

平面型四光纤耦合系统的研究

黄 勇 高宏源* 姚寿铨** 曾庆济

(上海交通大学光纤技术研究所, 上海 200052)

摘 要 以线性耦合波方程为基础, 导出了在弱熔情况下平面型四光纤耦合系统的传播常数、本征模以及功率耦合特性, 并首次利用“熔拉”法研制成功了平面型四光纤耦合器, 得到的耦合器谱响应实验结果与理论结果基本一致.

关键词 平面型, 四光纤, 耦合.

1 引 言

光纤耦合器是现代光纤通信、光信号处理及光纤传感系统中不可缺少的关键元件. 目前对直线型耦合系统特性研究的文章较多^[1~2]. Yamashita 利用场的“点匹配”方法, 分析了呈平面型排列的四芯光纤耦合特性^[2], 虽然这种方法能比较精确地满足场的边界条件, 并得到较为精确的结果. 然而, 对于所处理的弱熔光纤耦合系统, 就没有必要采用“点匹配”法, 而是直接可以利用线性耦合波方程来分析平面型四光纤耦合系统的耦合特性.

2 基本理论

平面型四光纤耦合系统的横截面如图 1 所示. 假定耦合系统是由四根全同的单模光纤所组成的无损耗系统, 并且只考虑相邻光纤之间的直接耦合, 则该耦合系统的耦合波方程为:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \\ a_4(z) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} \beta_0 & K & 0 & 0 \\ K & \beta_0 & K & 0 \\ 0 & K & \beta_0 & K \\ 0 & 0 & K & \beta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_3(z) \\ a_4(z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $a_i(z)$ 为耦合区内第 i 根光纤内在 z 处的场振幅, $i = 1, 2, 3, 4$, β_0 为耦合区内任一孤立光纤的单模传播常数, K 为相邻光纤之间的耦合系数, $j = \sqrt{-1}$. 利用矩阵理论^[3], 根据(1)式, 得到耦合区组合波导内四个本征模的传播常数分别为:

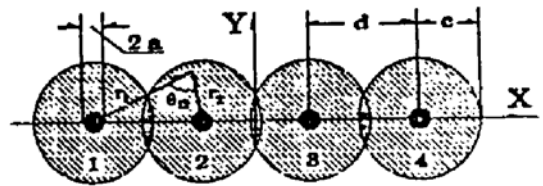


Fig. 1 Cross-sectional geometry of a planar coupling system consisting of four identical single-mode optical fibers

收稿日期: 1992年10月5日; 收到修改稿日期: 1992年12月7日

* 常州电子职工大学, 常州 213000 ** 上海科技大学光纤所, 上海 201800

$$\beta_A = \beta_0 + \chi K, \quad \beta_B = \beta_0 + K/\chi, \quad \beta_C = \beta_0 - K/\chi, \quad \beta_D = \beta_0 - \chi K, \quad (2)$$

这里 $\chi = (1 + \sqrt{5})/2$. 由三角场近似可得^[4]:

$$\beta_0 = \sqrt{k^2 n_1^2 + \frac{I_1 - \pi}{\pi c^2/6}}, \quad K = \frac{I_2}{\beta_0 \cdot \pi c^2/3}, \quad (3)$$

式中 k 为自由空间的波数, n_1 为光纤芯的折射率, c 为光纤的半径,

$$I_1 = \pi a^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2) \left(1 - \frac{4a}{3c} + \frac{a^2}{2c^2}\right), \quad I_2 = \frac{1}{c^2} \iint_{B_{12}} \cos \theta_{12} dx dy, \quad (4)$$

式中 n_2 为光纤包层的折射率, B_{12} 为光纤 1 和 2 的交迭区, θ_{12} 如图 1 所示. 需要指出的是 k, n_1, n_2 都与波长有关. 将(3)式代入(2)式, 可以得到四个归一化传播常数随归一化光纤间距的变化关系, 图 2 中 d 为光纤经拉细后的芯间距, 而 d_0 为未拉细时的芯间距, 这里假定了 d 不随 z 变化. 当光纤的间距缩小时, 光纤的芯也随之缩小, 从而导致光纤中传输模场的扩展^[4], 使得光纤间的耦合系数 K 不断增大. 在一般的情况下, 当耦合区任意光纤的特征值 $V = ak \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 1$ 时, K 才开始不为零^[5], 这一点从图 2 中也可看出.

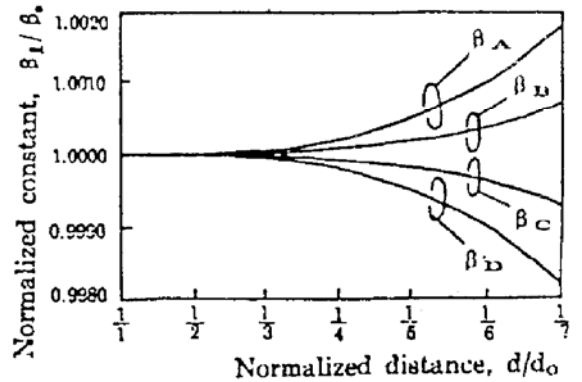


Fig. 2 The relation between four normalized propagation constants β_i/β_0 and normalized cores distance d/d_0

另外, 利用(1)、(2)式, 通过简单计算得四个归一化本征矢分别为:

$$B_A = \zeta \begin{bmatrix} 1 \\ \chi \\ \chi \\ 1 \end{bmatrix}, \quad B_B = \zeta \begin{bmatrix} -\chi \\ -1 \\ 1 \\ \chi \end{bmatrix}, \quad B_C = \zeta \begin{bmatrix} \chi \\ -1 \\ -1 \\ \chi \end{bmatrix}, \quad B_D = \zeta \begin{bmatrix} -1 \\ \chi \\ -\chi \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

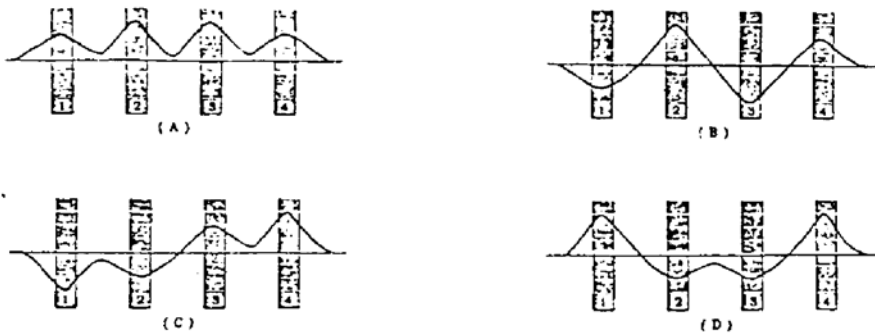


Fig. 3 Field distributions of four eigenmodes in composite waveguide in coupling region of a coupler

这里 $\zeta = 1/\sqrt{2(1 + \chi^2)}$. 则由(5)式可画出组合波导内四个本征模的模场分布, 如图 3 所示. 它们分别是由耦合区中每根孤立光纤中所传播的基模的线性组合而成的. 因此, 对于每个组合波导模在第 i 根光纤内存在一个分量. 由此可以得出, 在任意 z 处, 第 i 根光纤内所传播的场振幅就等于四个组合波导模分别在第 i 根光纤内场分量的迭加. 下面将分别分析在不同初始激励条件下, 耦合系统的功率耦合特性.

2.1 光纤 1 内存在单位功率激励源

假定耦合区内每根光纤能独立传输的归一化单模场为 ϕ_i , $i = 1, 2, 3, 4$. 当光纤 1 在 $z = 0$ 处存在单位功率的初始激励源时, 设四个组合波导模的模激发系数分别为 b_A, b_B, b_C, b_D , 则在 $z = 0$ 处有:

$$\left. \begin{aligned} P_1(0) &= \iint_{F_1} \phi_1^2 [b_A - \chi b_B + \chi b_C - b_D]^2 dx dy = 1, \\ P_2(0) &= \iint_{F_2} \phi_2^2 [\chi b_A - b_B - b_C + \chi b_D]^2 dx dy = 0 \\ P_3(0) &= \iint_{F_3} \phi_3^2 [\chi b_A + b_B - b_C - \chi b_D]^2 dx dy = 0, \\ P_4(0) &= \iint_{F_4} \phi_4^2 [b_A + \chi b_B + \chi b_C + b_D]^2 dx dy = 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $P_i(0)$, F_i , $i = 1, 2, 3, 4$, 分别为第 i 根光纤在 $z = 0$ 处的光功率和积分域在第 i 根光纤的横截面内. 由(6)式可得:

$$b_A = \zeta^2, \quad b_B = -\chi \zeta^2, \quad b_C = \chi \zeta^2, \quad b_D = -\zeta^2. \quad (7)$$

由(5), (7)式, 并经整理立即可得耦合区内每根光纤内在任意 z 处的场振幅, 分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} a_1(z) &= 2\zeta^2 \cdot [\cos(\chi Kz) + x^2 \cos(Kz/\chi)] \cdot \exp(i\beta_0 z), \\ a_2(z) &= j2\chi \zeta^2 \cdot [\sin(\chi Kz) + \sin(Kz/\chi)] \cdot \exp(i\beta_0 z), \\ a_3(z) &= 2\chi \zeta^2 \cdot [\cos(\chi Kz) - \cos(Kz/\chi)] \cdot \exp(i\beta_0 z), \\ a_4(z) &= j2\chi \zeta^2 \cdot [\sin(\chi Kz) - x^2 \sin(Kz/\chi)] \cdot \exp(i\beta_0 z). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因此, 在任意 z 处, 第 i 根光纤内所传播的功率为:

$$P_i(z) = a_i(z)a_i^*(z), \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (9)$$

可以证明

$$\sum_{i=1}^4 P_i(z) \equiv 1. \quad (10)$$

图 4 画出了在光纤 1 受初始单位光功率激励时, 耦合区内各光纤内的光功率随归一化传输距离, z/L 的变化关系, L 为在耦合系数 K 不变的情况下, 二光纤间实现能量全转换所需的最短耦合长度. 图 4 的结果与文献[2]中图 7 的结果是一致的.

2.2 光纤 2 存在初始单位激励光功率

当耦合区在 $z = 0$ 处, 在光纤 2 内存在单位激励光功率, 则(6)式应变为:

$$\left. \begin{aligned} P_1(0) &= \iint_{F_1} \phi_1^2 [b_A - \chi b_B + \chi b_C - b_D]^2 dx dy = 0, \\ P_2(0) &= \iint_{F_2} \phi_2^2 [\chi b_A - b_B - b_C + \chi b_D]^2 dx dy = 1, \\ P_3(0) &= \iint_{F_3} \phi_3^2 [\chi b_A + b_B - b_C - \chi b_D]^2 dx dy = 0, \\ P_4(0) &= \iint_{F_4} \phi_4^2 [b_A + \chi b_B + \chi b_C + b_D]^2 dx dy = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

求解(7)式就可得到在此初始激励条件下耦合区组合波导内四个本征模的模激发系数, 依次为:

$$b_A = \chi\zeta^2, \quad b_B = -\zeta^2, \quad b_C = -\zeta^2, \quad b_D = \chi\zeta^2 \quad (12)$$

由(5)、(12)式可得到,在任意 z 处每根光纤内的场振幅分别为:

$$\left. \begin{aligned} a_1(z) &= 2j\chi\zeta^2 [\sin(\chi Kz) + \sin(Kz/\chi)] \cdot \exp(j\beta_0 z), \\ a_2(z) &= 2\zeta^2 [\chi^2 \cos(\chi Kz) + \cos(Kz/\chi)] \cdot \exp(j\beta_0 z), \\ a_3(z) &= 2j\zeta^2 [\chi^2 \sin(\chi Kz) - \sin(Kz/\chi)] \cdot \exp(j\beta_0 z), \\ a_4(z) &= 2\chi\zeta^2 [\cos(\chi Kz) - \cos(Kz/\chi)] \cdot \exp(j\beta_0 z). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

则耦合区每根光纤内所传输的光功率为:

$$P_i(z) = a_i(z)a_i^*(z), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

图 5 表示了在光纤 2 存在单位功率激励时,耦合区各光纤内所传输的光功率随归一化传输距离 z/L 的变化关系,该结果也与文献[2]中图 8 的结果较为一致.

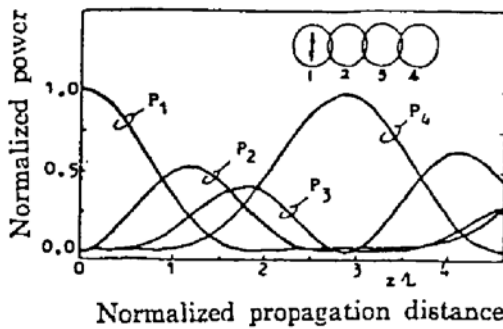


Fig. 4 The coupling characteristics of a planar coupling system consisting of four identical single-mode optical fibers in the case of the excitation to the first fiber

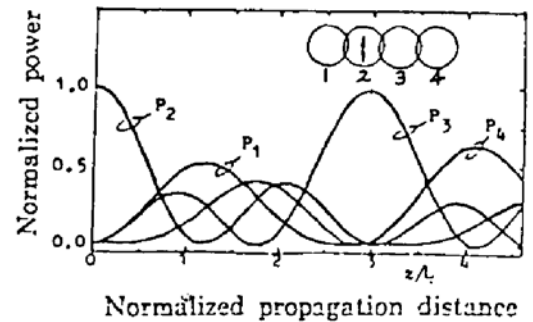


Fig. 5 The coupling characteristics of a planar coupling system consisting of four identical single-mode optical fibers in the case of the excitation to the second fiber

另外,由于耦合系统结构的对称性(如图 1),当光纤 3 存在激励源时,其耦合结果与光纤 2 存在激励源时的情况相同.而光纤 4 存在激励源时,其耦合特性与光纤 1 存在激励源的情况相同.需要指出的是:在 $z = 0$ 处,耦合区同时存在几个激励源时,也可用上述类似的方法,先写出初始条件,然后求出各本征模的模激励系数数 b_l , $l = A, B, C, D$.

3 实验结果与讨论

根据作者多年来研制耦合器^[6,7]所积累的经验,利用“直接加热”熔拉法将四根呈平面型排列的光纤一次熔拉成一个具有平面型结构的八端口耦合器.实验表明:耦合区的横截面很大程度上是由熔融光纤的火焰的温度和熔拉时间决定的.因此要想得到一个具有比较理想耦合特性的耦合器,就必须掌握各种影响因素.图 6 是一个实际平面型四光纤耦合器耦合区的横截面照片.它具有较好的对称性,而且光纤间的芯间距也比较一致.通过显微镜测量,在耦合器的有效耦合区内(即 $V \leq 1$),光纤的半径、芯半径及芯间距可近似地用以下公式表示,如图 7 所示

$$\left. \begin{aligned} c(z) &= 28.4 - 19.43 \exp(-z/z_0)^2 \mu\text{m}, & z \leq z_0 \\ a(z) &= 2.0 - 1.26 \exp(-z/z_0)^2 \mu\text{m}, & z \leq z_0 \\ d(z) &= 51.1 - 39.50 \exp(-z/z_0)^2 \mu\text{m}. & z \leq z_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由(4)式可得，耦合系数 K 与 z 有关，因此(10)、(15)式中的 Kz 必须用下式代替

$$Kz = 2 \int_0^{z_0} K(z) \cdot z dz, \quad z_0 = 4.79 \text{ mm} \quad (16)$$

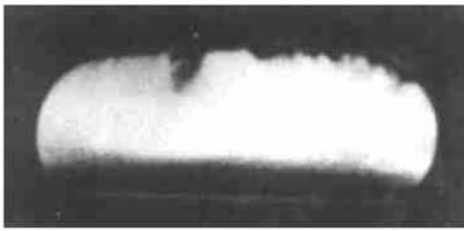


Fig. 6 Cross section at waist of a well fused biconical region

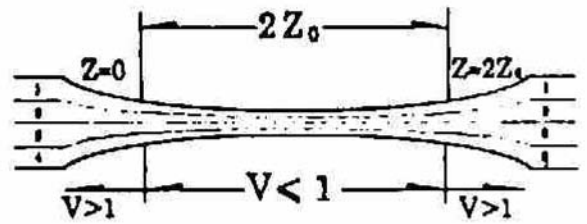


Fig. 7 Schematic configuration of the fused biconical region of a planar 4x4 coupler

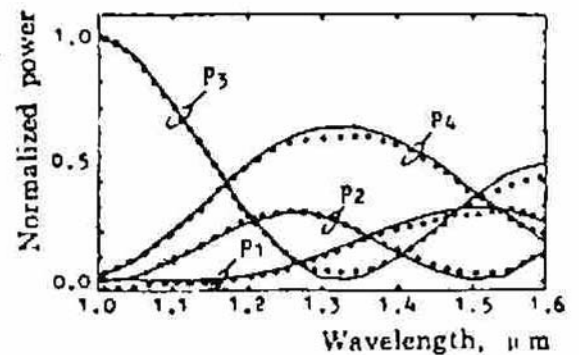
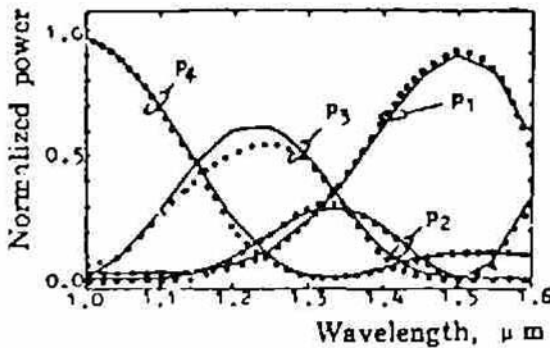


Fig. 8 Wavelength responding curves in two different exciting conditions, respectively, in which dark lines are theoretical results using triangular field approximation and dot lines are experimental results

(16)式分别代入(8)及(13)式，并由(9)及(14)式，即可得到在两种激励条件下的耦合器每一个输出端的功率谱，如图 8(a)、图 8(b)中的实线。而图中的点线是实验结果，其测量的实验框图如图 9 所示。由于只有一个探测器，因此，在波长 1.0~1.6 μm 的范围内，先测完一个输出端口的功率谱，依次直到测完为止。从图 8 中可发现，实验曲线与理论曲线较吻合。

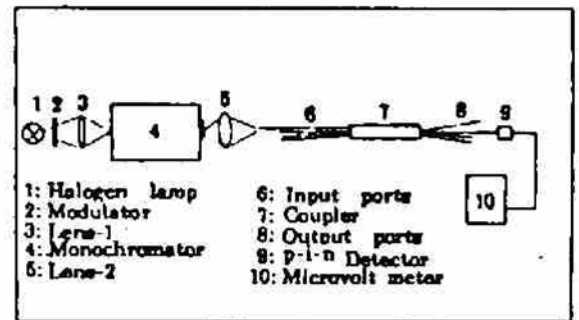


Fig. 9 Measurement system of spectral response

4 结 论

利用线性耦合波方程，导出了具有弱熔的平面型四光纤耦合系统的传播常数、本征模以及光纤间功率耦合特性，并用实验验证了耦合器谱响应的理论曲线，较为吻合。另外，作者研制成功了具有平面结构的四光纤耦合器，它的尺寸与常规的 3 dB 耦合器差不多，而且器件的附加损耗也比较小，只有 0.5 dB 左右。

参 考 文 献

- [1] Hiroshi Kubo, Kiyotoshi Yasumtd, Numerical analysis of three-parallel embedded optical waveguide. *J. Lightwave Tech.*, 1989, 7(12): 1924~1931
- [2] Naoto Kishi, Eikichi Yamashita, Hirokazu Kawabta, Modal and coupling field analysis of optical fibers with linearly distribution multiple cores. *J. Lightwave Tech.*, 1989, 7(6): 902~907
- [3] 李高代, 矩阵理论及其应用, 重庆, 重庆大学出版社, 1989, 52~57
- [4] J. V. Wright, Variational analysis of fused tapered couplers. *Electron Lett.*, 1985, 21(23): 1064~1065
- [5] L. C. Bobb, P. M. Shankar, H. D. Krumbolta, Bending effects in biconically tapered single-mode fibers. *J. Lightwave Tech.*, 1990, 8(7): 1084~1090
- [6] 姚寿铨, 黄 勇, 刘慧珍, 熔锥直线型 3×3 单模光纤定向耦合器的光功率耦合分析. 光学学报, 1990, 10(11): 1040~1046
- [7] 姚寿铨, 黄 勇, 谢国平, 正方分布的 4×4 单模光纤熔锥耦合器耦合特性分析. 光学学报, 1991, 11(5): 460~464

Study of a Planar Coupling System Consisting of Four Single-Mode Optical Fibers

Huang Yong Gao Hongyuan* Yao Shouquan** Zeng Qinji

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

(Received 5 October 1992; revised 7 December 1992)

Abstract On the base of linearly coupled mode equations, we have derived propagation constants, eigenmodes, and characteristics of power coupling for a planar coupling system consisting of four fibers with weak fusion, and fabricated the planar couplar consisting four identical fibers for the first times. The obtained experimental results about spectral responses of the coupler are in good agreement with theoretical results.

Key words planar, four fibers, coupling.