

## 2×6 熔融拉锥型单模光纤耦合器的特性分析

许强<sup>1</sup> 黄肇明<sup>1</sup> 黄勇<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海大学通信学院, 上海 200033  
<sup>2</sup> 上海康阔光通信技术有限公司, 上海 201203)

**摘要:** 以线性耦合模方程为基础, 推导了在弱熔、弱耦条件下 2×6 熔融拉锥型单模光纤耦合器的传播常量、本征模以及各端口的功率分布情况, 并利用“熔融拉锥”法研制成功了两层排列结构的 2×6 单模光纤耦合器, 实验得到的功率分布与理论分析结果基本一致。

**关键词:** 导波与光纤光学; 熔锥; 六光纤; 耦合系统; 弱熔

中图分类号: TN252 文献标识码: A

### Analysis of Coupling Power for Fused-Biconical 2×6 Single-Mode Optical Fiber Coupler

Xu Qiang<sup>1</sup> Huang Zhaoming<sup>1</sup> Huang Yong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Communication Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072

<sup>2</sup> Comcore Optical Technologies, Inc., Shanghai 201203

upling  
. The  
pectral

**Abstract:** Based on linear couple mode equation, propagation constants, eigenmodes and power characteristics of 2×6 fused-biconical single-mode fiber coupler with weak fusion and weak couple were derived. Two layers 2×6 fiber coupler was fabricated by fused-biconical method. Experimental results obtained about spectral responses of the coupler are in good agreement with the theoretical results.

**Key words:** guided wave and fiber optics; fused-biconical; six fibers; coupling; weak fusion

## 1 引言

光纤通信系统正在向接入网、宽带网、密集波分复用系统和全光网方向发展, 对光纤无源器件的技术提出了新的更高的要求。低的附加损耗和宽带特性一直是衡量耦合器特性的重要指标。由于工艺上的限制, 以前的研究成果大多只分析了一个平面上的光纤耦合特性<sup>[1~3]</sup>。然而当光纤数量增加时, 平面型耦合器的研制会遇到困难。还有许多文献<sup>[4~6]</sup>报道了截面呈圆形分布的 1×N 光纤耦合器, 由于对称性的原因, 这种器件的理论分析和工艺制作相对比较容易。本文从理论和实践上研究了几何分布呈上下两层排列的 2×6 光纤耦合器。该器件不仅可以具有两个等价的输入端口, 同时对一次熔拉 N 个 1×2 光纤耦合器的工艺的实践也有一定的指导

意义。

## 2 理论分析

光纤耦合器的截面形状如图 1 所示。

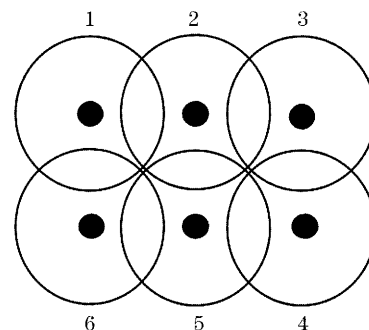


图 1 2×6 光纤耦合器的截面图

Fig. 1 Cross-section of 2×6 fiber coupl

作者简介: 许强(1975~), 男, 四川省成都市人, 上海大学硕士研究生, 主要从事光无源器件方面的研究。

E-mail: xuqiang828@sina.com

收稿日期: 2004-07-07; 收到修改稿日期: 2004-11-30

## 2.1 耦合模方程的建立与本征矢的推导

假定耦合系统最初是由六根具有相同参量的单模光纤组成的无损耗系统,它的几何分布如图 1 所示。耦合器耦合区光纤并不需要被熔拉得很细,而

且光纤之间均属弱熔,在通常的情况下,只考虑相邻光纤和对角光纤之间的耦合,则该耦合系统的耦合模方程为

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \\ a_4(z) \\ a_5(z) \\ a_6(z) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \beta_1 & K_1 & 0 & 0 & K_2 & K_1 \\ K_1 & \beta_2 & K_1 & K_2 & K_1 & K_2 \\ 0 & K_1 & \beta_1 & K_1 & K_2 & 0 \\ 0 & K_2 & K_1 & \beta_1 & K_1 & 0 \\ K_2 & K_1 & K_2 & K_1 & \beta_2 & K_1 \\ K_1 & K_2 & 0 & 0 & K_1 & \beta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \\ a_4(z) \\ a_5(z) \\ a_6(z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $a_j(z)$  ( $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) 为耦合器耦合区内第  $j$  根光纤内在  $z$  处的场振幅。由于各光纤在耦合区的实际位置不同,经拉锥后它们的实际传播常量存在一定的差异,故假定  $\beta_1$  为耦合区内光纤 1、3、4、6 的单模式传播常量,  $\beta_2$  为耦合区内光纤 2、5 的单模式传播常量,  $K_1$  为相邻光纤之间的耦合系数,  $K_2$  为对角光纤之间的耦合系数。由对称性, (1) 式可简化为

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_4(z) \\ a_5(z) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \beta_1 & K_1 & K_1 & K_2 \\ 2K_2 & \beta_2 & 2K_2 & K_1 \\ K_1 & K_2 & \beta_1 & K_1 \\ 2K_2 & K_1 & 2K_1 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_4(z) \\ a_5(z) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

利用矩阵理论,并假设光纤 2 内存在单位功率激励(初始条件),可以解得

$$\begin{cases} a_1(z) = \left[ -\frac{AB}{2(A-B)} e^{j\beta_A z} + \frac{AB}{2(A-B)} e^{j\beta_B z} - \frac{CD}{2(D-C)} e^{j\beta_C z} + \frac{CD}{2(D-C)} e^{j\beta_D z} \right] \phi_1(x, y), \\ a_2(z) = \left[ -\frac{B}{2(A-B)} e^{j\beta_A z} - \frac{A}{2(A-B)} e^{j\beta_B z} + \frac{D}{2(D-C)} e^{j\beta_C z} - \frac{C}{2(D-C)} e^{j\beta_D z} \right] \phi_2(x, y), \\ a_3(z) = \left[ -\frac{AB}{2(A-B)} e^{j\beta_A z} - \frac{AB}{2(A-B)} e^{j\beta_B z} - \frac{CD}{2(D-C)} e^{j\beta_C z} + \frac{CD}{2(D-C)} e^{j\beta_D z} \right] \phi_3(x, y), \\ a_4(z) = \left[ \frac{B}{2(A-B)} e^{j\beta_A z} - \frac{A}{2(A-B)} e^{j\beta_B z} - \frac{D}{2(D-C)} e^{j\beta_C z} - \frac{C}{2(D-C)} e^{j\beta_D z} \right] \phi_4(x, y), \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\phi_1(x, y), \phi_2(x, y), \phi_3(x, y), \phi_4(x, y)$  是组合波导内的四个本征模,组合波导内四个本征模  $(A, B, C, D)$  的传播常量分别为

$$\beta_A = r + s, \quad \beta_B = r - s, \quad \beta_C = u + v, \quad \beta_D = u - v, \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} r = \frac{1}{2}\beta_1 + \frac{1}{2}\beta_2 - K_1, & s = \frac{1}{2}(\beta_1^2 - 2\beta_1\beta_2 + \beta_2^2 + 8K_1^2 - 16K_1K_2 + 8K_2^2)^{1/2}, \\ u = \frac{1}{2}\beta_1 + \frac{1}{2}\beta_2 + K_1, & v = \frac{1}{2}(\beta_1^2 - 2\beta_1\beta_2 + \beta_2^2 + 8K_1^2 + 16K_1K_2 + 8K_2^2), \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} A = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\beta_1 - \frac{1}{2}\beta_2 + s\right) / (K_1 - K_2), & B = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\beta_1 - \frac{1}{2}\beta_2 - s\right) / (K_1 - K_2), \\ C = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\beta_1 - \frac{1}{2}\beta_2 - v\right) / (K_1 + K_2), & D = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\beta_1 - \frac{1}{2}\beta_2 + v\right) / (K_1 + K_2), \end{cases} \quad (6)$$

由第  $i$  根光纤的功率  $P_i(z) = a_i(z)a_i^*(z)$  得到

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1(z) = 2a^2 + 2b^2 - 2a^2 \cos(2sz) + 2abc \cos[(r+s-u-v)z] - 2ab \cos[(r+s-u+v)z] - \\ \quad 2abc \cos[(r-s-u-v)z] + 2abc \cos[(r-s-u+v)z] - 2b^2 \cos(2\tau z), \\ P_2(z) = c^2 + d^2 + e^2 + f^2 - 2cd \cos(2sz) - 2df \cos[(r+s-u-v)z] + 2ed \cos[(r+s-u+v)z] + \\ \quad 2cf \cos[(r-s-u-v)z] - 2\alpha e \cos[(r-s-u+v)z] - 2ef \cos(2\tau z), \\ P_3(z) = P_1(z), \\ P_4(z) = 2a^2 + 2b^2 - 2a^2 \cos(2sz) - 2abc \cos[(r+s-u-v)z] + 2ab \cos[(r+s-u+v)z] + \\ \quad 2abc \cos[(r-s-u-v)z] - 2abc \cos[(r-s-u+v)z] - 2b^2 \cos(2\tau z), \\ P_5(z) = c^2 + d^2 + e^2 + f^2 - 2cd \cos(2sz) + 2df \cos[(r+s-u-v)z] - 2ed \cos[(r+s-u+v)z] - \\ \quad 2cf \cos[(r-s-u-v)z] + 2\alpha e \cos[(r-s-u+v)z] - 2ef \cos(2\tau z), \\ P_6(z) = P_4(z), \end{array} \right. \quad (7)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{AB}{2(A-B)}, \quad b = \frac{CD}{2(A-B)}, \quad c = \frac{A}{2(A-B)}, \\ d = \frac{B}{2(A-B)}, \quad e = \frac{C}{2(D-C)}, \quad f = \frac{D}{2(D-C)}, \end{array} \right. \quad (8)$$

为了找到六根光纤具有相等耦合的等功率点,使用计算机对耦合系数和传播常量进行搜索,图 2(a)~图 2(c)表示当  $K_1, K_2, \beta_1, \beta_2$  取不同比值时,耦合区内各光纤的光功率随归一化传输距离  $z/L$  的变化关系,  $L$  为在  $K_1, K_2$  不变的情况下,六根光纤实现相互之间的能量转换所需要的最短的耦合长度。

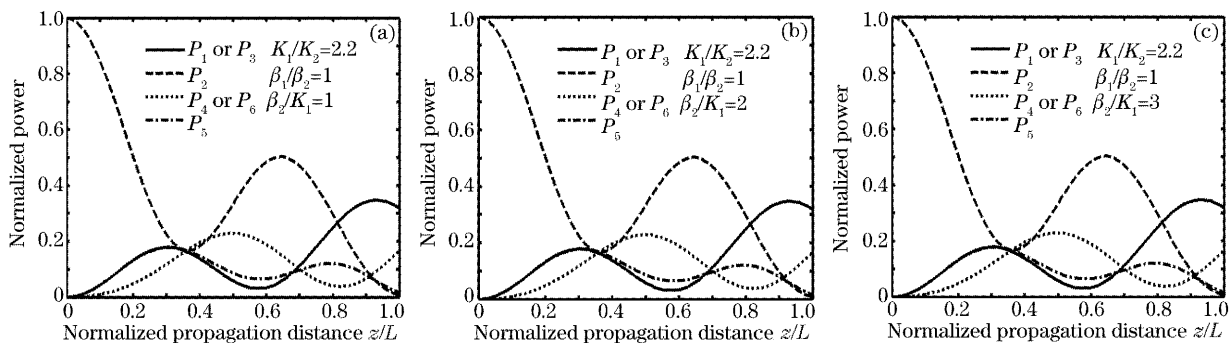


图 2 光纤 2 内存在单位功率激励,  $K_1, K_2, \beta_1, \beta_2$  间不同耦合系数比的条件下各光纤的功率耦合特性

Fig. 2 The power coupling characteristics of fibers with different given ration among  $K_1, K_2, \beta_1, \beta_2$  in the case of excitation to fiber 2

对搜索的结果进行分析,发现等功率点只和  $K_1$  和  $K_2$  的比值有关。而且只要当  $K_1$  和  $K_2$  的比值取定以后,无论怎么变化它们与  $\beta_1$  或者  $\beta_2$  的关系,功率分布丝毫不受影响。图 2(a)~图 2(c)就说明了这一点。同时,发现等功率点是在  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的比值为 1 的条件下找到的。总结以上两点,可以得出两点结论:

1)  $\beta_1 = \beta_2$  说明在研制这种器件时不用使用特殊的注入光纤,或者采取预拉技术。

2)  $K_1$  和  $K_2$  的比值取定后光纤的功率分布就基本确定,这说明只要对火头进行调节,通过控制熔融程度达到控制耦合比,那么就一定能研制出这种耦合器件。当然以上假设都是在弱熔这个前提下做出的。

### 3 实验结果与分析

由于这种耦合器特殊的几何分布,如何在熔拉时保持每根光纤的相对位置就成了能否研制出该器件的关键之一。为此,研制了特制的夹具。同时从理论分析中知道要使 6 根光纤能够等分功率,一定要找到合适的  $K_1$  和  $K_2$  比,映射到实践中就是要控制光纤之间的熔融程度。利用自己研制的夹具,在多次实践中通过不断地修正火焰和光纤的相对位置以及氢氧的比例,终于找到了能够实现等功率分布的一套技术参量。图 3(a)给出了这种器件的功率谱试验曲线,可以看出  $P_1$  和  $P_3$  完全重合,  $P_4$  和  $P_6$  几乎完全重合,总的来说实验得到的曲线走势和理论分析得到的曲线走势完全一致。  $P_1$  到  $P_6$  的插损

分别为 8.71 dB、7.52 dB、8.88 dB、6.84 dB、7.61 dB、7.39 dB, 光纤耦合器的总附加损耗在 0.3 dB 左右, 均匀性为 2 dB, 基本达到实用的标准。

同时, 还可以看到这种耦合器在等功率点上也有较好的频带特性, 基本达到宽带器件的要求。

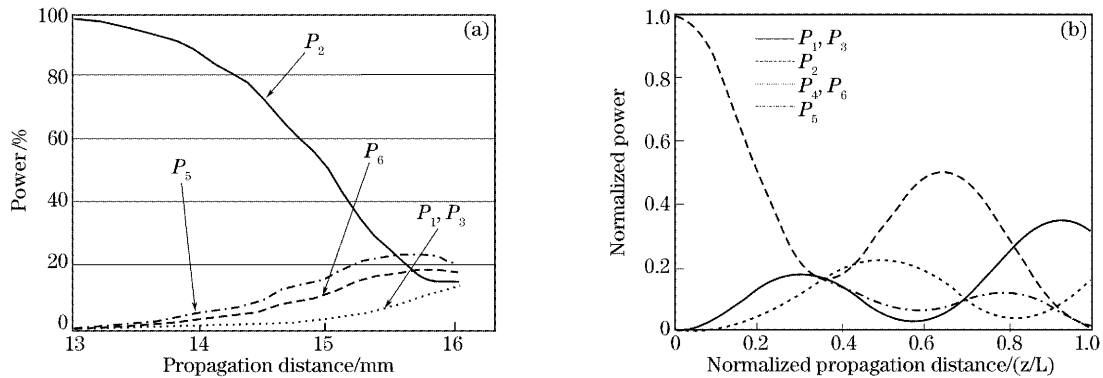


图 3  $2 \times 6$  耦合器的 (a) 实验测得的功率谱响应; (b) 理论计算得到的功率谱响应

Fig. 3 (a) Measured power spectra response of  $2 \times 6$  coupler, (b) theoretical power spectra response of  $2 \times 6$  coupler

## 4 结 论

以线性耦合模方程为基础, 分析了  $2 \times 6$  光纤耦合器的功率耦合特性, 得到了较为一般的功率表达式, 这个结果通过实验得到了证实。研制出来的器件具有较好的性能指标, 而且工艺简单, 适合生产, 有较大的经济和实用价值。

**致谢** 本课题得到了上海康阔光通信技术有限公司研发部部长张琦的大力帮助, 自此深表感谢。

## 参 考 文 献

1 Huang Yong, Zeng Qingji. Analysis of coupling characteristics of three fused-biconical planar optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 847~852 (in Chinese)  
黄 勇, 曾庆济. 熔锥平面型三光纤耦合特性分析[J]. *光学学报*,

1994, **14**(8): 847~852

- 2 Huang Yong, Gao Hongyuan, Yao Shouquan *et al.*. Study of a planar coupling system consisting of four single-mode optical fibers. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(3): 275~279 (in Chinese)  
黄 勇, 高宏源, 姚寿铨 等. 平面型四光纤耦合系统的研究[J]. *光学学报*, 1994, **14**(3): 275~279
- 3 Yao Shouquan, Huang Yong, Lu Shanda. Analysis of coupling power for fused-biconical linear format  $3 \times 3$  single mode optical fiber directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(11): 1040~1046 (in Chinese)  
姚寿铨, 黄 勇, 陆善达. 熔锥直线型  $3 \times 3$  单模光纤定向耦合器的光功率耦合分析[J]. *光学学报*, 1990, **10**(11): 1040~1046
- 4 D. B. Mortimore, J. W. Arkwright. Monolithic wavelength-flattened  $1 \times 7$  single-mode fused coupler[J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(9): 606~607
- 5 C. V. Cryan, D. W. Stowe. Wavelength-insensitive single-mode fused tapered  $1 \times N$  couplers[C]. *OFC'96 Technical Digest*, Thursday Afternoon. 243~244
- 6 D. B. Mortimore, J. W. Arkwright. Performance tuning of  $1 \times 7$  wavelength-flattened fused fibre couplers[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(18): 1442~1443