

熔锥型光纤耦合器的扭转响应*

林小莉¹ 李平^{1,2} 王强¹ 马宝民¹

(1 山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

(2 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要 对熔锥型光纤耦合器进行了扭转响应研究. 通过放置在耦合器一端的旋转装置对未封装的熔锥型光纤耦合器耦合区施加扭转作用. 实验表明:耦合器的耦合比不但对扭转作用敏感,而且变化呈单调性;同时耦合器的附加损耗和工作波长不受扭转作用影响,并且这种扭转操作具有可重复性. 通过扭转操作能够对生产出来偏离预定耦合比的耦合器进行调整,使之符合产品要求,提高生产效率.

关键词 光通信器件;熔锥型光纤耦合器;耦合比;扭转

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

光纤通信系统、光纤传感技术^[1,2]和信号处理系统中广泛应用的熔锥型光纤耦合器具有附加损耗低、方向性好、环境稳定性强、控制方法简单灵活、生产制作成本低等特点^[3,4]. 光纤耦合器的制造工艺有三类: 磨抛法、腐蚀法和熔融拉锥法, 现在普遍采用的光纤耦合器制作技术是熔融拉锥法. 熔融拉锥法是把两根裸光纤靠在一起, 在高温火焰中加热使之熔化, 同时在光纤两端拉伸光纤, 使光纤熔融区成为锥形过渡段, 从而构成熔锥型光纤耦合器. 熔融区长度和逐渐变细的双锥结构由要求的耦合特性决定. 光纤耦合器的性能指标主要有附加损耗、耦合比与隔离度. 在熔锥型光纤耦合器的实际生产过程中, 由于周围环境清洁程度, 火焰温度、位置, 拉伸速度等因素的影响, 不能准确控制耦合比的大小, 往往生产出来的产品与预定耦合比有一定的差距, 生产效率受到了影响. 我们在实践中发现: 通过放置在光纤耦合器一端的旋转装置对未封装的熔锥区施加扭转作用(即扭转适当的角度), 可以改变熔锥型光纤耦合器的耦合比, 并且不影响其损耗大小和工作波长. 通过这种方法调整偏离的耦合比使其恢复到预定值, 可以提高耦合器的成品率、节省生产成本, 对实际的生产制造有很大帮助.

1 熔锥型光纤耦合器扭转响应机理

图1 定性表示了熔融拉锥型光纤耦合器的工作

原理: 入射光功率在双锥体结构的耦合区发生功率再分配, 一部分光功率沿入射光纤继续传输, 另一部分则耦合到另一光纤输出.

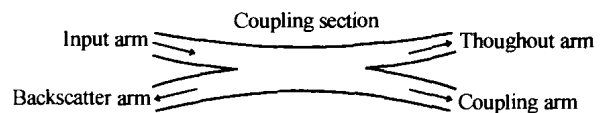


图1 熔融拉锥型光纤耦合器的工作原理

Fig. 1 The operating scheme of the fused-tapered fiber coupler

在单模光纤中, 传导模是两个正交的基模(HE₁₁)信号. 当传导模进入熔锥区时, 随着纤芯的不断变细, V值逐渐减小, 有越来越多的光功率渗入到光纤包层中. 实际上光功率是在由包层作为芯, 芯外介质(一般是空气)作为新包层的复合波导中传输的. 在输出端, 随着纤芯的逐渐变粗, V值重新增大, 光功率在两根纤芯中以一定的比例进行重新分配. 在熔锥区, 两光纤包层合并在一起, 纤芯足够逼近, 在弱导和弱耦合近似下, 并假设光纤是无吸收的, 则有耦合方程组^[5]

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = i(\beta_1 + C_{11})A_1 + iC_{12}A_2 \\ \frac{dA_2(z)}{dz} = i(\beta_2 + C_{22})A_2 + iC_{21}A_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, A₁、A₂ 分别是两根光纤的模场振幅; β₁、β₂ 是两根光纤在孤立状态下的传播常数; C_{ij} 是耦合系数. 实际上, 自耦合系数 C₁₁、C₂₂ 相对于互耦合系数 C₁₂、C₂₁ 可以忽略, 且近似有 C₁₂ = C₂₁ = C. 当初始条件为 P₁(0) = 1, P₂(0) = 0; 且 β₁ = β₂ 时, 由方程组(1)可以得到标准熔融拉锥型光纤耦合器的耦合比为

$$R_c = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \times 100\% = \sin^2(Cz) \times 100\% \quad (2)$$

其中

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0(Wd/r)}{r^3 K_1^2(Wd/r)} \quad (3)$$

*山东省青年科学家基金(02BS601)和山东大学青年基金资助课题

Tel: 13589030882 Email: linxiaolihao@eyou.com

收稿日期: 2003-05-27

式(3)中, r 是光纤半径, d 是两光纤中心的间距, $U = r(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2}$ 和 $W = r(\beta^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$ 是光纤的纤芯和包层参量, $V = kr n_{co} (2\Delta)^{1/2}$ 是光纤的归一化频率, $\Delta = (n_{co}^2 - n_{cl}^2) / 2n_{co}^2$ 是相对折射率, n_{co} 和 n_{cl} 分别是纤芯和包层的折射率, K_0 和 K_1 是零阶和一阶修正的第二类贝赛尔函数.

当对耦合器施加扭转作用时, 光纤耦合器的耦合比随扭转角度变化的物理实质是: 对耦合区的扭转作用使光纤耦合器的耦合系数 C 发生了变化. 由式(2)得到光纤耦合器的耦合比随扭转角的变化为

$$\Delta R_c = \left(\frac{\partial C_z}{\partial \theta} \right) \Delta \theta \sin(2Cz) \quad (4)$$

式中 θ (单位: 度) 表示施加于耦合区的扭转角.

由式(3)可以看出, 耦合系数 C 是一个与光纤半径 r , 两光纤中心间距 d 和折射率 n 有关的函数. 在扭转过程中, r 和 d 不受扭转作用影响; 这样, 耦合比的变化可以进一步表示为

$$\Delta R_c = \left[\frac{\partial C}{\partial n} \frac{\partial n_z}{\partial \theta} \right] \Delta \theta \sin(2Cz) \quad (5)$$

由于在耦合区施加了扭转操作, 实际的光纤折射率 n 由有效折射率 n_{eff} 代替

$$n_{eff} = \left[1 + \frac{x^2 + y^2}{c^2} \right]^{1/2} n \quad (6)$$

式中, $2\pi c$ 代表施加于耦合区的扭转弧度, n 是光纤耦合器的折射率分布.

通过式(5)、(6)可以看出: 对耦合区的扭转作用可以影响耦合系数 C , 进而改变耦合器的耦合比 R_c . 定性的分析得到: 耦合器边缘的折射率随扭转而变大, 引起耦合器内的模式场的重新分布, 减弱了耦合器两边模式的重叠, 最终导致退耦合现象的发生.

2 熔锥型光纤耦合器扭转特性研究

耦合比是光纤耦合器的主要性能参数, 是衡量成品耦合器是否合格的重要依据. 在用熔融拉锥法制作光纤耦合器的过程中, 由于周围环境清洁程度, 火焰温度、位置, 拉伸速度等因素的影响, 很难使拉锥后耦合器的耦合比与预定值相吻合, 往往存在不同程度的偏离. 在拉锥结束后, 放入石英半管固定之前, 将耦合器一端固定, 通过旋转装置在另一端施加连续变化的旋转, 这样可以在耦合区形成不同程度的扭转, 见图2. 由于未封装的耦合区很脆, 实验中为了避免熔锥区折断, 应确保耦合器保持拉紧状态. 表1记录了1550 nm 波长和1310 nm 波长耦合器耦合比随旋转角变化的实验测量数据.

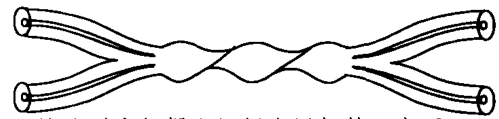


图2 熔锥型光纤耦合器耦合区扭转示意图
Fig.2 The twist schematic diagram of the fused-tapered fiber coupler

表1 1550 nm 波长和1310 nm 波长耦合器耦合比随旋转角变化实验测量数据

角度(°)	1550 nm	1310 nm	角度(°)	1550 nm	1310 nm	角度(°)	1550 nm	1310 nm	角度(°)	1550 nm	1310 nm
0	97%	97%	380	85%	65%	580	62%	29%	780	27%	6%
80	96%	95%	400	84%	63%	600	57%	24%	800	25%	5%
160	95%	92%	420	82%	57%	620	55%	21%	820	24%	4.8%
240	93%	84%	440	81%	55%	640	52%	18%	840	19%	2.1%
260	92%	82%	460	79%	51%	660	50%	16%	860	17%	3.5%
280	92%	79%	480	77%	47%	680	46%	14%	880	15%	3.0%
300	90%	76%	500	75%	44%	700	43%	12%	900	13%	2.6%
320	90%	74%	520	72%	40%	720	39%	10%	920	11%	2.2%
340	88%	71%	540	69%	37%	740	35%	9%	940	9%	1.9%
360	86%	68%	560	66%	32%	760	31%	8%	960	8%	1.6%

根据表1, 得到两种类型耦合器耦合比随旋转角变化的测量响应曲线, 如图3所示.

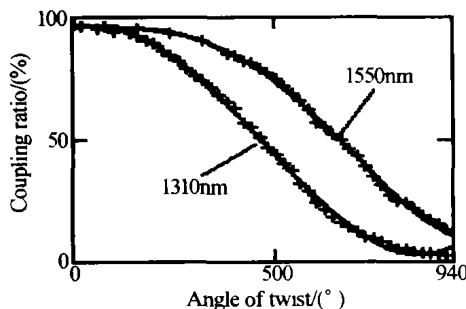


图3 耦合比随扭转角度变化响应曲线
Fig.3 Variation of the coupling ratio as a function of the axial twist angle

图3中的曲线可以用如下表达式拟合:

$$R_a = 1.6235 \times 10^{12} c^4 - 6.9984 \times 10^5 c^3 + 16.0445 c^2 - 1.98 \times 10^{-4} c + 3.521 \times 10^{-10}$$

$$R_b = 1.5996 \times 10^{12} c^4 + 1.9129 \times 10^6 c^3 - 53.9006 c^2 + 7.5908 \times 10^{-5} c + 8.379 \times 10^{-11}$$

式中, $c = \frac{\theta \pi}{1802 \pi}$, 表示施加在耦合区一端的旋转大小, R_a 和 R_b 分别表示1550 nm 波长耦合器和1310 nm 波长耦合器的耦合比.

从图3可以看出: 1) 耦合比对扭转作用响应灵敏, 随扭转角度的增加而连续变化, 并且具有单调性. 当耦合比 < 15% 时, 其随扭转角度的变化趋于平缓.

2) 1310 nm 与 1550 nm 波长耦合器的耦合比下降过程不同步, 1550 nm 波长耦合比明显滞后于 1310 nm 波长耦合比, 但两种耦合器随扭转角度变化的趋势是相同的. 图 4 是 1550 nm/1310 nm 双窗口耦合器耦合比随扭转角变化的测量响应曲线, 可以看出: 当扭转角大于 540° 时, 1550 nm 波长耦合比才开始有明显的下降, 而 1310 nm 波长耦合比随扭转角度的下降提前了 300°.

实验中, 制作了具有不同附加损耗的耦合器, 它们的耦合比对扭转角度的响应曲线见图 5. 从图 5 可以看出: 附加损耗的大小对耦合比随扭转角度变化关系的影响很小.

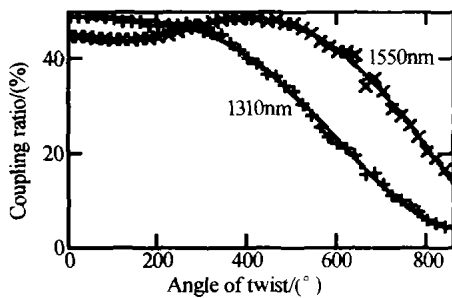


图 4 1550 nm/1310 nm 双窗口耦合器耦合比随扭转角度变化响应曲线

Fig. 4 Variation of the coupling ratio of the 1550 nm/1310 nm coupler as a function of the axial twist angle

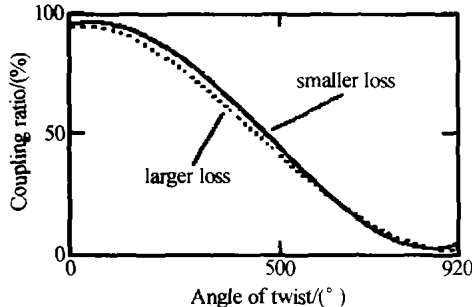


图 5 不同损耗值耦合器对扭转角度响应曲线

Fig. 5 Variation of the coupling ratio as a function of the twist angle for the different loss

在实验中还观察到下面几个现象: 1) 由于耦合器的对称性, 施加不同方向的扭转对测量结果没有影响, 耦合比均随扭转角的增大而减小. 2) 连接在光纤耦合器输出端的计算机显示的监测结果表明: 在对耦合区施加扭转的过程中, 耦合器附加损耗不受扭转作用影响, 保持拉锥结束后的大小. 3) 用光谱仪观察耦合器输出端的频谱情况发现: 当扭转角增加时, 输出端的功率峰值波长向长波方向移动, 但是移动的幅度很小, 当旋转一周时仅有 1 nm 左右的移动, 所以可以忽略这方面的影响. 4) 扭转到一定程度后反方向旋转, 逐渐减小扭转角, 耦合比连续变化; 当施加于耦合区的扭转被完全撤销后, 耦合比能够恢复到未施加扭转时的初始值, 说明这种扭转操作具有可重复性. 5) 对多个同类型的耦合器进行同

样的扭转实验, 均得到类似的结果, 说明了这种耦合比调整方法的可行性.

关于这种扭转作用对偏振态的影响问题, 下一步将通过一系列实验进行分析研究. 目前已有文章报道: 用两根相同的单模光纤制成的偏振分束器^[6-9]输出端偏振态不受扭转操作影响^[10].

3 结论

在耦合器的制作过程中, 经常出现生产出来耦合器的耦合比与预定值有不同程度的偏离. 本文对熔锥型光纤耦合器扭转特性的研究表明: 对未封装耦合器的耦合区施加扭转作用可以连续改变耦合器的耦合比, 不影响其附加损耗和工作波长, 并且具有良好的可重复性. 实验结果和分析表明: 这种通过扭转耦合区对偏离预定耦合比的耦合器进行调整的方法, 操作简单易行, 将在一定程度上节省生产成本, 提高耦合器的成品率.

参考文献

- Lin C S. Fiber optic displacement sensor for the measurement of a vibrating object. *Precision Engineering*, 1994, **16**(4): 302 ~ 306
- Rao Y J. Absolute strain measurement using an in-fibronics-Bragg-grating-based Fabry-Perot sensor. *Electronics Letters*, 2000, **36**(8): 708 ~ 709
- Tekippe V J, Moore D R, Paul D K, et al. Production, performance, and reliability of fused couplers. *Proc SPIE*, 1998, **3666**: 56 ~ 61
- Diao J, Chu P L. All-fiber optical wavelength converter. *SPIE*, 1998, **3491**: 15 ~ 17
- 林学焯. 光无源器件. 北京: 人民邮电出版社, 1998. 105 ~ 108
- Lin X H. Light Passive Devices. Beijing: People Post and Telecom Press, 1998. 105 ~ 108
- Yataki M S, Payne D N, Varnham M P. All-fiber polarizing beamsplitter. *Electron Lett*, 1985, **21**(6): 249 ~ 251
- Bricheno T, Baker V. All-fiber polarisation splitter/combiner. *Electron Lett*, 1985, **21**(6): 251 ~ 252
- Eisenmann M, Weidel E. Single-mode fused biconical coupler optimized for polarization beamsplitting. *J Lightwave Technol*, 1991, **9**(7): 853 ~ 858
- Wu C W, Wu T L, Chang H C. A novel fabrication method for all-fiber, weakly fused, polarization beamsplitter. *IEEE Photo Technol Lett*, 1995, **7**(7): 786 ~ 788
- Morishita K, Yamaguchi T. Wavelength tunability and polarization characteristics of twisted polarization beamsplitting single-mode fiber couplers. *J Lightwave Technol*, 2001, **19**(5): 732 ~ 738

Twist Response of Fused-tapered Fiber Coupler

Lin Xiaoli¹, Li Ping^{1,2}, Wang Qiang¹, Ma Baomin¹

¹ Information Technology & Engineering School, Shandong University, Jinan 250100

² College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin 300072

Received date: 2003-05-27

Abstract The strain response of fused-tapered fiber coupler is studied. The axial twisting of a fused-tapered fiber coupler without being packed through the rotating device placed at the either end of the coupler causes the coupling ratio of the coupler varies across all possible values. The experiment results indicate that not only the coupling ratio of the coupler is sensitive to twist, but also the changing is monotone; at the same time the coupler loss and the working wavelength suffered no significant change at any stage, and demonstrate the reproducibility of the twisting effect. The fused-tapered coupler whose coupling ratio doesn't fit in with the needs can satisfy the manufacture demands through adjusting it by twisting the coupling zone. Thus, this method can increase the production efficiency.

Keywords Optical communication device; Fused-tapered fiber coupler; Coupling ratio; Twist



Lin Xiaoli was born in 1978. She received her B. Sc. (2001) in optics from Shandong University. From 2001 to now, She is studying for M. Sc. degree in optical engineering from Shandong University. Her current research interests involve optical communication devices and lasers.