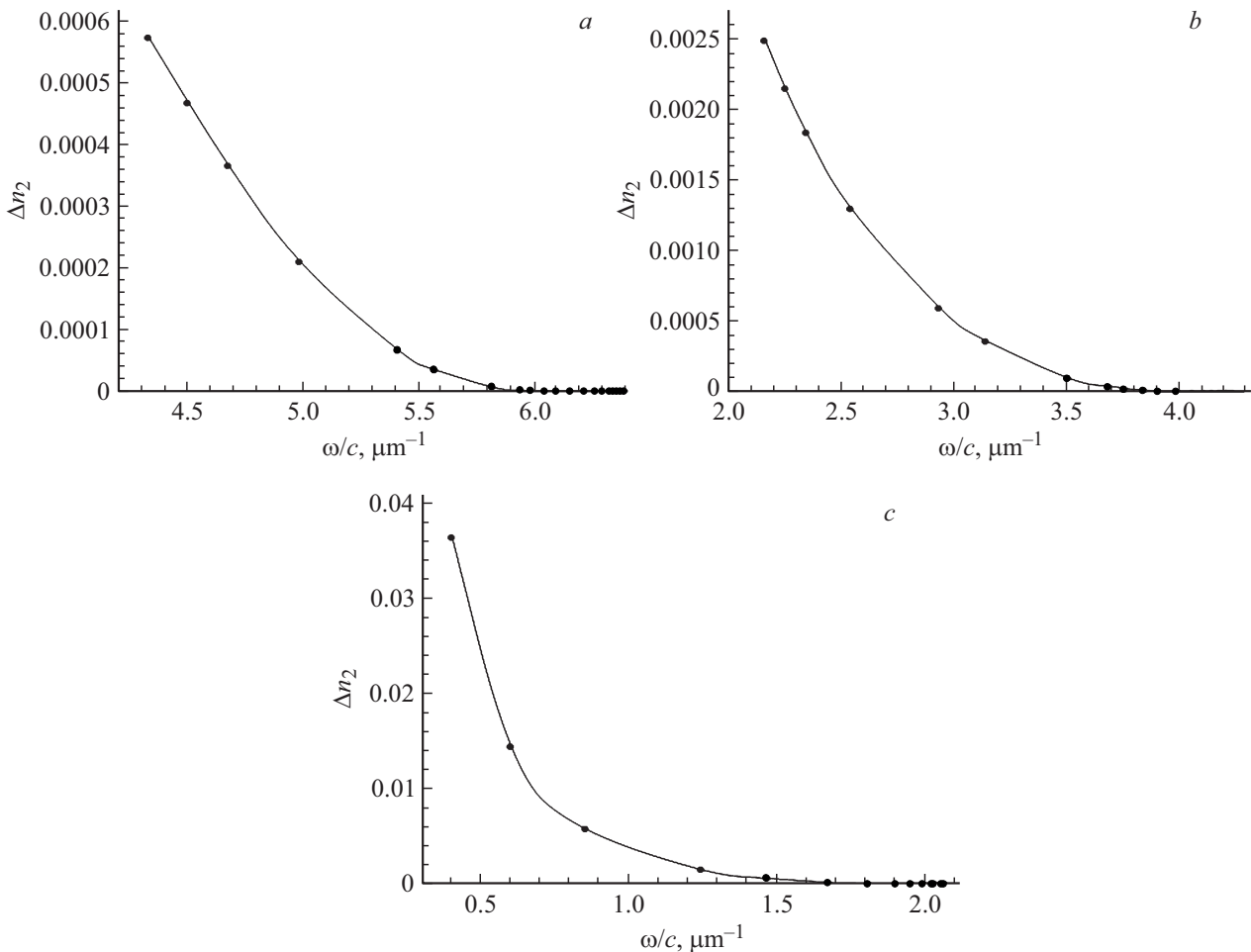


Рис. 8. Зависимость ширины переходной зоны из двухмодового режима в трехмодовый (a); из одномодового режима в двухмодовый (b); из режима вытекающих мод в одномодовый (c) от частоты излучения ω/c для W-световода с параметрами $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.454$, $a = 9.5 \mu\text{m}$, $b = 11 \mu\text{m}$.

промежуточного слоя n_2 осуществляется одномодовый режим на $\lambda_1 = 1.55 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 2 \mu\text{m}$, $\lambda_3 = 3 \mu\text{m}$. Таким может быть W -световод с фиксированными значениями параметров: $n_1 = 1.456$, $n_3 = 1.454$, $a = 9.5 \mu\text{m}$, $b = 11 \mu\text{m}$ и переменным значением n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$ [5]).

На рис. 7 представлены 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), а также расчетные зависимости нижних границ переходных зон (кривые 4-6) от коэффициента преломления промежуточного слоя n_2 ($1 \leq n_2 \leq n_3$). Обозначения на рис. 7 те же, что и на рис. 5. Кривые (4-6) практически на всем интервале изменения n_2 совпадают с кривыми отсечек основной, нечетной и второй четной мод (1-3). На длине волны $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ширина переходной зоны составляет $\Delta n_2 \approx 2 \cdot 10^{-7}$ (рис. 8, б), на длине волны $\lambda = 2 \mu\text{m}$ $\Delta n_2 \approx 0.00036$ (рис. 8, б), а на длине волны $\lambda = 3 \mu\text{m}$ (прямая 7) — данный волновод остается одномодовым во всем диапазоне изменения n_2 . Ширина зоны перехода из режима вытекающих мод в одномодовый режим, как и в предыдущем случае, резко возрастает для длинных волн излучения (рис. 7 и 8, с).

Ширина переходной зоны Δn_2 на соответствующей длине волны λ из двухмодового режима в трехмодовый для последних тринадцати точек по оси абсцисс ω/c (рис. 8, а) изменяется (справа налево) от $\sim 2 \cdot 10^{-15}$ до $\sim 2 \cdot 10^{-6}$, для последних 10 точек из одномодового режима в двухмодовый (рис. 8, б) от $\sim 1 \cdot 10^{-15}$ до $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ и из режима вытекающих мод в одномодовый режим (рис. 8, с) от $\sim 4 \cdot 10^{-9}$ до $\sim 6 \cdot 10^{-4}$, поэтому, как и в предыдущем рассмотренном случае, эти точки, отвечающие наиболее контрастным профилям показателя преломления W -световода, в выбранном масштабе практически совпадают с осями абсцисс.

Выше представленный подход к определению и описанию переходных зон в W -световодах состоял в следующем: для заданной конфигурации W -световода с переменным значением коэффициента преломления промежуточного слоя Δn_2 мы вычисляли интервал коэффициента преломления промежуточного слоя Δn_2 с границами, определяемыми соотношениями (9а, б) и решением системы уравнений (10) на данной частоте излучения. Совокупность таких интервалов (функция $\Delta n_2(\omega/c)$) и определяет зону перехода. Очевидно, что эту же зону можно определить и вычислить как совокупность интервалов частот при определенных значениях n_2 , т.е. как функцию $(\Delta\omega(n_2))/c$. Все зависит от удобства рассмотрения в той или иной ситуации, поскольку, перейти из одного режима в другой (например, из одномодового в двухмодовый) можно, изменяя n_2 на данной частоте ω , так и изменяя частоту ω при данном значении n_2 (рис. 3, 5, 7).

Заключение

Введено определение и представлены результаты численного расчета переходных зон в планарных W -световодах.

Показано, что для обеспечения устойчивого режима распространения направляемых мод в заданном диапазоне длин волн необходимо подбирать параметры W -световода так, чтобы W -световод не попадал в переходную зону и, по возможности, располагался ближе к середине зоны выбранного режима работы.

Имея возможность контролировать зоны неустойчивости, можно использовать их при разработке различного рода оптических датчиков.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Wadsworth W.J., Percival R.M., Bouwmans G., Knight J.C., Birks T.A., Hedley T.D., Russell P.St.J. // IEEE Photonics Technology Lett. 2004. V. 16. N 3. P. 843–845.
- [2] Отрохов С.Ю., Чаморовский Ю.К., Шатров А.Д. // Радиотехн. и электрон. 2010. Т. 55. № 10. С. 1185–1192; Otrokho S.Yu., Chamorovskiy Yu.K., Shatrov A.D. // J. Communications Technology and Electronics. 2010. V. 55. N 10. P. 1108–1114.
- [3] Отрохов С.Ю., Чаморовский Ю.К., Шатров А.Д. // Радиотехн. и электрон. 2012. Т. 57. № 8. С. 910–917; Otrokho S.Yu., Chamorovskiy Yu.K., Shatrov A.D. // J. Communications Technology and Electronics. 2012. V. 57. N 8. P. 834–841.
- [4] Отрохов С.Ю., Чаморовский Ю.К., Шатров А.Д. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 1. С. 59–65; Otrokho S.Yu., Chamorovskiy Yu.K., Shatrov A.D. // J. Optical Technology. 2014. V. 81. N 1. P. 44–49.
- [5] Отрохов С.Ю. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2018. № 8.
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/2/text.pdf>,
doi 10.30898/1684-1719.2018.8.2
- [6] Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 598 с.