

УДК 621.372

*М. П. КУХТИН, Г. Г. КАНАРИК*, канд. техн. наук,  
*Э. И. ЧЕРНЯКОВ*, канд. физ.-мат. наук, *О. П. ВАСИЛЬЧЕНКО*

### К РАСЧЕТУ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛОКОН

---

Одной из определяющих тенденций создания световодов с высокой пропускной способностью является переход на одномодовые высокочистые волокна. Это обусловлено рядом существенных преимуществ одномодовых волокон перед многомодовыми. Низкие потери и малая дисперсия в широком спектральном диапазоне позволяют использовать их с большим успехом в магистральных волоконно-оптических линиях связи [1].

Задача об исследовании параметров одномодовых волокон решалась методом частичных областей. Разбиение на частичные области, вводимые предположения, символика обозначений такие же, как в работе [2]. Параметры рассчитывались для фиксированных значений показателя преломления сердцевинки  $n_1=1,4584$  и диаметра оболочки  $2b=125$  мкм, соответствующих параметрам выпускаемого отечественной промышленностью оптического волокна. Потери в материале сердцевинки и оболочки составляли  $\alpha_1=1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ ,  $\alpha_2=1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$  соответственно.

В процессе расчета радиус сердцевинки варьировался от 2,5 до 5 мкм, длина волны — от 0,5 до 2,5 мкм, разность показателей преломления  $\Delta$  сердцевинки и оболочки — от 0,0001 до 0,01.

На рис. 1 представлены результаты расчета переносимой мощности сердцевинкой  $P_c$  и оболочкой  $P_0$ , а также постоянной затухания и длины волны в зависимости от параметра  $V$  (обоб-

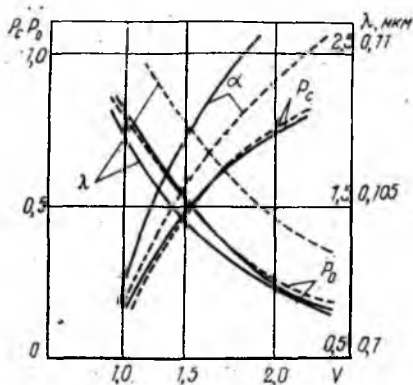


Рис. 1

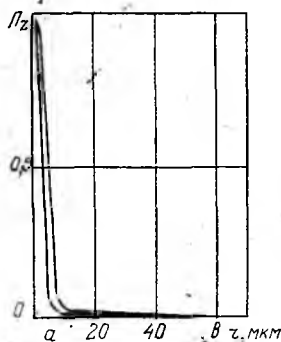


Рис. 2

щенный параметр частоты, геометрии и разности квадратов показателей преломления). Параметр  $V$  изменялся от 0,9 до 2,4, так как при  $V < 0,9$  сердцевина содержит до 10 % всей передаваемой мощности. Сплошной линией нанесены результаты для радиуса сердцевинки  $a = 2,6$  мкм, пунктирной —  $a = 3,8$  мкм.

Волокно с неограниченной оболочкой направляет основную моду  $HE_{11}$ , когда параметр волокна  $V < 2,405$ .

Постоянная затухания в волокне рассчитывалась по соотношению

$$\alpha = \frac{P_c \alpha_1}{P} + \frac{P_0 \alpha_2}{P},$$

где

$$P = P_c + P_0;$$

$$P_c = \frac{\pi a^2}{4} \{A_1 [J_{m-1}^2(u) - J_m(u) J_{m-2}(u)] + A_2 [J_{m+1}^2(u) - J_m(u) J_{m+2}(u)]\};$$

$$P_0 = \frac{\pi b^2}{4} \{D_1 [K_{m-2}(cv) K_m(cv) - K_{m-1}(cv) +$$

$$+ D_2 [K_{m+2}(cv) K_m(cv) - K_{m+1}^2(cv)] - \frac{\pi a^2}{4} \{D_1 [K_{m-2}(v) K_m(v) -$$

$$-K_{m-1}^2(v)] + D_2 [K_m(v)K_{m+2}(v) - K_{m+1}^2(v)];$$

$$A_{1,2} = \frac{a^2}{u^2} [\beta \omega \alpha_0 \varepsilon_0 n_1^2 + \mu_0 \pm \alpha_0 (\beta^2 + k^2 n_1^2)] A_n^2;$$

$$D_{1,2} = \frac{a^2}{u^2} [\beta \omega \alpha_0 \varepsilon_0 n_2^2 + \mu_0 \pm \alpha_0 (\beta^2 + k^2 n_2^2) \theta^2] A_n^2;$$

$$\theta = \frac{J_m(u)}{K_m(u)}; \quad \alpha_0 = \frac{\omega \mu_0 (X_m + U_m) (uv)^2}{\beta m V^2};$$

$c = \frac{b}{a}$  — внешний радиус оболочки. Знаки „плюс“ и „минус“

относятся к  $A_1$ ,  $D_1$  и  $A_2$ ,  $D_2$  соответственно.

По мере приближения  $V$  к нулевой отсечке (нижняя граница одномодового режима) постоянная затухания  $\alpha$  стремится к постоянной затухания оболочки. Мощность между сердцевинной и оболочкой перераспределяется. Значительно большая ее часть сосредоточивается в оболочке. Это может привести к усиленному излучению энергии из волокна и искажению передаваемого сигнала.

При стремлении  $V$  к верхней границе отсечки ( $V \approx 2,405$ ) происходит перераспределение мощности между сердцевинной и оболочкой. Большая часть мощности будет переноситься сердцевинной. Постоянная затухания волокна определяется постоянной затухания сердцевинной. Крутизна изменения  $\alpha$ ,  $P_c$  незначительная. Наилучшие передаточные свойства световода имеют место вблизи верхней границы одномодового режима.

Анализ влияния геометрии показывает, что увеличение радиуса сердцевинной при  $V = \text{const}$  не приводит к значительному росту параметров световода, хотя при  $\lambda = \text{const}$  наблюдается практическое линейное увеличение  $P_c$ ,  $\alpha$  и уменьшение  $P_0$ . В обоих случаях наблюдается снижение крутизны дисперсии. Существенно при этом сужение диапазона одномодового режима, причем связь между шириной диапазона и радиусом сердцевинной обратно пропорциональная.

Световоды с радиусом 3,8 мкм желательно использовать на длинах волн, больших 1,2 мкм, так как в противном случае появляются другие типы волн.

С ростом разности показателей преломления  $\Delta = n_1 - n_2$  характеристики передачи мощности улучшаются. Но чтобы в этом случае работать в одномодовом режиме, необходимо уменьшать размеры сердцевинной. Это ведет к трудностям, связанным с возбуждением основного типа волны. Поэтому геометрические размеры световода необходимо выбирать, реализуя компромисс между разностью показателей преломления и усложнением техники ввода излучения. При этом не следует забывать, что уве-

личение размеров сердцевины приводит к сужению области реализации одномодового режима.

Эффективный показатель преломления моды  $N = \beta/k$  (продольная постоянная распространения,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число) в области нижней границы одномодового режима близок к показателю преломления оболочки  $n_2$ . По мере роста параметра  $V$  он увеличивается с небольшой крутизной изменения. В области верхней границы  $N$  отличается от показателя сердцевины  $n_1$  меньше чем на  $\Delta/2$ , что свидетельствует о малой дисперсии моды в этом диапазоне. Рост  $a$ ,  $\Delta$  в отдельности также приводит к увеличению  $N$ , но с большей крутизной, чем при изменении  $V$ .

О проникновении поля в оболочку можно судить по эффективному радиусу моды

$$r_e = a \left( 1 + \frac{1}{v} \right),$$

определяемому поперечным параметром затухания  $v$ . Вблизи верхней границы одномодового режима ( $V=2,4$ ) меньше чем на 1 % отличается от радиуса сердцевины. В этом случае все поле моды сосредоточено в сердцевине. Имеет место резкое изменение продольной составляющей вектора Умова—Пойнтинга  $\Pi_z^c$  при  $r=a$ . По мере уменьшения  $V$  эффективный радиус моды увеличивается. Когда  $V=0,9$ , он уже на 30 % больше радиуса  $a$ . Анализ показывает, что хотя и малая дисперсия в области нулевой отсечки, но очень велик  $r_e$  моды. Поэтому передача сигнала будет чувствительна к неоднородностям оболочки.

Относительное распределение продольной составляющей вектора Умова — Пойнтинга в сердцевине

$$\Pi_z^i = A_1 J_{m-1}^2 \left( \frac{ur}{a} \right) + A_2 J_{m+1}^2 \left( \frac{ur}{a} \right)$$

и оболочке

$$\Pi_z^o = D_1 K_{m-1}^2 \left( \frac{vr}{a} \right) + D_2 K_{m+1}^2 \left( \frac{vr}{a} \right)$$

по поперечному сечению световода для значений параметра  $V=2,4$ ;  $V=0,9$  показано на рис. 2. Нормирование произведено к амплитуде продольной составляющей в центре волокна. На оси абсцисс точками  $a$ ,  $b$  отмечены радиусы сердцевины и оболочки. При  $V=2,4$ ;  $V=0,9$  на границе сердцевина — оболочка  $\Pi_z=0,12$ ;  $\Pi_z=0,68$ , что свидетельствует об ограничении поля сердцевинной в первом случае и проникновении поля в оболочку во втором.

Таким образом, в области верхней границы одномодового диапазона модовая дисперсия малая, сердцевина содержит наи-

большую часть переносимой мощности. Выбор размеров волокна должен осуществляться из условий возбуждения основной моды и технологии изготовления волокна.

**Список литературы:** 1. Носов Ю. Р. Тенденции развития оптоэлектронной техники обработки, передачи и отображения информации//Зарубеж. радиоэлектроника. 1984. № 9. С. 3—42. 2. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. М., 1980. 656 с.

*Поступила в редколлегию 16.12.85.*