

实际 1×3 单模光纤分束器的特性分析

黄 勇 曾庆济

(上海交通大学光纤技术研究所, 上海 200052)

摘 要 利用五层对称平面介质波导的特征方程, 导出了具有波导一体化结构的实际 1×3 单模光纤分束器的模场特性及其光纤间光耦合特性, 并给出了实验结果.

关键词 单模光纤, 分束器.

1 引 言

对于 1×3 单模光纤耦合器早有报道, 而且还专门研究了它的光耦合特性^[1~4]. 但是, 这些文献所选取的分析模型与实际情况存在较大的差异. 文献[2]把耦合区的波导看作是完全相同的, 它不能解释具有较细耦合区分束器的谱响应特性. 另外, 由于分束器耦合区较细, 空气 (n_3) 已对耦合区的场分布产生一定的影响, 因此不能把原光纤的包层 (n_2) 看作无限大, 这是文献[4]在分析三光纤耦合系统时所存在的不足之处.

本文提出一种有别于组合波导模型^[5], 而更接近于实际 1×3 分束器的模型. 采用类似于 Marcattili 解矩形介质波导的方法^[6], 将多层矩形波导模型分解为两个垂直交叉的多层平板波导, 并求解多层平板波导得到实际分束器在耦合区每个独立传输场的传播常数及场分布. 最后再利用耦合波方程求得实际 1×3 分束器的光耦合特性.

2 理论分析

根据实际器件的横截面^[4], 可以近似地用图 1 所示的矩型波导代替. 由于原独立光纤细致使其场不断扩展, 这不仅局限于各自光纤的包层中, 而可能扩展到整个分束器耦合区内. 当然, 对于非常弱耦合的分束器^[7], 可以认为其场仅扩展到自身的包层中, 并可用三角场近似^[8]分析其光耦合特性. 为了求解如图 1 结构的光耦合特性, 首先把它分解为三个等效波导, 如图 2(a)~(c) 所示, 其中图 2(a)对应于原光纤 1 的波导结构, 图 2(b)、图 2(c)分别对应于原光纤 2、3 的波导结构. 这里假定它们具有完全相同的芯径. 利用

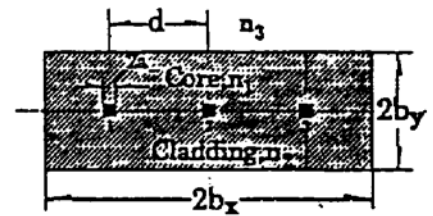


Fig. 1 Model of rectangular waveguide for 1×3 splitter

类似于 Marcatili 解矩形波导的方法^[6]，将多层矩形波导分解为两个垂直交叉的多层平板波导。对图 2(b)可分解为两个对称的五层平板波导，如图 3(a)、图 3(b)所示。

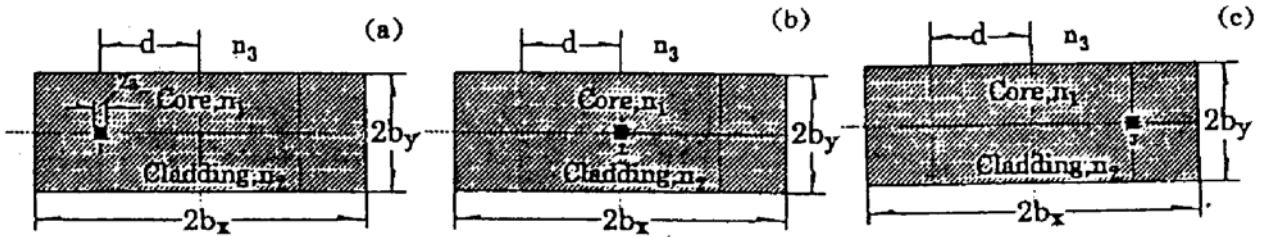


Fig. 2 Three equivalent rectangular waveguides in which (a) corresponds to original fiber 1, (b) and (c) correspond to original fibers 2 and 3, respectively

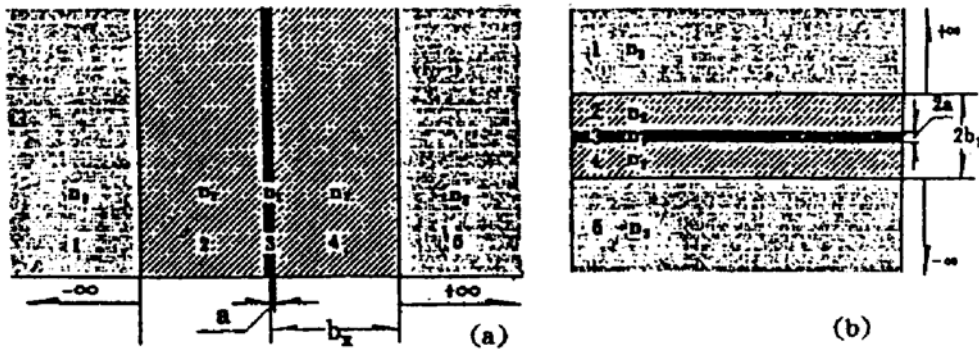


Fig. 3 Two symmetric five-layer planar optical waveguides

在弱波导近似下^[9]， x 方向偏振的多层矩形波导基模 E_{11} (对应于光纤中 LP_{01} 模) 的传播常数 β_x 为

$$\beta_x = (k_0^2 n_1^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2} \tag{1}$$

式中 k_x 由垂直放置的对称五层平板波导 TM_1 模的特征方程解出^[11]：

$$\left. \begin{aligned} k_x a + \tan^{-1} \left[\frac{1 + \delta R}{1 - \delta R} \frac{1}{\tan \phi_1} \right] &= \frac{\pi}{2} \\ \delta = \exp [-2\alpha_1(b_x - a)], \quad R &= (1 - \tan \phi_2)/(1 + \tan \phi_2), \quad \tan \phi_1 = n_1^2 \alpha_1 / (n_2^2 k_x) \\ \tan \phi_2 = n_2^2 \alpha_2 / (n_3^2 \alpha_1), \quad \alpha_1 &= (k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_2^2 - k_x^2)^{1/2}, \quad \alpha_2 = (k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_3^2 - k_x^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

k_y 由水平放置的对称五层平板波导 (见图 3(b)) TE_1 模的特征方程解出

$$\left. \begin{aligned} k_y a + \tan^{-1} \left[\frac{1 + \delta R}{1 - \delta R} \frac{1}{\tan \phi_1} \right] &= \frac{\pi}{2} \\ \delta = \exp [-2\alpha_1(b_y - a)], \quad \tan \phi_1 = \alpha_1 / k_y, \quad \tan \phi_2 = \alpha_2 / \alpha_1, \\ \alpha_1 = (k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_2^2 - k_y^2)^{1/2}, \quad \alpha_2 &= (k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_3^2 - k_y^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

从而由(1)式可求得图 3(b)中基模的传播常数 β_2 。而对于图 3(a)、图 3(c)对应的基模传播常数，严格来说应该由垂直放置的非对称五层平板波导所求得的 k_x 和由水平放置的对称五层平板波导所求得的 k_y 决定。为了避免求解非对称五层平板波导的特征方程， k_x 分别由 k_{x1}, k_{x2} 决定

$$k_x = (k_{x1} + k_{x2})/2 \tag{4}$$

k_{x1}, k_{x2} 分别从(2)式中求得，所不同的是，求 k_{x1} 时 $\delta = \exp [-2\alpha_1(b_x + d - a)]$ ；求 k_{x2} ，需 δ

$= \exp[-2\alpha_1(b_1 - d - a)]$. 而 k_y 由(3)式求得, 从而就可得到一体化波导中三个独立场的传播常数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$. 从图 1 中可以得出: 假定芯间距相等, 则 $\beta_1 = \beta_3$, 由于实际的器件不可完全相同, 故 β_1 和 β_3 之间存在微小的差异. 图 4 给出了具有相等芯间距各独立模场的传播常数随芯径的变化关系. 从图中可以看出, $\beta_2 > \beta_1 = \beta_3$, 折射率 n_3 (空气) 对传播常数的影响在 $a > 1$ 的区域并没有明显的反映出来, 这与文献[9]给出的结论是一致的. 根据文献[11]中(3)式通过数值计算得到 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, 并画出了 $a=0.33 \mu\text{m}$ 时三个独立模的场分布, 如图 5 所示. 显然, 模场 1 和模场 3 在 x 方向上是不对称的, 而在 y 方向上是对称的.

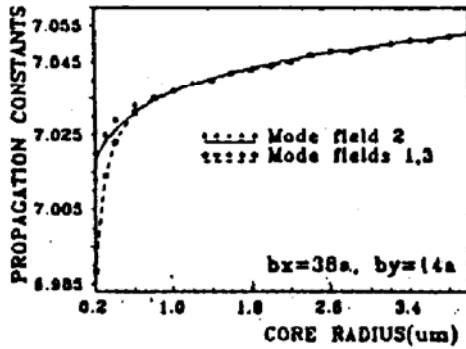


Fig. 4 Propagation constants of isolative mode-fields versus radius of core of optical fiber

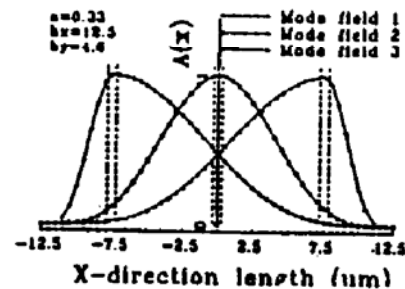


Fig. 5 Mode-field distributions of three isolative modes with core radius being $0.33 \mu\text{m}$

1) 弱熔、芯间距不等的情况

弱熔时 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ ^[8], 由于芯间距不等, 光纤 1、2 之间和光纤 2、3 之间的耦合系数是不相同的, 假定分别为 C_1 和 C_2 , 则 1×3 分束器的输出光功率为:

$$P_1 = (C_1^2/A^2)\sin^2(Al), \quad P_2 = \cos^2(Al), \quad P_3 = (C_2^2/A^2)\sin^2(Al) \quad (5)$$

式中 $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$, l 为分束器的有效耦合长度. 当 $C_1 = C_2$ 时, 与文献[3]中(18)式相同, 图 6 给出了不同 C_1, C_2 值的分束器功率谱曲线. C_1, C_2 差别越大, 在同一波长下它们的功率差也就越大. 因此, 要想得到一个分光比较好的器件, 就必须保证分束器耦合区具有极好的对称性. 另外需要指出的是, 对于 P_2 , 其输出光功率的变化规律没有任何影响, 它仍能够将自身波导内的光功率在确定的波长下完全耦合到 P_1 及 P_3 中.

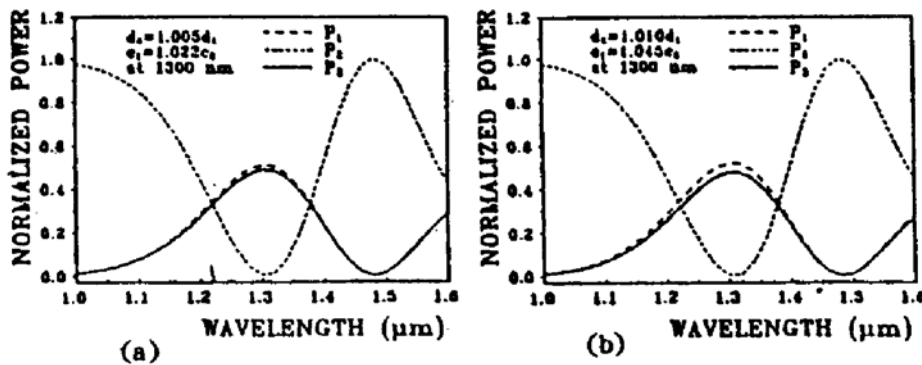


Fig. 6 Normalized power spectral response for $C_1/C_2 = 1.022$ and $C_1/C_2 = 1.045$ when initial core 2 is excited using unit power

2) 强熔、芯间距不等的情况

这是一个极为普遍的情况. 由前面对称五层平板波导的分析结果得到, 此时 $\beta_1 \neq \beta_2 \neq$

β_3 , 但是相对来说, β_1 、 β_3 比较接近. 对这样的耦合系统^[11], 其计算相当繁复, 在此仅给出主要结果. 对 1×3 分束器, 在受单位功率激励的情况下, 三光纤的输出光功率分别为

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= (1/D^2)[a_1b_1\exp(i\lambda_1z) + a_2b_2\exp(i\lambda_2z) + a_3b_3\exp(i\lambda_3z)]^2 \\ P_2 &= (1/D^2)[b_1\exp(i\lambda_1z) + b_2\exp(i\lambda_2z) + b_3\exp(i\lambda_3z)]^2 \\ P_3 &= (1/D^2)[v_1b_1\exp(i\lambda_1z) + v_2b_2\exp(i\lambda_2z) + v_3b_3\exp(i\lambda_3z)]^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_j &= 2H\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos k\left\{(1/2H^3)[A\beta_2(C_{32}C_{23} - C_{13}C_{31}) + A\beta_3(C_{23}C_{32} - C_{12}C_{21}) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + C_{12}C_{23}C_{31} + C_{21}C_{32}C_{13} + A\beta_1A\beta_2A\beta_3]\right\} + (2\pi/3x_j - 1)\right) \\ H &= [(1/3)(C_{12}C_{21} + C_{31}C_{13} + C_{23}C_{32} + A\beta_3^2 + A\beta_2A\beta_3)]^{1/2} \\ A\beta_j &= \beta_j - \beta_{av}, \quad \beta_{av} = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)/3, \quad j = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 C_{jk} 为第 j 根光纤导模与第 k 根光纤导模的耦合系数.

$$\left. \begin{aligned} a_j &= \frac{(\lambda_j - A\beta_2)C_{13} + C_{12}C_{23}}{(\lambda_j - A\beta_1)C_{23} + C_{21}C_{13}}, \quad v_j = \frac{(\lambda_j - A\beta_2)(\lambda_j - A\beta_1) - C_{12}C_{21}}{(\lambda_j - A\beta_1)C_{23} + C_{21}C_{13}} \quad j = 1, 2, 3 \\ b_1 &= (a_2v_3 - a_3v_2), \quad b_2 = (a_3v_1 - a_1v_3), \quad b_3 = (a_1v_2 - a_2v_1), \\ D &= a_2v_3 - a_3v_2 - a_1v_3 + a_3v_1 + a_1v_2 - a_2v_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据(6)~(8)式, 通过数值计算, 得到了两种具有不同参数的 1×3 分束器的功率谱曲线, 如图 7(a)、图(b)所示. 相比而言, 在图 7(a)中 β_2 与 β_1 的差值要比图 7(b)中的小, 故 P_2 的最小值在图 7(a)中要比图 7(b)中低. 但是由于在图 7(a)中的 C_1 、 C_2 差要比图 7(b)中的大, 所以在特定的波长下, 图 7(a)中的 P_1 和 P_3 之差要比图 7(b)中的大, 因此, 如何控制分束器耦合区的结构是决定分束器性能的关键.

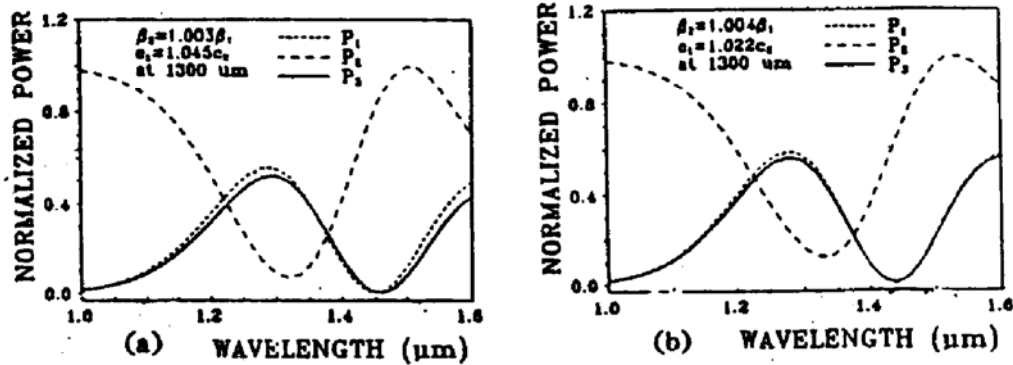


Fig. 7 Normalized power spectral response for $C_1/C_2 = 1.045$ with $\beta_2/\beta_1 = 1.003$ and $C_1/C_2 = 1.022$ with $\beta_2/\beta_1 = 1.004$

3 实验结果与分析

本文采用直接加热熔拉的方法研制了多种具有三光纤结构的器件^[4,12], 而 1×3 分束器是最成熟的器件. 它的腰区横截面与文献[4]中的完全一样. 图 8 是一个具有 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$, $C_1 \neq C_2$ 的分束器谱响应曲线, 由于其耦合区拉锥长度较短, 所以谱响应灵敏度比较低, 谱曲线比较平滑. 与图 6(a)的结果是一致的. 图 9 是故意造成器件不对称后得到的功率谱, 这种不对称性主要是由于加热体的不对称和放置光纤不对称造成的, 它对应于 $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$, $C_1 \neq C_2$ 的情况. 由于 $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$, 发现 P_2 的最低点已不可能为零, 即所谓不可实现功率全转移^[13].

同时由于 C_1 、 C_2 之间的差值增大, P_1 和 P_3 在很大的波长范围内明显分开, 因此, 这种分束器的分束比是极不平衡的, 谱特性较差. 图 10 表示了一个在 $1.3 \mu\text{m}$ 波段具有绝对不变分束比的 1×2 分束器^[11]. 这种器件不使用输出端 P_2 , 只用 P_1 、 P_3 , 它必须具有非常好的耦合区对称性.

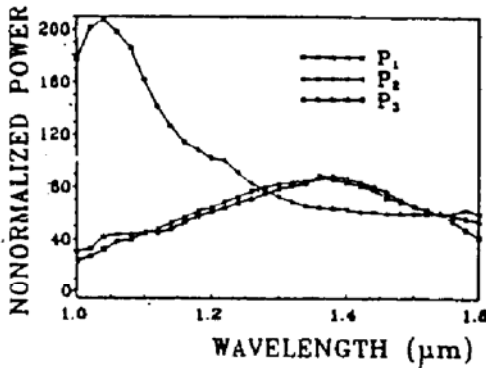


Fig. 8 Nonnormalized power spectral curves with $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$ and $C_1 \neq C_2$

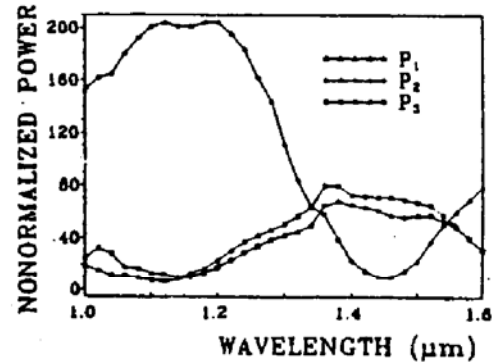


Fig. 9 Nonnormalized power spectral curves with $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$ and $C_1 \neq C_2$

4 结 论

利用一体化波导结构模型, 并采用对称五层平面波导的方法, 详细地分析了实际 1×3 分束器的光功率耦合特性, 指出了造成实际分束器分光比畸变的原因. 给出的实验结果与理论分析结果完全一致. 因此, 本文工作对提高 1×3 分束器的性能具有一定的参考价值.

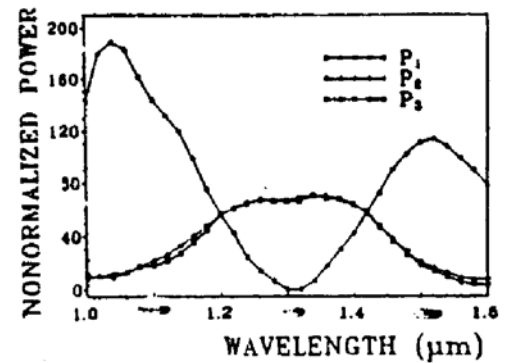


Fig. 10 Nonnormalized power spectral response of a 1×2 splitter consisting of three optical fibers with invariable splitting ratio

参 考 文 献

- [1] Hiroshi Kubo, Kiyotoshi Yasumoto, Numerical analysis of three-parallel embedded optical waveguides. *Lightwave Technol.*, 1989, 7(12): 1924~1931
- [2] Chang Chuangwen, Chuang Weiching, Chang Wayseen, Analysis of the coupling characteristics of three guide coupler with symmetric Tuning. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 1992, 15(11): 563~565
- [3] 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): 1010~1016
- [4] 黄勇, 姚寿铨, 三光纤耦合系统的研究. *光学学报*, 1994, 14(8): 847~853
- [5] Paney, F. P., Hussey, C. D., Yataki, M. S., Modelling fused single mode fiber couplers. *Electron. Lett.*, 1985, 21(4): 461~462
- [6] E. A. J. Marcatili, Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, 68(9): 2071~2102
- [7] Paney, F. P., Hussey, C. D., Yataki, M. S., Polarization Analysis of Stringly Fused and weakly fused tapered couplers. *Electron. Lett.*, 1985, 21(13): 561~563
- [8] J. V. Wright, Variational analysis of fused tapered couplers. *Electron. Lett.*, 1985, 21(23): 1064~1065

- [9] Gloge, D., Weakly guiding fiber. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(10): 2252~2258
- [10] 王子华, 对称五层平面介质光波导的渐近展开. 上海科技大学学报, 1991, **14**(3): 63~69
- [11] Y. Chen, Asymmetric triple core couplers. *Opt. and Quant. Electron.*, 1992, **24**(5): 539~553
- [12] 姚寿铨, 黄 勇, 谢国平, 正方分布 4×4 单模光纤熔锥耦合器的耦合特性分析. 光学学报, 1990, **11**(5): 460~464
- [13] H. A. Haus, Lynne molter-orr, Coupled multiple waveguide systems. *J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(5): 840~844
- [14] A. Niu, C. M. Fitzgerald, T. A. Birks *et al.*, 1×3 linear array singlemode fiber couplers. *Electron. Lett.* 1992, **28**(25): 2330~2332

Analysis of Characteristics of Practical 1×3 Single-Mode Optical Fiber Splitters

Huang Yong Zeng Qingji

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

(Received 2 July 1993)

Abstract In this paper, the characteristics of mode fields and optical power coupling among optical fibers of practical 1×3 single-mode optical fiber splitters with a integrative structure of waveguide are derived by using the eigenvalue equation of the symmetric five-layer planar optical waveguide, and the experimental results are given.

Key words single-mode optical fiber, splitter.