

掺铒光纤放大器用 1480/1550 nm 波分复用器的优化设计

黄 勇 曾庆济

(上海交通大学光纤技术研究所, 上海 200052)

提要 以组合波导理论为基础, 分析了 1480/1550 nm 波分复用器的耦合区横截面形状和尺寸与偏振灵敏度的关系。着重比较了矩形截面和椭圆形截面二种波分复用器的偏振性能, 并发现当椭圆截面的短轴与长轴之比为 1:1.88 时, 器件性能几乎与偏振无关。研制成功的 1480/1550 nm 波分复用器的波长隔离度大于 20 dB, 偏振灵敏度小于 0.1 dB, 附加损耗小于 0.5 dB。

关键词 光纤, 波分复用器, 偏振灵敏度

1 引 言

掺铒光纤放大器(EDFA)的诞生是光纤通信发展史上的一个里程碑, 它使得光纤通信容量及传输距离剧增, 目前已经有了商用的 EDFA 产品。在 EDFA 中, 主要是采用 980 nm 及 1480 nm 半导体激光器作泵浦源^[1,2]。对 980 nm 的泵浦源而言, 虽然它具有较高的量子转换效率, 但由于 980 nm 的 LD 激光管性能还很不稳定, 而且其输出模场的椭圆度较高, 耦合入掺铒光纤(EDF)的泵浦能量相对较低。相比而言, 1480 nm 半导体激光管的性能较好, 并且它和单模光纤的耦合效率也可达到 65% 以上, 所以人们普遍采用 1480 nm 半导体激光器为泵浦源, 来研制 EDFA。而 1480/1550 nm 的 WDM 是 EDFA 中的关键元件, 它的性能直接影响着 EDFA 的性能。因此, 我们在研制 EDFA 中, 必须研制损耗低、波长隔离度高、偏振灵敏度低的波分复用器(WDM), 使得信号光和泵浦光更有效地注入掺铒光纤。在研制这种 WDM 中, 大多采用熔融拉锥的方法来研制的。由于这种 WDM 的波分复用间隔小(70 nm), 因此 WDM 就需要有较长的耦合区^[3], 由此导致的偏振分离(PBS)^[4]使得 WDM 的性能急剧下降。因此其偏振灵敏度很高, 致使这种 WDM 的波长隔离度仅在 10 dB 左右^[5]。为尽可能减小器件对偏振灵敏度的影响, J. D. Minelly^[6], N. M. O'Sullivan^[7] 和 A. W. Snyder^[8] 分别根据他们自己的理论依据和研制 WDM 的工艺, 提出了不同的见解, 并采用了复杂工艺研制这种 WDM。这里, 我们基于组合波导理论, 对 WDM 的性能进行了优化设计, 并得到了较为满意的实验结果。

2 理论分析

在实际的 2×2 耦合器中, 由于其耦合区的腰区较细, 用三角场近似分析其耦合特性, 发现

理论结果与实验结果相当吻合^[9]。而对于 1480/1550 nm 的 WDM,其腰区远比常规的 2×2 耦合器细得多,此时耦合区波导的作用主要是通过光纤的包层和空气的界面形成的,光纤芯的效应可完全忽略不计。因此我们的理论分析是建立在组合波导模型基础上的。组合波导理论认为:耦合区光纤间的能量转换是由于耦合区组合波导内传输的对称和反对称模的相拍引起的。而其耦合的偏振灵敏主要是由于耦合区内的几何双折射和引力双折射导致的对称模和反对称模分别在 x -偏振方向和 y -偏振方向上的传播常数差不一致引起的。

2.1 耦合区光纤间的光功率交换

假定对称和反对称模分别在 x 偏振方向和 y 偏振方向上的传播常数分别为 $\beta_x^s, \beta_x^a, \beta_y^s, \beta_y^a$ 。假定在耦合器的一输入端口注入非偏振单位光功率,即注入条件为 $p_1(0) = 1, p_2(0) = 0$ 时,则由耦合波方程,可得到二光纤之间的功率转换规律为

$$p_1(z) = \frac{1}{2} [\cos^2(C^x * z) + \cos^2(C^y * z)] \quad (1a)$$

$$p_2(z) = \frac{1}{2} [\sin^2(C^x * z) + \sin^2(C^y * z)] \quad (1b)$$

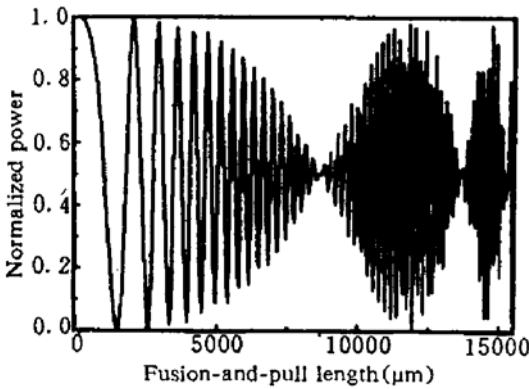


Fig. 1 The relation between coupled optical power and propagation distance with a relative difference between C^x and C^y being 5%

这里 $C^x = (\beta_x^s - \beta_x^a)/2, C^y = (\beta_y^s - \beta_y^a)/2$, 它们的大小及差异主要由耦合器耦合区的横截面形状所决定的。如果 C^x, C^y 的相对差为 5%, 那么其耦合区的光功率交换的规律如图 1 所示。从图中可以发现,光功率交换包络是由 $C^x - C^y$ 的差值所确定,而其包络周期为 $L = 2\pi/(C^x - C^y)$ 。一般来说, $C^x - C^y$ 的差值越大,在一个包络中,光纤间光功率交换的次数越少,器件的偏振灵敏度就越强。反之亦然。因此,要提高器件的波长隔离度,降低偏振灵敏度,就必须有效地降低 $C^x - C^y$ 的差值。

2.2 耦合区横截面形状的优化

对实际的波分复用间隔为 70 nm 的熔锥型 WDM 来说,由于其耦合区的光纤芯径很小,所以一般可忽略纤芯的作用,此时的波导被认为是由光纤的包层 (n_2) 和空气 (n_3) 的界面构成,故波导的归一化频率 $v \gg 1$, 这里 $v = kn_2\rho\sqrt{(2\Delta)}$, k 为自由空间的波数, n_2 为光纤包层的折射, $\Delta = (n_2^2 - n_3^2)/(2n_2^2)$, ρ 为耦合区横截面的半径。由耦合波方程出发^[10], 利用高斯积分定理,可得^[8]

$$C^x - C^y = \frac{\sqrt{(2)}(\Delta)^{3/2}}{\rho v^2} [U_{11}^2 A_{11} (S_{11}^x - S_{11}^y) - U_{01}^2 A_{01} (S_{01}^x - S_{01}^y)] \quad (2)$$

这里 U_{lm} 近似等同于相同尺寸的金属波导 TM 模的无量纲本征值,而

$$A_{lm} = \frac{\rho^3}{2U_{lm}^2} \cdot \frac{\oint \left(\frac{\partial \psi_{lm}}{\partial r}\right)^2 dl}{\int_{A_{co}} (\psi_{lm})^2 dA}, \quad S_{lm}^i = \frac{\oint \left(\frac{\partial \psi_{lm}}{\partial r}\right)^2 \cos \theta_i dl}{\oint \left(\frac{\partial \psi_{lm}}{\partial r}\right)^2 dl} \quad (3)$$

其中 θ_i 是积分边界上法向与径向的夹角。显然, U_{lm}, A_{lm} 和 S_{lm}^i 是由耦合区横截面的形状和尺寸所决定的常数。

在实际的波分复用器中，其耦合区的横截面大致可分成三种，第一种是哑铃形，这种器件一般用弱熔融拉锥制成；第二种是矩形，它是在较强熔融拉锥制成的；第三种是椭圆形，它是由强熔融下拉锥制得的。一般来说，具有哑铃形横截面的波分复用器具有最大的偏振灵敏度^[6]，因此这里仅对矩形及椭圆形横截面器件的偏振灵敏度作比较。假如耦合器的横截面用图 2(a)，(b) 近似，则由(3)式，我们得到这两种情况下 U_{lm} 、 A_{lm} 和 S_{lm}^i 的值，见表 1 所示。这样，由(2)式和表 1，我们分别计算了矩形和椭圆形横截面 $C^r - C^e$ 的值，并示于图 3。从图中我们可以得到如下结果：(1) 在同样的长短轴之比的情况下，椭圆形截面的 WDM 偏振灵敏度要比矩形横截面的 WDM 偏振灵敏度低；(2) 对于同样横截面形状的 WDM，偏振灵敏度随其横截面尺寸的减小而增大；(3) 对于椭圆形横截面，当其短轴与长轴之比为 1 : 1.88 时，器件的偏振灵敏度将是极低的。因此，我们认为，要想得到具有较好性能的掺铒光纤放大器用 1480/1550 nm 的 WDM，就需适当控制耦合区横截面的形状，以充分地抑制 WDM 的偏振灵敏度。

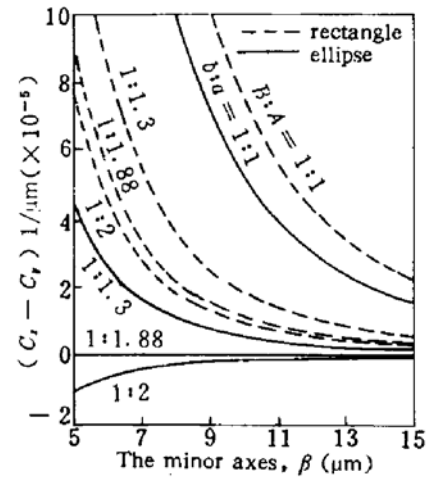
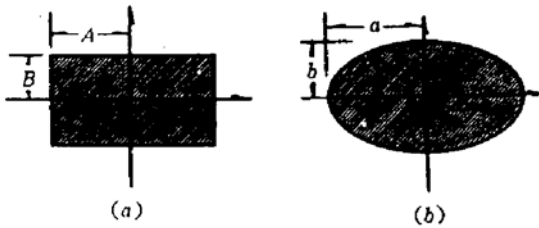


Fig. 2 Two models of the cross-section of coupling region, in which (a) is a rectangle and (b) is an ellipse

Fig. 3 The difference between C^r and C^e versus the scale of the cross-section of coupling region for rectangular model and elliptical model, respectively

Table 1 The values of U_{lm} 、 A_{lm} and S_{lm}^i for R (rectangle) and E (ellipse)

		U_{lm}	A_{lm}	S_{lm}^i	S_{lm}^e
R	LP_{01}	$\frac{\pi}{2} \sqrt{[1 + (b/a)^2]}$	$\frac{1 + (b/a)^3}{1 + (b/a)^2}$	$\frac{1}{1 + (a/b)^3}$	$\frac{1}{1 + (b/a)^3}$
	LP_{11}	$\frac{\pi}{2} \sqrt{[1 + 4(b/a)^2]}$	$\frac{1 + 4(b/a)^3}{1 + 4(b/a)^2}$	$\frac{4}{4 + (a/b)^3}$	$\frac{1}{1 + 4(b/a)^3}$
E	LP_{01}	$1.7 \sqrt{[1 + (b/a)^2]}$	$\frac{1 + (b/a)^3}{1 + (b/a)^2}$	$\frac{1}{1 + (a/b)^{3.392}}$	$\frac{1}{1 + (b/a)^{3.392}}$
	LP_{11}	$1.92 \sqrt{[1 + 3(b/a)^2]}$	$\frac{1 + 3(b/a)^3}{1 + 3(b/a)^2}$	$\frac{3}{3 + (a/b)^{3.45}}$	$\frac{1}{1 + 3(b/a)^{3.45}}$

3 实验结果与分析

根据以上的理论分析，我们在控制常规光纤耦合器系统的基础上，对其加热源略微作了改进，以扩大了拉锥加热温区，使其达到了近 15 mm，并提高最高加热温度至 1400 ℃。另外，在

实验中利用显微镜,实时观察熔融区光纤形状的变化,以控制耦合区横截面的形状。在加热过程中,耦合区的形状一般从最初的哑铃形变成近似矩形,然后变成椭圆,最后变成近似圆形。在确定的加热温度下,可以通过加热时间来控制耦合区横截面的形状。实验中我们发现:哑铃形截面的 WDM 偏振灵敏度最大,矩形的其次,圆形的再次,而椭圆形的最小。

图 4(a)、(b) 分别给出了耦合区形状为哑铃形及椭圆形截面的 WDM 的谱损特性。从图 4(a) 中可以发现,器件的波长隔离度只有 12 dB 左右,而且由于偏振灵敏度的影响,所测得的二输出端口的输出谱是很不规则,直通臂的波长隔离度小于耦合臂的波长隔离度^[1]。它的偏振灵敏度估计在 1 dB 左右。而图 4(b) 的谱损曲线却非常规则,最大波长隔离度大于 20 dB。由 2.2 中分析可知,该 WDM 的偏振灵敏度极低。输入偏振态从 0° 到 90° 的变化过程中,只导致 1% 的光功率涨落,表明器件的偏振灵敏度不大于 0.1 dB。据我们所知,利用常规的一次拉锥工艺,研制出如此高性能的 1480/1550 nm WDM,的确还未见报道。所得实验结果表明,理论分析结果也是正确的。

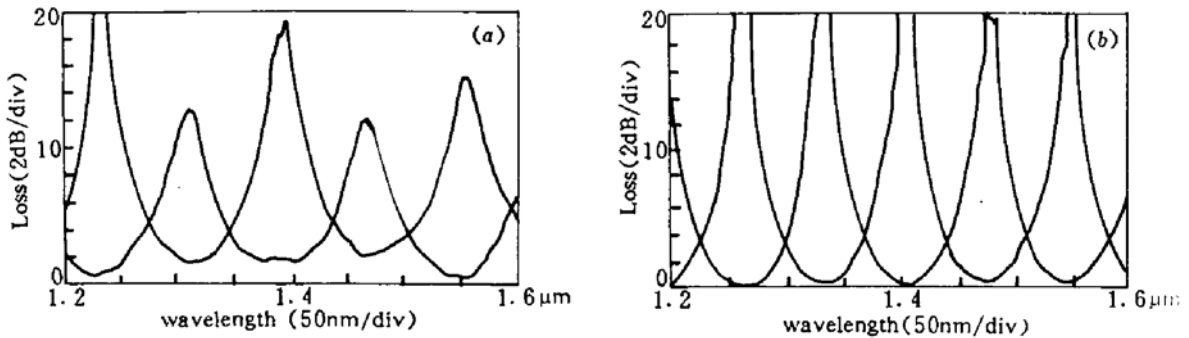


Fig. 4 shows the insertion loss spectra of 1480/1550 nm WDMs, in which (a) is spectral response of the WDM with the cross-section of dumbbell, and (b) is that of the WDM with the cross-section of ellipse

4 结 论

由组合波导理论出发,分析了耦合区横截面的形状与器件偏振灵敏度的关系,着重比较了矩形和椭圆形横截面 WDM 的偏振特性,并发现当椭圆形截面的短轴与长轴之比为 1 : 1.88 时,器件的性能几乎对偏振无任何影响。在实验中,基本上利用研制常规耦合器的工艺,研制成功了高性能的 1480/1550 nm WDM,其波长隔离度大于 20 dB,偏振灵敏度小于 0.1 dB,附加损耗小于 0.5 dB。这一结果还未见有文献报道。

参 考 文 献

- 1 R. I. Laming, M. C. Farries, P. R. Morkel *et al.*. Efficient pump wavelengths of erbium-doped fiber optical amplifier. *Electr. Lett.*, 1989, 25(1): 12~14
- 2 M. Yamada, M. Shimizu, M. Okayasu *et al.*. Noise characteristics of Er³⁺-doped fiber amplifiers pumped by 0.98 and 1.48 μm laser diodes. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, 2: 205~207
- 3 M. Eisenmann, E. Weidel. Single-mode fused biconical couplers for wavelength division multiplexing with channel spacing between 100 and 300 nm. *J. Lightwave Technol.*, 1988, 6(1): 113~117
- 4 M. Eisenmann, E. Weidel. Single-mode fused biconical coupler optimized for polarization beamsplitting. *J. Lightwave Technol.*, 1990, 9(7): 1210~1214
- 5 T. A. Birks. Practical tuning mechanism for fused-tapered couplers. *Opt. Lett.*, 1988, 13(8): 1126~1128

- 6 J. D. Minelly, M. Suyama. Wavelength combining fused-taper couplers with low sensitivity to polarization for use with 1480 nm-pumped erbium-doped fiber amplifiers. *Electr. Lett.*, 1990, 26(5) : 571~572
- 7 N. M. O' Sullivan, T. A. Birks, C. D. Hussey. Control of polarization in fibre amplifier WDMs. *Electr. Lett.*, 1992, 28(17) : 1616~1618
- 8 A. W. Snyder, Xue-Heng Zheng. Fused coupler of arbitrary cross-section. *Electr. Lett.*, 1985, 21(23) : 1079~1080
- 9 J. V. Wright. Variational analysis of fused tapered couplers. *Electr. Lett.*, 1985, 21(23) : 1064~1065
- 10 A. W. Snyder, J. D. Love. Optical wave guide theory. (Chapman and Hall, London, 1983)
- 11 Chin-Lin Chen, W. K. Burns. Polarization characteristics of single-mode fiber couplers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, QE-18(10) : 1589~1600

Optimal Design of 1480/1550 nm Wavelength Division Multiplexers for Use in Erbium-Doped Fiber Amplifiers

Huang Yong Zeng Qingji

(Research Institute of Optical Fiber Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200052)

Abstract In this paper, based on the theory of composited waveguides, the relations between the shape of the cross-section of coupling region and polarization sensitivity in wavelength division-multiplexers (WDMs) are analyzed. Then we highlightly compared polarization characteristics of the rectangular cross-section of WDM with those of the elliptical cross-section of WDM, and found that when the ratio of the principal axis to minor axis of ellipse equals 1.88 the WDMs are insensitive to polarization. The fabricated WDM operating at wavelengths 1480/1550 nm exhibits an isolation above 20 dB, polarization sensitivity of less than 0.1 dB, and excess loss of less than 0.5 dB.

Key words optical fiber, wavelength-division multiplexer, polarization sensitivity