

熔融拉锥型光纤耦合器实验研究

刘景琳, 段吉安, 苗健宇, 钟 掘

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要:根据光纤的消逝场耦合模理论, 论述了熔融拉锥型光纤耦合器的工作原理; 以六轴型熔融拉锥机为实验平台, 研究了熔融拉锥法制作 3 dB 单模光纤耦合器的过程; 分析了拉伸速度与附加损耗及损耗偏差的关系, 发现拉伸速度为 150 $\mu\text{m/s}$ 时, 耦合器的性能达到最优; 此外, 利用光学测试系统测试了光纤耦合器的插入损耗、附加损耗、方向性与均匀性等光谱特性参数。研究表明, 所得实验结果与耦合理论分析结果吻合, 说明该方法具有制作过程简单、附加损耗低、环境稳定以及成本低廉等优点。

关键词:光纤耦合器; 耦合模理论; 熔融拉锥法

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7207(2006)01-0103-05

Experimental study on fused tapered optical fibre coupler

LIU Jing-lin, DUAN Ji-an, MIAO Jian-yu, ZHONG Jue

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China)

Abstract: The coupling-mode mechanism of fused biconical taper was discussed based on fiber's evanescent field coupling theory. The facture process of 3 dB single-mode fiber coupler was studied by making use of the experimental platform of a 6-axis optical fiber coupler machine and the method of the fused biconical taper. The relation between drawing speed and excess loss and tolerance of loss was analyzed. It is found that the fiber coupler has good performance when the drawing speed is 150 $\mu\text{m/s}$. The performance parameters of fiber coupler, such as insertation loss, excess loss, directivity and uniformity, were tested using optical test system. It is indicated by a large number of experiments that the experimental result is in good agreement with analysis of coupling-mode theory. The experiment result also shows that the manufacture technology has some advantages, such as the simple facture process, low excess loss the environmental stability and the low cost.

Key words: fiber coupler; coupling-mode theory; fused biconical taper

光纤耦合器是一种光功率、光波长和偏振光的分路与合路的重要光无源器件^[1-3], 广泛应用于光纤通信、光纤检测以及光纤传感等领域^[4, 5]。最初的光纤耦合器制作技术是由 K. S. Sheem 等^[6, 7]提出的蚀刻法, 该方法简单, 但制作出来的耦合器不

仅不耐用, 而且对环境温度的变化敏感, 无实用价值。随后, R. A. Bergh 等^[8]发明了光纤研磨法, 该方法的实用性有所提高, 但制作困难, 成品率低, 环境特性不理想。目前, 主要采用熔融拉锥法制作光纤耦合器。在此, 本文作者根据耦合模理论, 分

收稿日期: 2005-05-07

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50235040)

作者简介: 刘景琳(1979-), 女, 湖南澧县人, 讲师, 从事光信息器件制造研究

论文联系人: 刘景琳, 女, 讲师; 电话: 0731-8830291(O); E-mail: njapple@mail.csu.edu.cn

析光纤耦合器的工作原理, 介绍熔融拉锥法制作单模光纤耦合器的控制过程, 并讨论光纤耦合器的性能参数。

1 光纤耦合的工作原理

熔融拉锥法^[9]是将 2 根除去涂覆层的光纤以一定的方式靠拢, 然后置于高温下加热熔融, 同时向光纤两端拉伸, 最终在加热区形成双锥形的特殊波导耦合结构, 从而实现光纤耦合的一种方法。图 1 所示为熔融拉锥型光纤耦合器的结构模型。其中: W_1 和 W_2 分别为耦合结构的熔锥区 II 和 III 在光纤熔烧时的拉伸长度; W_0 为耦合区 I 的火焰宽度。耦合区的两光纤熔烧时逐渐变细, 两纤芯可忽略不计, 两包层合并在一起形成以包层为纤芯、芯外介质(空气)为新包层的复合波导结构, 实现两光纤的完全耦合。

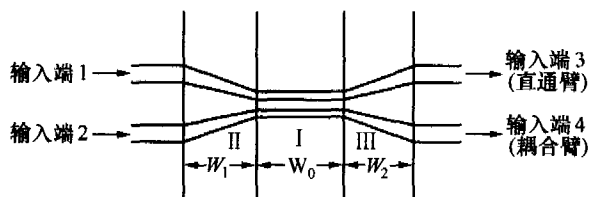


图 1 光纤耦合器的结构模型

Fig. 1 Structural model of fiber coupler

当入射光从输入端 1 进入熔锥区 II 后, 由于单模光纤的传导模为 2 个正交的基模信号, 因此, 光纤参量 V 随着纤芯的变细而逐渐变小, 导致越来越多的光渗入包层; 进入耦合区 I 后, 由于两光纤合并在一起, 光在以新的包层为纤芯的复合波导中传输, 并使光功率发生再分配; 当光进入熔锥区 III 后, 光纤参量 V 随纤芯的变粗而逐渐增大, 并使光以特定比例从输出端输出, 即一部分光从直通臂(输出端 3)直接输出, 另一部分光从耦合臂(输出端 4)输出。

在耦合区 I, 由于两光纤包层合并在一起, 纤芯足够逼近, 因此, 耦合器为两波导构成的弱耦合结构^[10-12]。根据弱耦合模理论分析可知: 相耦合的两波导中的场, 各保持该波导独立存在时的场分布和传输系数, 耦合的影响仅表现在场的复数振幅的变化。假设光纤是无吸收的, 则随拉伸长度 z 不断变化, 其变化规律可用一阶微分方程组表示如下:

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

式中: A_1 和 A_2 为两光纤的模场振幅; β_1 和 β_2 为两光纤在孤立状态下的传播常数; C_{11} 和 C_{22} 为自耦合系数; C_{12} 和 C_{21} 为互耦合系数。自耦合系数相对互耦合系数很小, 可以忽略, 且近似有 $C_{12} = C_{21} = C$ 。当方程组(1)在 $z=0$ 时满足 $A_1(z) = A_1(0)$, $A_2(z) = A_2(0)$, 其解为:

$$\begin{cases} A_1(z) = \exp(i\beta z) \left\{ A_1(0) \cos\left(\frac{C}{F}z\right) + iF \left[A_2(0) + \frac{\beta_1 - \beta_2}{2C} A_1(0) \right] \sin\left(\frac{C}{F}z\right) \right\}; \\ A_2(z) = \exp(i\beta z) \left\{ A_2(0) \cos\left(\frac{C}{F}z\right) + iF \left[A_2(0) - \frac{\beta_1 - \beta_2}{2C} A_2(0) \right] \sin\left(\frac{C}{F}z\right) \right\}. \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (3)$$

为两传播常数的平均值;

$$F = \left[1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

F^2 为光纤之间耦合的最大功率;

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0 W d / r}{r V^3 K_1 W} \quad (5)$$

为耦合系数, 且有:

$$\begin{cases} U = r(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{1/2}; \\ W = r(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{1/2}; \\ \Delta = \frac{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}}{2n_{co}^2}; \\ V = k r n_{co} (2\Delta)^{1/2}; \\ k = \frac{2\pi}{\lambda}. \end{cases} \quad (6)$$

其中: r 为光纤半径; d 为两光纤中心的间距; Δ 为光纤剖面高度参量; k 为波数; λ 为光波长; n_{co} 和 n_{cl} 分别为纤芯和包层的折射率; U 和 W 为光纤的纤芯和包层的参量; V 为孤立光纤的光纤参量; K_0 及 K_1 分别为零阶和一阶修正的第二类贝塞尔函数。

由此可得两输出端口的光功率为:

$$\begin{cases} P_3(z) = |A_1(z)|^2 = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right); \\ P_4(z) = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right). \end{cases} \quad (7)$$

假定光功率由光纤输出端 1 进入, 且归一化入射光功率为 $A_1(0) = 1$, $A_2(0) = 0$, 则 $P_3(0) = 1$, $P_4(0) = 0$ 。由于实验采用相同的光纤耦合, 即 $\beta_1 = \beta_2$, 故 $F^2 = 1$, 式(7)可转化为:

$$\begin{cases} P_3(z) = \cos^2(Cz); \\ P_4(z) = \sin^2(Cz). \end{cases} \quad (8)$$

其中 P_3 和 P_4 分别表示输出端 3 和 4 的光功率, 由式(8)可知, 两输出功率均为周期变换函数, 且周期

变化的快慢与耦合系数 C 及拉伸长度相关。如图 2 所示, 光功率在两耦合光纤间周期性地切换, 利用这一原理, 当耦合系数 C 确定后, 调整拉伸长度, 可以制作任意分光比的耦合器。

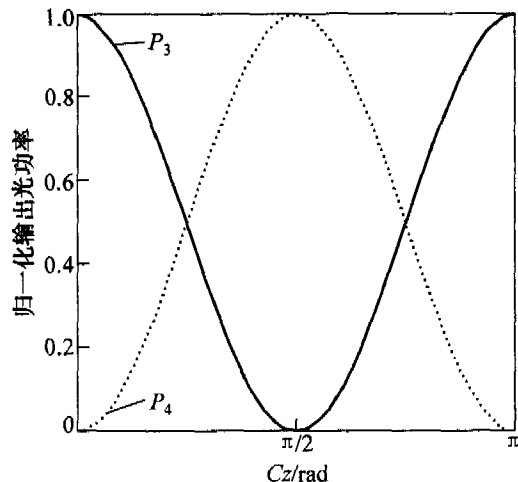


图 2 两输出端的归一化光功率

Fig. 2 Normalized powder ratio of two output ports

2 熔锥型光纤耦合器实验

选用康宁 SMF28 光纤, 纤芯折射率为 1.460, 直径为 $8.5 \mu\text{m}$, 包层折射率 1.456, 直径为 $125 \mu\text{m}$, 涂覆层直径为 $250 \mu\text{m}$ 。以 XYGD-SA2002 型六轴光纤耦合机为实验平台(见图 3), 选用高纯丙烷和高纯氧气燃烧获得熔融火焰, 采用 K 系数热电偶和 UJ-33 型电位差计测得火焰的温度为 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

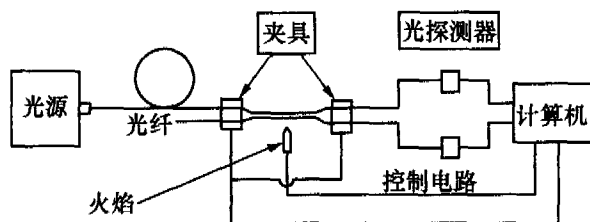


图 3 光纤耦合器实验框图

Fig. 3 Experimental frame of fiber optical couplers

在熔锥型光纤耦合器拉制前^[13-17], 需设定拉锥程序的各项参数, 如氧气和丙烷流量, 火头、夹具等位置, 分光比 R (即 $P_3 : P_4$) 及拉伸速度等; 还需对光纤进行预处理, 如光纤剥覆与清洁等; 此外, 还应注意保持光纤端面切削平整, 这样, 可降低功率损耗, 增大输出功率; 处理完后, 将两光纤扭绞固定在夹具上, 并用防尘罩将耦合段罩好, 以防止

灰尘等杂物影响耦合区的耦合。在光纤耦合器的拉制过程中, 光功率探测器将探测到的光功率转换成电信号, 利用数模转换电路转换成数字信号并传送到计算机系统, 计算机将这些数据处理后, 计算出相应的分光比、插入损耗和附加损耗等参数, 并实时显示。当输出端达到预先设定的分光比时, 计算机发出自动停止命令, 主拉锥平台自动停止工作, 并退出火焰。其流程如图 4 所示。

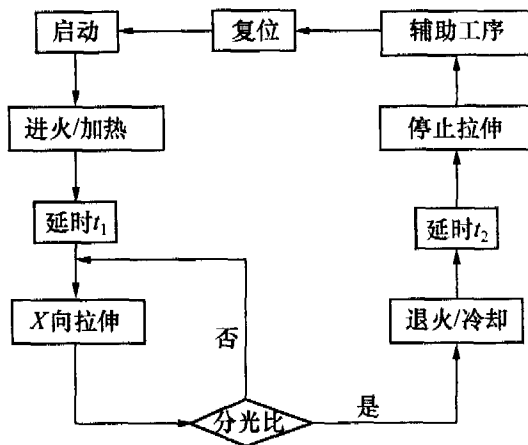


图 4 熔锥型光纤耦合器控制流程

Fig. 4 Flow chart of fabrication of fused fiber coupler

图 5 所示为光纤拉制时两输出端归一化光功率分配过程。输入端 1 的归一化功率 P_1 为 1; 而输入端 2 的归一化功率 P_2 为 0。在第 1 周期函数内, 随耦合结构不断拉伸耦合, 输出端 3 的光功率 P_3 不断减小, 输出端 4 的光功率 P_4 不断增加, 当分光比达到预设条件 (50 : 50) 时停止加热。通过分析式 (8) 与图 5, 耦合器的功率分配曲线与理论分析结果相吻合, 且分光比满足设定要求, 说明熔融拉锥法是可行的。图 6 和图 7 所示分别为在不同拉伸速度下耦合器的附加损耗和损耗偏差。可知, 拉伸速度对耦合器的性能影响较大, 当拉伸速度小于 $150 \mu\text{m/s}$ 时, 附加损耗及损耗偏差随着拉伸速度的增加而逐渐减小; 当拉伸速度大于 $150 \mu\text{m/s}$ 时, 附加损耗及损耗偏差随着拉伸速度的增加而逐渐增大; 当拉伸速度小于 $200 \mu\text{m/s}$ 时, 附加损耗及损耗偏差相对较小; 而当拉伸速度为 $150 \mu\text{m/s}$ 时, 附加损耗最小, 为 0.11 dB , 损耗偏差也最小, 为 0.09 dB 。此时, 耦合器性能最佳。采用安捷伦公司的光学测试系统^[18-20]测得拉伸速度为 $150 \mu\text{m/s}$, 分光比为 50 : 50 的 3 组光纤耦合器的各性能参数, 结果如表 1 所示。可见, 光纤耦合器的各性能参数均能很好地满足要求。

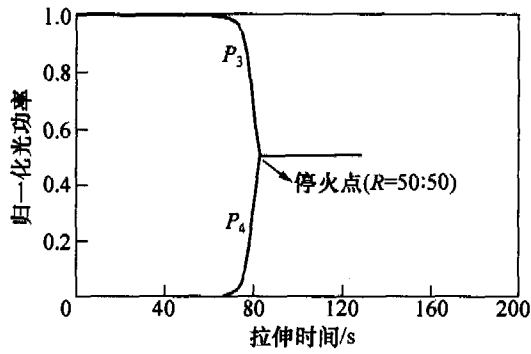


图 5 耦合区归一化光功率分配过程

Fig. 5 Distribution process of normalized power of coupling region

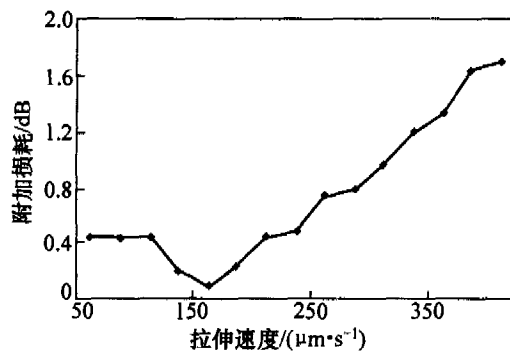


图 6 拉伸速度与附加损耗的关系

Fig. 6 Relationship between excess loss and drawing speed

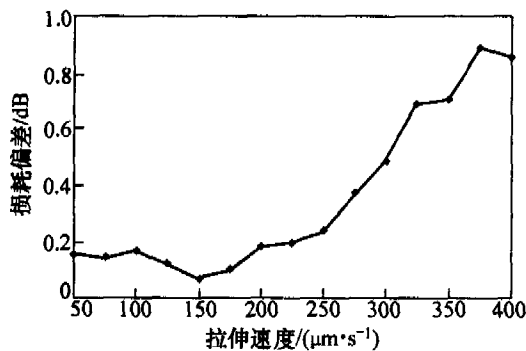


图 7 拉伸速度与损耗偏差的关系

Fig. 7 Relationship between tolerance of loss and drawing speed

表 1 耦合器的主要性能参数

Table 1 Main characteristic parameters of fibre coupler

输出端 3 插入损耗/dB	输出端 4 插入损耗/dB	附加损耗/ dB
3.0	3.1	0.09
3.1	2.9	0.11
3.0	3.2	0.12

3 结 论

a. 基于光纤的消逝场耦合模理论, 分析了光纤耦合器的工作原理; 采用熔融拉锥机和光学测试系统, 研究了熔融拉锥型 3 dB 光纤耦合器的制作过程; 分析了拉伸速度对损耗的影响。结果表明, 当拉伸速度为 150 $\mu\text{m}/\text{s}$ 时, 耦合器性能最佳。

b. 对拉制后的光纤耦合器进行光谱特性测试和分析, 结果表明, 各参数均满足性能指标。该方法具有制作过程简单、附加损耗低、不受环境影响以及成本低廉等优点。

c. 同时也证明熔锥法是目前制作光纤耦合器的最可行、最实用的方法。

参考文献:

- [1] Hsieh C H, Wu T L, Cheng W H. An optimum approach for fabrication of low loss fused fiber couplers [J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 69(7): 199-203.
- [2] Eisenmann M, Weidel E. Single-Mode fused biconical couplers for wavelength division multiplexing with channel spacing between 100 and 300 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(1): 113-119.
- [3] Eisenmann M, Weidel E. Single-mode fused biconical couplers optimized for polarization beam splitting[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(7): 853-858.
- [4] 宋金声. 我国光无源器件的技术发展合发展趋势[J]. 世界宽带网络, 2002, 9(11): 16-18.
SONG Jin-sheng. Technical evolvement and developing current of optical passive device in our country[J]. International Broadband Network, 2002, 9(11): 16-18.
- [5] 敖晖军. 全球光纤耦合器市场浅析[J]. 光纤通信, 2001, 23(2): 38-43.
AO Hui-jun. Market analysis of fiber coupler in global [J]. Optical Fiber Communication, 2001, 23(2): 38-43.
- [6] Sheem K S, Giallorenzi T G. Single-mode fiber-optical power divider; encapsulated etching technique[J]. Opt Lett, 1979, 4(1): 29-31.
- [7] Sheem K S, Giallorenzi T G. Single-mode fiber multi-

- terminal star directional coupler[J]. *Appl Phys Lett*, 1979, 35 (12): 914 - 929.
- [8] Bergh R A, Kotler G, Shaw H J. Single-mode fibre optic directional coupler[J]. *Electron Letter*, 1980, 16 (7): 260 - 263.
- [9] David S, Marco A F, Jessica A. A simple technique to obtain fused fiber optics couplers[J]. *Instrumentation and Development*, 2001, 5(3): 170 - 174.
- [10] 林学煌. 光无源器件[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
LIN Xue-huang. *Optical passive component*[M]. Beijing: People Posts and Telecommunications Press, 2001.
- [11] 李玲, 黄永清. 光纤通信基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
LI Ling, HUANG Yong-qing. *Fiber communication foundation*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [12] Salazar D, Felix M A, Jessica A V. A simple technique to obtain fused fiber optics couplers[J]. *Instrumentation and Development*, 2001, 5(3): 170 - 174.
- [13] 程嘉新. 熔锥型宽带光纤耦合器的研究[D]. 天津: 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 2002.
CHENG Jia-xin. *Study on fused biconical wideband fiber couplers*[D]. Tianjing: College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjing University, 2002.
- [14] 帅词俊, 段吉安, 苗健宇. 工艺参数对光纤耦合器性能影响的实验研究[J]. *光通信技术*, 2004, 12(7): 19 - 25.
SHUAI Ci-jun, DUAN Ji-an, MIAO Jian-yu. *Effect of technology parameters on performance and structural shape of fused biconical taper coupler*[J]. *Optic Fiber Communication Technology*, 2004, 12(7): 19 - 25.
- [15] Wong W, Choy L K. The manufacturing of an optical fiber coupler by the fusion elongation method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63 (1): 123 - 129.
- [16] HONG Li-feng, GE Chun-feng. The full wave optical fiber coupler of the fused tapered[J]. *Acta Physical Sinica*, 2003, 52(2): 390 - 394.
- [17] Wright J V. Variational analysis of fused tapered couplers[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(23): 1064 - 1065.
- [18] Nagata H. Chemical properties of fused fiber coupler surface[J]. *Optical Fiber Technol*, 2000, 6(3): 324 - 328.
- [19] Rodrigues J M, Maclean T S M, Gazey B K, et al. Completely fused tapered couplers: comparison of theoretical and experimental results[J]. *Electronics Letters*, 1986, 22(8): 402 - 404.
- [20] Lochmann S, Labs J M, Sharma A B. Accurate physical fusion taper shape model for waveguide analyses[J]. 1993, 29(20): 1785 - 1786.