

Практическое занятие по теме 1
«История развития оптической связи. Современные
и перспективные оптические волокна»

Исследование многомодовых оптических волокон (ММОВ)
с усеченным степенным профилем показателя преломления

1. Теоретические сведения

Усеченный степенной профиль показателя преломления (ППП) описывается соотношением:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_{10}^2 \cdot \left[1 - 2\Delta \cdot (r/r_{core})^q\right], & 0 \leq r < r_{core} \\ n_2^2, & |r| > r_{core} \end{cases}, \quad \Delta = \frac{n_{10}^2 - n_2^2}{2n_{10}^2}, \quad (1)$$

где n_{10} – показатель преломления сердцевины на оптической оси ОВ, n_2 – показатель преломления оболочки ОВ, Δ – высота ППП, r_{core} – радиус сердцевины ОВ, q – показатель степенного профиля, r – расстояние от оптической оси ОВ.

Различные типы лучей (мод) в можно характеризовать лучевым инвариантом B , который представляет собой постоянную для данного луча скалярную величину, характеризующую его направление в любой точке поперечного сечения сердцевины.

$$B = n(r) \cdot \cos\theta_z(r), \quad (2)$$

где $\theta_z(r)$ – угол, образующийся между касательной к траектории луча и осью ОВ.

Траектории направляемых лучей в таком ОВ никогда не доходят до границы сердцевина-оболочка. Направляемый луч распространяется внутри центральной части сердцевины, ограниченной цилиндрической поверхностью, называемой внешней каустикой, на которой лежат все точки поворота этого луча. Радиус внешней каустики r_{ce} для луча с инвариантом B можно найти по формуле, следующей из (1) и (2):

$$r_{ce} = r_{core} \cdot \left(\left(1 - B^2/n_{10}^2\right) / (2\Delta) \right)^{\frac{1}{q}}. \quad (3)$$

Все направляемые лучи имеют инварианты, удовлетворяющие условию:

$$n_2(\lambda) < B \leq n_{10}(\lambda). \quad (4)$$

Количество направляемых лучей в ОВ с усеченным степенным профилем можно приближенно оценить по выражению:

$$M = \frac{v^2}{2} \cdot \frac{q}{q+2}, \quad v = \frac{2\pi \cdot r_{core} \cdot NA}{\lambda}, \quad (5)$$

где v – нормированная частота ОВ, NA – числовая апертура ОВ:

$$NA = \sqrt{n_{10}^2 - n_2^2}. \quad (6)$$

Удельное время распространения луча на единичное расстояние в ОВ с усеченным степенным ППП зависит только от лучевого инварианта B :

$$\tau(B) = \frac{1}{c} \cdot \frac{n_{10g}}{q+2} \left[(p+q) \cdot \frac{n_{10}}{B} + (2-p) \cdot \frac{B}{n_{10}} \right], \quad (7)$$

где c – скорость света в вакууме, n_{10g} , p – групповой показатель преломления сердцевины на оси ОВ и параметр внеосевой дисперсии материала сердцевины, определяемые выражениями:

$$n_{10g} = n_{10}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{10}}{d\lambda}, \quad p = \frac{n_{10}(\lambda)}{n_{10g}} \frac{\lambda}{\Delta(\lambda)} \frac{d\Delta}{d\lambda}. \quad (8)$$

Для оценки коэффициента ММД можно воспользоваться упрощенным выражением:

$$D_m = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \tau_{\max} - \tau_{\min}, \quad (9)$$

где t_{\max} и t_{\min} – времена распространения самого «медленного» и самого «быстрого» лучей в ОВ длиной L , τ_{\max} и τ_{\min} – соответствующие удельные времена распространения.

На рис. 1 показана зависимость удельного времени распространения для различных значений инварианта B . Из рисунка видно, что максимальное удельное время распространения τ_{\max} всегда соответствует верхней ($B = n_{10}$) или нижней ($B = n_2$) границе диапазона направляемых лучей:

$$\tau_{\max} = \max[\tau(n_{10}), \tau(n_2)]. \quad (10)$$

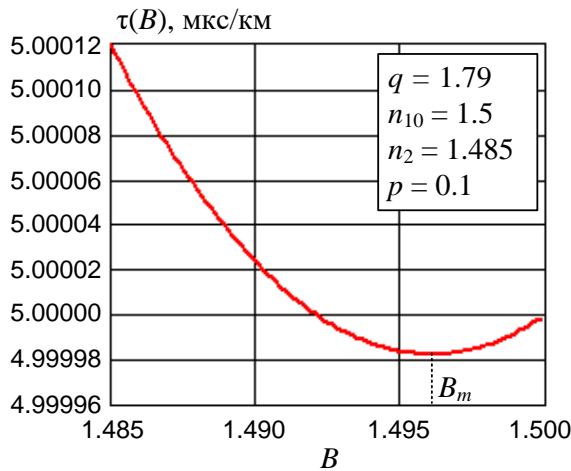


Рис. 1. Зависимость удельного времени задержки от величины инварианта

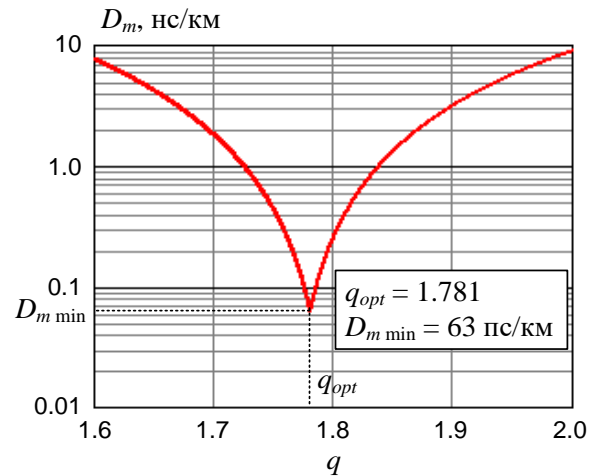


Рис. 2. Зависимость коэффициента ММД от показателя степенного ППП

Из рис. 1 также видно, что удельное время распространения принимает минимальное значение для определенного значения инварианта B_m :

$$B_m = n_{10} \cdot \sqrt{\frac{q+p}{2-p}}. \quad (11)$$

Однако луч, соответствующий инварианту B_m , не всегда удовлетворяет условию (4), то есть он может не быть направляемым. Поэтому для τ_{\min} можно записать:

$$\tau_{\min} = \begin{cases} \tau(B_m) & \text{при } n_2 < B_m < n_{10} \\ \min[\tau(n_{10}), \tau(n_2)] & \text{при } B_m < n_2, B_m > n_{10} \end{cases}. \quad (12)$$

Случай $\tau_{\max} = \tau(n_{10}) = \tau(n_2)$ соответствует минимально достижимому коэффициенту ММД, который достигается при показателе степенного ППП равном оптимальному значению:

$$q_{opt} = 2 \cdot \frac{n_2}{n_{10}} - p \cdot \frac{n_{10} + n_2}{n_{10}}. \quad (13)$$

Поскольку все входящие в (13) параметры зависят от длины волны, оптимизация ППП с целью получения минимального коэффициента ММД возможна только на одной длине волны.

Широкополосность ОВ может быть приближенно оценена по выражению:

$$W = 0.44/D_m. \quad (14)$$

Для ОВ, параметры которого приведены на рис. 1, получаем: $NA = 0.212$, $B_m = 1.492$, $q_{opt} = 1.781$, $D_{m \min} = 63$ пс/км, $W_{\max} = 6984$ МГц·км.

Зависимость ММД от показателя профиля q имеет острый минимум (рис. 2). Поскольку существующие технологии изготовления ОВ не позволяют выдерживать этот параметр с большой точностью, в реальных ОВ ММД значительно больше минимально достижимой и составляет 0.2–2 нс/км.

Из представленных выражений видно, что ММД и широкополосность ММ ОВ зависят от длины волны, так как от длины волны зависят показатели преломления сердцевины n_{10} и оболочки n_2 ОВ.

Зависимость показателя преломления кварцевого стекла от длины волны вдали от резонансных частот хорошо описывается уравнением вида:

$$n(\lambda) = \sqrt{\sum_{i=1}^k \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}} + 1, \quad (15)$$

которое называют уравнением или рядом Селлмейера. В уравнение входят резонансные длины волн λ_i и безразмерные коэффициенты A_i , которые для разных стекол приведены в табл. 1.

Табл. 1. Коэффициенты Селлмейера для кварцевых стекол

Вар.	Состав стекла (в молярных процентах)	A_1	A_2	A_3	λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	λ_3 , мкм
ОДНОКОМПОНЕНТНЫЕ СТЕКЛА							
<i>Силикатные стекла</i>							
неч.	100% SiO ₂	0.6961663	0.4079426	0.8974794	0.0684043	0.1162414	9.896161
ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ СТЕКЛА							
<i>Фторосиликатные стекла</i>							
чет.	1.0% F, 99.0% SiO ₂	0.691116	0.399166	0.890423	0.068227	0.116460	9.993707
<i>Германиево-силикатные стекла</i>							
1	3.1% GeO ₂ , 96.9% SiO ₂	0.7028554	0.4146307	0.8974540	0.0727723	0.1143085	9.896161
2	3.5% GeO ₂ , 96.5% SiO ₂	0.7042038	0.4160032	0.9074049	0.0514415	0.1291600	9.896156
3	4.1% GeO ₂ , 95.9% SiO ₂	0.68671749	0.43481505	0.89656582	0.072675189	0.11514351	10.002398

4	5.8% GeO ₂ , 94.2% SiO ₂	0.7088876	0.4206803	0.8956551	0.0609053	0.1254514	9.896162
5	7.0% GeO ₂ , 93.0% SiO ₂	0.68698290	0.44479505	0.79073512	0.078087582	0.11551840	10.436628
6	7.9% GeO ₂ , 92.1% SiO ₂	0.7136824	0.4254807	0.8964226	0.0617167	0.1270814	9.896161
7	11.2% GeO ₂ , 88.8% SiO ₂	0.7186243	0.4301997	0.8543265	0.0634539	0.1277683	9.896181
8	13.5% GeO ₂ , 86.5% SiO ₂	0.73454395	0.42710828	0.82103399	0.086976930	0.11195191	10.846540
9	13.5% GeO ₂ , 86.5% SiO ₂	0.711040	0.451885	0.704048	0.064270	0.129408	9.425478
10	19.3% GeO ₂ , 80.7% SiO ₂	0.7347008	0.4461191	0.8081698	0.0764679	0.1246081	9.896203
11	3.5% GeO ₂ , 96.5% SiO ₂	0.7042038	0.4160032	0.9074049	0.0514415	0.1291600	9.896156
12	3.1% GeO ₂ , 96.9% SiO ₂	0.7028554	0.4146307	0.8974540	0.0727723	0.1143085	9.896161

2. Задание и методические указания по его выполнению

1. Получите у преподавателя номер варианта N . Определите свои исходные данные для расчета параметров ММ ОВ по табл. 1. Для нечетных вариантов считайте оболочку ММ ОВ изготовленной из чистого кварцевого стекла, для четных – из фторосиликатного стекла. Сердцевину считайте изготовленной из германиево-силикатного стекла, концентрацию оксида германия выберите в соответствии с вариантом.

2. Рассчитайте зависимости показателей преломления оболочки $n_2(\lambda)$ и сердцевины $n_{10}(\lambda)$ ММ ОВ, а также группового показателя преломления сердцевины $n_{10g}(\lambda)$ от длины волны, постройте семейство графиков зависимостей всех перечисленных параметров.

Зависимости показателей преломления оболочки $n_2(\lambda)$ и сердцевины $n_{10}(\lambda)$ исследуемого волокна рассчитываются по выражению (15). Групповой показатель преломления сердцевины $n_{10g}(\lambda)$ на оптической оси ММ ОВ рассчитывается по выражению (8). Длину волны следует изменять в диапазоне от 800 до 1400 нм.

3. Рассчитайте зависимости числовой апертуры $NA(\lambda)$ ММ ОВ на его оптической оси и высоты профиля показателя преломления $\Delta(\lambda)$ от длины волны, построить соответствующие графики.

Числовая апертура $NA(\lambda)$ и высота профиля $\Delta(\lambda)$ рассчитываются по выражениям (6) и (1). Длину волны следует изменять в диапазоне от 800 до 1400 нм.

4. Рассчитайте ППП ОВ на длинах волн 850 и 1300 нм, постройте его графики.

ППП $n(r)$ рассчитывается по выражению (1). Радиус r_{core} сердцевины ММ ОВ примите равным 25 мкм, показатель степенного профиля q примите равным 2.

5. Рассчитайте зависимость $q_{opt}(\lambda)$ оптимального показателя степенного профиля ММОВ при насыщающем возбуждении от длины волны и постройте график.

Зависимость $q_{opt}(\lambda)$ рассчитывается по выражению (13) с использованием (8).

6. Рассчитайте зависимость коэффициента межмодовой дисперсии $D_m(\lambda)$ и широкополосности $W(\lambda)$ ММОВ при насыщающем возбуждении от длины волны при показателе степенного профиля, равном 2.

$D_m(\lambda)$ рассчитывается по выражениям (9), (10), (11), (12). $W(\lambda)$ рассчитывается по выражению (14). Длину волны изменять от 800 до 1400 нм. При построении графика установить логарифмический масштаб по вертикальной оси.

7. Рассчитайте зависимость коэффициента ММД $D_m(q)$ и широкополосности $W(q)$ ММОВ при насыщающем возбуждении от показателя степенного профиля q на длинах волн 850 и 1300 нм для насыщающего возбуждения, построить графики.

$D_m(q)$ рассчитывается по выражениям (9), (10), (11), (12). $W(q)$ рассчитывается по выражению (14). Показатель степенного профиля изменять от 1.6 до 2.4. При построении графика установить логарифмический масштаб по вертикальной оси.

8. Рассчитайте зависимость коэффициента межмодовой дисперсии $D_m(\lambda)$ и широкополосности $W(\lambda)$ ММОВ при ограниченном возбуждении от длины волны при показателе степенного профиля, равном 2.

Для расчета принять апертуру источника α равной 10^0 . Расстояние z от излучающей площадки до торца ОВ принять равным 50 мкм. Радиус области, которую источник засветит на торце ОВ, определить по выражению:

$$r_s = z \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

Для определения границ диапазона направляемых лучей при ограниченном возбуждении необходимо по формуле (15) рассчитать показатель преломления n_s , соответствующий радиусу r_s .

Для оценки $D_m(\lambda)$ будем считать, что инварианты направляемых лучей удовлетворяют условию $n_s \leq B \leq n_{10}$, и использовать выражения (9) и (11). τ_{\max} и τ_{\min} будем рассчитывать по формулам:

$$\tau_{\max} = \max[\tau(n_{10}), \tau(n_s)], \quad (17)$$

$$\tau_{\min} = \begin{cases} \tau(B_m) & \text{при } n_s < B_m < n_{10} \\ \min[\tau(n_{10}), \tau(n_s)] & \text{при } B_m < n_s \text{ или } B_m > n_{10} \end{cases}, \quad (18)$$

Длину волны изменять от 800 до 1400 нм. При построении графика установить логарифмический масштаб по вертикальной оси.

9. Рассчитайте зависимость коэффициента ММД $D_m(q)$ и широкополосности $W(q)$ ММОВ при ограниченном возбуждении от показателя степенного профиля q на длинах волн 850 и 1300 нм для насыщающего возбуждения, построить графики.

$D_m(q)$ рассчитывается по выражениям (9), (10), (17), (18). $W(q)$ рассчитывается по выражению (14). Показатель степенного профиля

изменять от 1.6 до 2.4. При построении графика установить логарифмический масштаб по вертикальной оси.

10. Для исследуемого ММ ОВ при насыщающем и ограниченном возбуждении определите оптимальные значения показателя степенного профиля и максимально достижимые широкополосности для длин волн 850 и 1300 нм.

11. Оцените допустимый разброс значений показателя степенного профиля q , если требуемая широкополосность ММОВ составляет не менее 50% от максимально достижимого значения.

12. Проанализируйте результаты всех расчетов, сделайте выводы.