

文章编号: 0253-2239(2003)05-0581-06

三包层 W I 和 W II 型单模光纤波导色散特性的研究*

张晓萍 田祥庆

(兰州大学信息科学与工程学院, 兰州 730000)

摘要: 研究了三包层 W I 和 W II 型单模光纤的波导色散特性。结果发现在相同条件下, 三包层 W I 和 W II 型单模光纤零色散点的调节范围比传统的双包层 W 型单模光纤明显增大。详细分析了几何参量 P 、 Q 和光学参量 R_1 、 R_2 对单模传输时的波导色散特性和低次模截止频率的影响。所得的研究结果为获得更为理想的色散补偿、色散平坦光纤及设计新型无源光器件提供了重要的依据。计算波导色散的方法可推广到多包层光纤。

关键词: 导波光学; 三包层光纤; 波导色散; 零色散点; 截止频率

中图分类号: TN232 文献标识码: A

1 引 言

双包层 W 型单模光纤是最引人注目的色散平坦光纤之一^[1~4], 该类双包层单模光纤色散特性的设计被限制在两个参量上: 几何尺寸和折射率差。要获得更为理想的色散补偿特性, 为了保持单模传输必须减小波导芯径, 增加了工艺制作的难度。三包层光纤的优点是可以调整 4 个参量来获得更好的传输特性和色散补偿特性, 从而克服了双包层光纤所面临的困难。文献[5]首次提出了一种最简单的三包层光纤模型并将其作为耦合器在理论上进行了研究, 文献[6]对三包层光纤的截止条件作了一定的研究, 之后出现了以三包层光纤为模型的无源光器件的研究^[7,8]。文献[9]研究了 4 种不同折射率分布的 W 型三包层多模光纤的传输特性, 该文献主要研究了多模传输时的模式色散和场结构, 但因特征方程较复杂, 求解波导色散面临困难, 所以对单模传输时的波导色散特性及色散调节范围没有做相应的研究。文献[10]主要用实验方法研究了 W 型三包层光纤的色散补偿特性, 并未给出波导色散的理论分析。文献[11]给出了普通单模光纤的波导色散计算方法, 但此方法并不适用于多包层光纤。本文针对 W I 和 W II 两种三包层光纤模型, 通过对波导色散的计算, 全面研究了单模传输时的波导色散特性及零色散点的调节范围。研究结果发现, 标志第三包层效应的光学参量 R_2 对此类三包层光纤的传

输、截止尤其是基模的波导色散特性有明显影响, 可以通过改变光学参量 R_1 、 R_2 及几何参量 P 、 Q 来改善单模传输时的色散特性。

2 理论分析

2.1 特征方程的推导

本文所研究的两种 W 型三包层光纤的剖面图如图 1 所示。

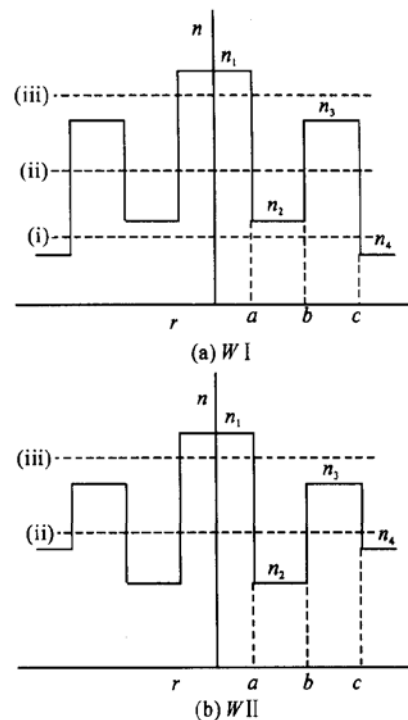


Fig. 1 Profile of two triple-cladding fibers with parameters defined

各层折射率分布如下:

* 高等学校骨干教师资助计划(200065)资助课题。

E-mail: yqdengz@public.lz.gs.cn

收稿日期: 2002-04-22; 收到修改稿日期: 2002-06-03

$$\begin{aligned} n(r) &= n_1, & 0 < r < a \\ n(r) &= n_2, & a < r < b \\ n(r) &= n_3, & b < r < c \\ n(r) &= n_4, & r > c \end{aligned}$$

根据有效折射率 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ 大小的不同, 可将 WI 型光纤分成三个不同的区域, 如图 1 所示。由波动方程, 采用标量近似法, 并根据边界条件, 可得 (i)、(ii)、(iii) 三个区域的特征方程如下:

$$\begin{vmatrix} J_m(U_1) & -J_m(W_2) & -Y_m(W_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_m(W_2) & Y_m(W_2) & -J_m(U_3) & -Y_m(U_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_m(U_3) & Y_m(U_3) & -K_m(W_4) \\ U_1 J_m(U_1) & -W_2 J_m(W_2) & -W_2 Y_m(W_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 J_m(W_2) & W_2 Y_m(W_2) & -U_3 J_m(U_3) & -U_3 Y_m(U_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_3 J_m(U_3) & U_3 Y_m(U_3) & -W_4 K_m(W_4) \end{vmatrix} = 0, \quad (n_4 < n_{\text{eff}} < n_2, \text{WI}) \quad (1)$$

$$\begin{vmatrix} J_m(U_1) & -I_m(W_3) & -K_m(W_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_m(W_3) & K_m(W_3) & -J_m(U_3) & -Y_m(U_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_m(U_3) & Y_m(U_3) & -K_m(W_4) \\ U_1 J_m(U_1) & -W_3 I_m(W_3) & -W_3 K_m(W_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_3 I_m(W_3) & W_3 K_m(W_3) & -U_3 J_m(U_3) & -U_3 Y_m(U_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_3 J_m(U_3) & U_3 Y_m(U_3) & -W_4 K_m(W_4) \end{vmatrix} = 0, \quad (n_2 < n_{\text{eff}} < n_3, \text{WI} \quad n_4 < n_{\text{eff}} < n_3, \text{WII}) \quad (2)$$

$$\begin{vmatrix} J_m(U_1) & -I_m(W_3) & -K_m(W_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_m(W_3) & K_m(W_3) & -I_m(U_2) & -Y_m(U_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_m(U_2) & K_m(U_2) & -K_m(W_4) \\ U_1 J_m(U_1) & -W_3 I_m(W_3) & -W_3 K_m(W_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_3 I_m(W_3) & W_3 K_m(W_3) & -U_3 J_m(U_2) & -U_2 Y_m(U_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_2 I_m(U_2) & U_2 K_m(U_2) & -W_4 K_m(W_4) \end{vmatrix} = 0, \quad (n_3 < n_{\text{eff}} < n_1, \text{WI}, \text{WII}) \quad (3)$$

对于 WI 型光纤, 其特征方程为 (1) 式~ (3) 式的组合; 对 WII 型光纤, 由于它只有 (2) 式、(3) 式两个区域, 故其特征方程为 (2) 式、(3) 式的组合。(1) 式~ (3) 式中 $J_m(\cdot)$ 、 $Y_m(\cdot)$ 、 $I_m(\cdot)$ 、 $K_m(\cdot)$ 分别为四类贝塞尔函数。特征方程中的各个参量定义如下:

$$\begin{aligned} U_1 &= a \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}, \\ U_2 &= b \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_3^2}, \\ U_3 &= b \sqrt{k_0^2 n_3^2 - \beta^2}, \\ W_2 &= a \sqrt{k_0^2 n_2^2 - \beta^2}, \end{aligned}$$

$$W_3 = a \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2},$$

$$W_4 = c \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_4^2},$$

$$P = b/c,$$

$$Q = a/c,$$

$$W_2 = W_2(P/Q), \quad W_3 = W_3(P/Q),$$

$$U_2 = U_2(1/P), \quad U_3 = U_3(1/P).$$

定义光学参量:

$$R_1 = \frac{\Delta n_1}{\Delta n} = \frac{n_1 - n_3}{n_3 - n_2},$$

$$R_2 = \frac{\Delta n_2}{\Delta n} = \frac{n_2 - n_4}{n_3 - n_2},$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_4^2}{2n_4^2} \approx \frac{n_1 - n_4}{n_4}$$

定义归一化频率:

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_4^2}$$

定义归一化传播常量:

$$B = \frac{(\beta/k_0)^2 - n_4^2}{n_1^2 - n_4^2} = 1 - \left[\frac{U_1}{V} \right]^2$$

2.2 LP01 模波导色散的求解方法

单模光纤的色散可由以下近似式求得^[12]:

$$\frac{d\tau}{d\lambda} \approx - \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_4}{d\lambda^2} \left[1 + \Delta \frac{d(VB)}{dV} \right] - \frac{N_4}{c} \left[\frac{\Delta}{\lambda} \right] V \frac{d^2(VB)}{dV^2} \quad (4)$$

其中 τ 为光包络的群时延, $N_4 = d(k_0 n_4)/(dk_0)$ 为外包层群折射率。上式中第一项为材料色散, 第二项为波导色散。要得到 $d\tau/d\lambda$, 主要问题在于 $d(VB)/dV$ 、 $Vd^2(VB)/dV^2$ 的求解, 经计算可得

$$\frac{d(VB)}{dV} = 1 + \left[\frac{U_1}{V} \right]^2 \left[1 - 2 \frac{U_1}{V} \frac{dU_1}{dV} \right],$$

$$V \frac{d^2(VB)}{dV^2} = - 2 \left[\frac{dU_1}{dV} - \frac{U_1}{V} \right]^2 - 2U_1 \frac{d^2 U_1}{dV^2}$$

由此可将 $d(VB)/dV$ 、 $Vd^2(VB)/dV^2$ 的求解归结为 dU_1/dV 、 $d^2 U_1/dV^2$ 的求解, 为此, 令(1)式~(3)式中的 $m = 0$, 并将所得的三个行列式分别对 V 求一阶导数和二阶导数, 可推算出行列式求导后各项中出现的导数项是

$$\frac{dU_1}{dV}, \frac{d^2 U_1}{dV^2}, \frac{dU_2}{dV}, \frac{d^2 U_2}{dV^2}, \frac{dU_3}{dV}, \frac{d^2 U_3}{dV^2},$$

$$\frac{dW_2}{dV}, \frac{d^2 W_2}{dV^2}, \frac{dW_3}{dV}, \frac{d^2 W_3}{dV^2}, \frac{dW_4}{dV}, \frac{d^2 W_4}{dV^2}$$

根据 V 、 U_1 、 U_2 、 U_3 、 W_2 、 W_3 、 W_4 的定义表达式, 经分析计算可知上述各导数项都可以用 dU_1/dV 、 $d^2 U_1/dV^2$ 来表示。由特征方程(1)式~(3)式通过数值计算可得到 $B-V$ 曲线, 同时确定 U_1-V 的关系; 由 U_1-V 的关系通过计算可确定 $dU_1/dV-V$ 的关系, 最终得到 $d(VB)/dV-V$ 和 $Vd^2(VB)/dV^2-V$ 曲线, 从而可求出波导色散。

3 计算结果及分析

3.1 截止特性

临界截止时, $\beta = k_0 n_4$, 此时 $W_4 = 0$, 代入(1)式~(3)式中可分别得到 W I ($R_2 > 0$) 和 W II ($R_2 < 0$) 光纤在临界截止情况下关于 R_1 、 R_2 、 P 、 Q 、 V_c

的特征方程。 V_c 为对应模式的截止频率。对不同的 R_1 、 R_2 、 P 、 Q , 可得到不同的截止频率曲线, 如图 2~图 5 所示。

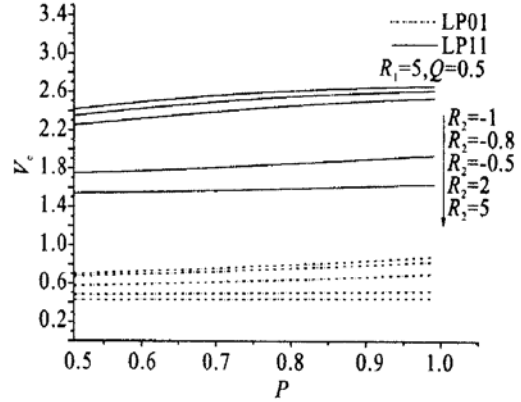


Fig. 2 Normalized frequency at cutoff frequency V_c as a function of P for various R_2 with $R_1 = 5$ and $Q = 0.5$. The values of R_2 correspond to curves from the top to the bottom respectively

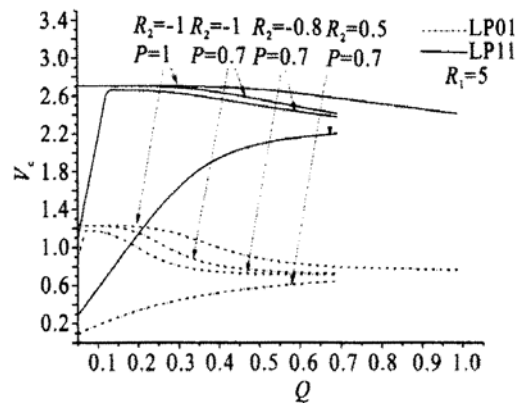


Fig. 3 Normalized frequency at cutoff frequency V_c as a function of Q for various R_2 with $R_1 = 5$ and $P = 0.7, 1$

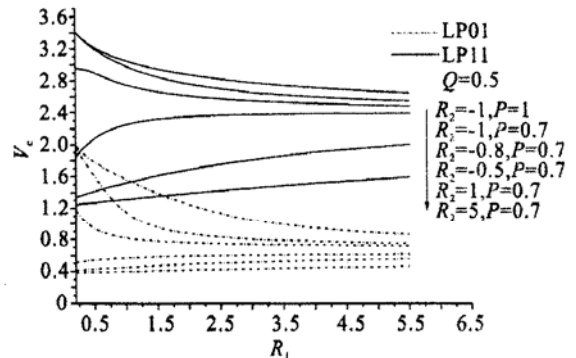


Fig. 4 Normalized frequency at cutoff frequency V_c as a function of R_1 for various R_2 with $Q = 0.5$ and $P = 0.7, 1$. The values of R_2 correspond to curves from the top to the bottom respectively

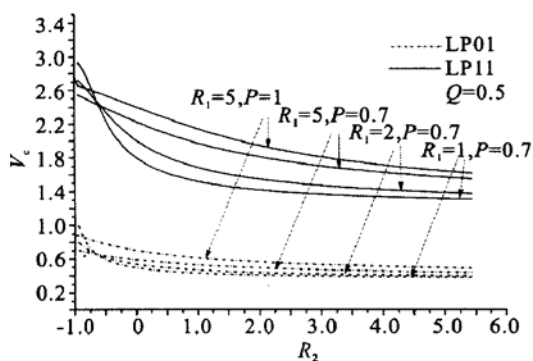


Fig. 5 Normalized frequency at cutoff frequency V_c as a function of R_2 for various R_1 with $Q = 0.5$ and $P = 0.7, 1$

由图 2 看出, P 值增大时, V_c 基本不变, 说明 P 值对截止频率影响很小。当 $R_2 < 0$ 时, LP_{11} 模的截止频率 V_c 值在 2.4 附近变化, 而当 $R_2 > 0$ 时, LP_{11} 模的 V_c 值在 1.7 附近变化, 这说明 W II 型光纤单模传输的范围大于 W I 型。图中的 5 个 R_2 自上而下依次与图中的 5 条曲线相对应。由图 3 看出, Q 值较小时对 V_c 值的影响较明显, 而当 Q 大于 0.5 以后, 对截止频率的影响明显减弱。由图 4 看出, 当 R_2 大于某一负值时, V_c 随 R_1 增大而增大; 当 R_2 小于某一负值时, V_c 随 R_1 减小而减小。图中的 6 个 R_2 自上而下依次与图中的 6 条曲线相对应。由图 5 我们可以得到此值大约在 $R_2 = -0.6$ 附近。在上述各图中, $R_2 = -1$ 及 $P = 1$ 对应双包层 W 型光纤, 由图看出, 三包层 W I 和 W II 光纤的截止频率均小于双包层 W 型光纤。

3.2 基模波导色散

按 2.2 中所述的方法分别求 $d(VB)/dV$ 及 $Vd^2(VB)/dV^2$ 随归一化频率 V 的变化曲线, 在此仅表示了 $Vd^2(VB)/dV^2-V$ 曲线。图 6~ 图 8 分别给出了 $R_1 = 1, 2, 5, R_2, P, Q$ 取不同值时 $Vd^2(VB)/dV^2$ 随归一化频率 V 的变化情况。由图看出标志第三包层效应大小的参量 R_2 对波导色散有显著影响, 且影响的大小和规律又与其它三个参量的取值密切相关。图中 $R_2 = -1, P = 1$ 的曲线对应双包层 W 型单模光纤的色散特性。 R_2 大于 -1 时, 尽管曲线的峰值有所下降, 但峰值的位置明显左移, 移动的大小与 R_1 的取值有关, R_1 越小移动越明显。图中也表示出了 R_2 对曲线影响的规律与几何参量 P, Q 的关系。当 $R_2 = -0.8$ 时, $P = 0.7$ 和 $Q = 0.5$ 对应的曲线比 $P = 0.8$ 和 $Q = 0.667$ 对应曲线的峰值大, 而峰值的位置更靠右; 当 $R_2 = 1$ 时, 与上述规律是相反的。尽管图中没有表示出 $R_2 = -0.5$ 时对应的曲线, 但我们也做了同样研究, 其变化规律同 $R_2 = 1$ 时的情况

类似, 这一结果说明, R_2 存在一临界值对应出现上述两种现象, 该值小于零, 介于 -0.8 和 -0.5 之间。

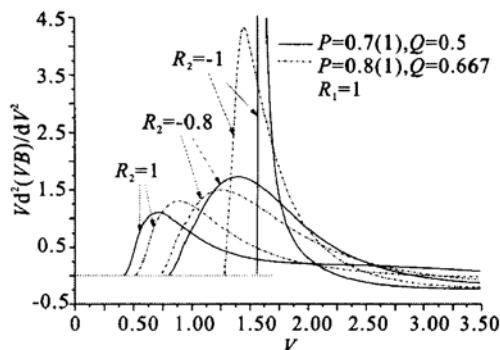


Fig. 6 Dispersion parameters $Vd^2(VB)/dV^2$ for various R_2 for $R_1 = 1$ with $P = 0.7(1), Q = 0.5$ and $P = 0.8(1), Q = 0.667$

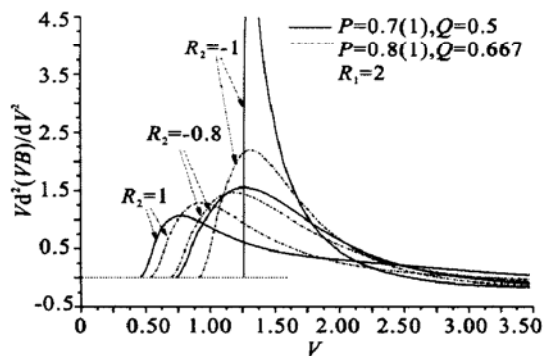


Fig. 7 Dispersion parameters $Vd^2(VB)/dV^2$ for various R_2 for $R_1 = 2$ with $P = 0.7(1), Q = 0.5$ and $P = 0.8(1), Q = 0.667$

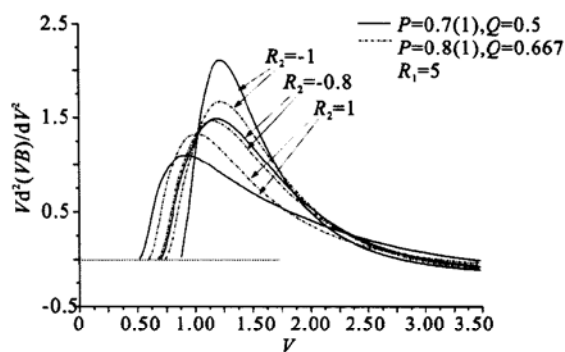


Fig. 8 Dispersion parameters $Vd^2(VB)/dV^2$ for various R_2 for $R_1 = 5$ with $P = 0.7(1), Q = 0.5$ and $P = 0.8(1), Q = 0.667$

上述研究结果说明可通过调节 4 个参量 R_2, R_1, Q 及 P 改变 $d(VB)/dV, Vd^2(VB)/dV^2$ 随归一化频率 V 的变化规律, 从而改变总色散的特性。表 1 给出了参量 V, P, Q 及 Δn 值确定后, 光学参量 R_1 和

R_2 取不同值时对应的零色散波长 λ 的值。由表看出零色散波长 λ 的变化范围随 R_2 的增大而增加, $R_2 = -1, P = 1$ 时(对应双包层 W 型光纤), R_1 从 1 到 5, λ 的变化范围是从 1.46 μm 到 1.76 μm ; $R_2 = 1, P = 0.8$ 时, λ 的变化范围是从 1.42 μm 到 1.86 μm , 说

明三包层 W I 和 W II 单模光纤零色散点的调节范围比双包层 W 型光纤的变化范围大。

表 2 给出了工作波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $R_1, R_2, P, Q, \Delta n$ 确定后, 总色散为零时对应的归一化频率 V 值, 由表看出 R_2 对零色散 V 值范围的影响更加明显。

Table 1. Data of wavelength λ as a function of R_1 at zero-dispersion point ($V = 1.80$) when R_2, P and Q are constants

V	$V = 1.80$											
	$P = 1, Q = 0.667$			$P = 0.8, Q = 0.667$			$P = 0.8, Q = 0.667$			$P = 0.8, Q = 0.667$		
R_2	$R_2 = -1, \Delta n = 4.66 \times 10^{-3}$			$R_2 = -0.8, \Delta n = 5.80 \times 10^{-3}$			$R_2 = -0.5, \Delta n = 6.00 \times 10^{-3}$			$R_2 = 1, \Delta n = 6.95 \times 10^{-3}$		
R_1	1	2	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5
$\lambda / \mu\text{m}$	1.46	1.55	1.76	1.43	1.55	1.81	1.42	1.55	1.82	1.42	1.55	1.86

Table 2. Data of normalized frequency V as a function of R_1 at zero-dispersion point ($\lambda = 1.55$) when R_2, P and Q are constants

λ	$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$											
	$P = 1, Q = 0.667$			$P = 0.8, Q = 0.667$			$P = 0.8, Q = 0.667$			$P = 0.8, Q = 0.667$		
R_2	$R_2 = -1, \Delta n = 4.66 \times 10^{-3}$			$R_2 = -0.8, \Delta n = 5.80 \times 10^{-3}$			$R_2 = -0.5, \Delta n = 6.00 \times 10^{-3}$			$R_2 = 1, \Delta n = 6.95 \times 10^{-3}$		
R_1	1	2	5	1	2	5	1	2	5	1	2	5
V	1.70	1.80	2.12	1.40	1.80	2.22	1.38	1.80	2.24	1.36	1.80	2.30

结论 本文研究了三包层 W I 和 W II 单模光纤的截止频率和色散特性。研究发现标志第三包层效应大小的参量 R_2 对截止频率及单模传输时波导色散有明显的影 响, 且影响的大小和规律又与参量 R_1, P, Q 的取值密切相关, 结合 R_1, P, Q 的改变, R_2 的改变将给波导色散及总色散一个更大的选择范围, 在选择适当的 P 和 Q 后, 可通过改变参量 R_1 和 R_2 来调整波导色散值, 使得零色散点、色散平坦区域及色散平坦程度等的设计更为灵活, 可以按所要求优化该类光纤色散特性。本文的研究结果为获得更为理想的色散补偿、色散平坦光纤及设计新型无源光器件提供了重要依据, 在理论上为计算多包层光纤单模传输时的波导色散提供了一种有效的分析方法。

参 考 文 献

- Monerie M. Propagation in doubly clad single-mode fibers. *IEEE Quant. Electron.*, 1982, **18**(4): 535~ 542
- Hagemann H J, Lade H, Warnier J. The Performance of depressed cladding single-mode fibers with different b/a ratios. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(6): 689~ 694
- Luo Jie, Qin Qinan, Ye Peida. The relation between the dispersion characteristics of W-profile broadband dispersion compensation fiber and its structural parameters. *J. Opt. Commun.*, 2000, **21**(3): 90~ 93
- Neves I V, Fernandes A S C. Dispersion patterns for extended W- and M-type optical fiber profiles. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2000, **24**(2): 112~ 117
- Cozens J R, Boucouvalas A C. Coaxial optical coupler. *Electron. Lett.*, 1982, **18**(3): 138~ 140
- Boucouvalas A C. Coaxial optical fiber coupling. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(5): 1151~ 1158
- Boucouvalas A C, Georgiou G. Biconical taper coaxial optical filter. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(20): 1033~ 1034
- Boucouvalas A C, Georgiou G. Concatenated tapered coaxial coupler filters. *IEE Proc.*, 1987, **134**(3): 191~ 195
- Nunes F D, de Souza Melo C A. Theoretical study of coaxial fibers. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(3): 388~ 398
- Gong Yandong, Guan Yali, Jiang Zhongao *et al.*. Dispersion compensating fiber with negative dispersion slope. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(3): 330~ 333 (in Chinese)
- Ren Jianhua, Yu Chongxiu, Wang Kuiru. Analytic resolution of waveguide dispersion in single mode fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11): 1301~ 1304 (in Chinese)
- Wu Chongqing. *Optical Waveguide Theory* (光波导理论). Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 65~ 67 (in Chinese)

Analysis of Waveguide Dispersion Characteristics of W I - and W II- Type Triple-Cladding Single-Mode Fibers

Zhang Xiaoping Tian Xiangqing

(*Institute of Information Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000*)

(Received 22 April 2002; revised 03 June 2002)

Abstract: Waveguide dispersion characteristics of two kinds of triple-cladding single-mode fibers named W I and W II is discussed. According to authors' research, it is concluded that the range of the zero dispersion point of the W I - and W II-type single-mode fibers is obviously larger than that of the conventional W-type single-mode fibers under the same condition. The influences of the geometric parameters P , Q and optical parameters R_1 , R_2 on the waveguide dispersion and cutoff frequency of low order modes for W I - and W II-type fibers are analyzed. The result provides a significant reference for the designs of new types of dispersion-flattened fiber, dispersion-shifted fiber and passive optical devices. The method to calculate waveguide dispersion can be applied to multi-cladding fibers.

Key words: guiding wave optics; triple-cladding fiber; waveguide dispersion; zero-dispersion point; cutoff frequency