

宽频带熔锥型耦合器的变化分析

陆善达 陈锡坤 顾炳生 张旭 陆炫

(上海科技大学物理系, 上海 201800)

陆 焯

(上海大学工学院, 上海 200000)

提 要

利用变分法对腐蚀熔锥型非对称单模光纤耦合器的耦合特性进行了分析。文中根据耦合器的光纤参数及截面尺寸,用有效平行波导模型,对自制的弱融型熔锥耦合器的转换功率随波长变化曲线进行了计算。结果表明:不仅宽频带特性的理论曲线与实验符合得较好,而且耦合器的耦合特性对二光纤的芯径比及熔锥长度的变化十分灵敏,这也与实验相符。

关键词 光纤,耦合器,变分法。

1 引 言

常规的熔锥型单模光纤定向耦合器,因它损耗低、已得到广泛的使用。然而它有一个明显的特点,即分束比随工作波长的变化相当灵敏。通常使用的标称波长的半导体光源,其中心波长实际上并不一致,且随工作温度而变。中心波长的这些偏离往往使3dB耦合器的分束比误差远大于 $\pm 10\%$ ^[1,2]。显然这种常规耦合器也不适用于今后大容量波分复用网络和其他对不同光波长进行功率分配的场所。

本文利用腐蚀法将其中一根光纤在耦合区的直径变细,使两光纤在耦合区芯径有适当的差别。这样,在熔融拉锥以后两光纤在耦合区各自的本征模传播常数不同,导致熔锥型耦合器组合波导内,实现两光纤功率转换的两个最低阶对称和反对称模,其拍耦合的最终结果,使光功率不能在两光纤间实现全转换,从而得到了波长响应相当平坦的3dB单模光纤耦合器。我们的宽频带熔锥耦合器的腰部横截面照片为哑铃形,显然属弱融耦合。基于这一事实,本文根据其纵向和横向截面尺寸,用变分法计算了非对称臂耦合器的耦合功率随波长变化的理论曲线,其宽频带特性与实验相一致。

2 变 分 分 析

熔融拉锥制成的耦合器,在耦合区主光纤内折射率为 n_1 的光纤芯中的场扩展到折射率为 n_2 的包层中,从而激励出副光纤中的场。普遍认为这类熔锥耦合器的耦合机理是组合波导内两个最低阶对称(基模)和反对称模的相拍^[1,3]。对弱熔融情况,组合波导横截面内的

场, 可以看成由两根单独的原折射率为 n_2 的包层与周围介质(空气或其他封装介质)构成的阶跃折射率分布的单模光纤本征模场贝塞尔函数的叠加. 熔锥区原折射率为 n_1 的光纤芯, 在拉锥以后虽然极细, 但由于 n_1 的影响, 使 n_2 区域贝塞尔函数本征模场的精确解趋于三角形模场^[3]. 周围介质折射率低于 n_2 时, 模场分布无显著变化, 因此组合波导仍满足弱光导近似^[4], 传播模 $\psi_{0,1} = \psi_{\pm} e^{-i\beta_{\pm} z}$ 满足标量亥姆霍茨方程. β_{\pm} 分别为对称模 ψ_0 和反对称模 ψ_1 的传播常数. 组合波导横截面内 (x, y) 位置的最低阶对称模场(基模) ψ_+ 和反对称模场 ψ_- 可表示为

$$\psi_+(x, y) = b_+ \{ [1 - (r_1/c_1)] + a_+ [1 - (r_2/c_2)] \}, \tag{1}$$

$$\psi_-(x, y) = b_- \{ [1 - (r_1/c_1)] - a_- [1 - (r_2/c_2)] \}, \tag{2}$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= [x + d_1]^2 + y^2)^{1/2}, & r_2 &= [(x - d_1)^2 + y^2]^{1/2}, \\ d_1 &= (d^2 - c_2^2 + c_1^2)/2d, & d_2 &= (d^2 + c_2^2 - c_1^2)/2d, & d &= d_1 + d_2, \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中 d_1 、 d_2 分别为两光纤中心到坐标原点 o 的距离, r_1 、 r_2 为考察点 (x, y) 到两光纤芯中心的距离, c_1 、 c_2 和 a_1 、 a_2 为拉细后原光纤包层半径和芯半径. a_{\pm} 和 b_{\pm} 为相应的耦合系数. 耦合器横截面参数如图 1 所示. 图中的 θ 为 r_1 和 r_2 间的夹角. ψ_{\pm} 相互间应满足正交条件, 对弱熔融情况可得到

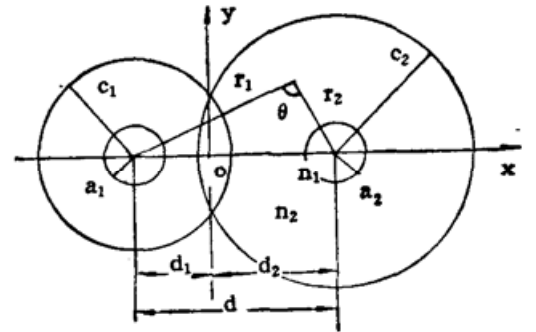


Fig. 1 Cross-section of asymmetric coupler

$$\left. \begin{aligned} a_- &= [(\pi/6)c_1^2 + I a_+] / [(\pi/6)c_2^2 a_+ + I], \\ I &= \iint_B [1 - (r_1/c_1)] [1 - (r_2/c_2)] dx dy, \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中 B 为两光纤交叠部分面积. ψ_0 和 ψ_1 代入亥姆霍茨方程后, 可得传播常数的变分表达式

$$\left. \begin{aligned} \beta_{\pm}^2 &= \frac{\iint [n^2(r) k^2 \psi_{\pm}^2 - (\partial \psi_{\pm} / \partial x)^2 - (\partial \psi_{\pm} / \partial y)^2] dx dy}{\iint \psi_{\pm}^2 dx dy} \\ &= k^2 n_2^2 + \frac{I_1 + a_{\pm}^2 I_p - [\pi(1 + a_{\pm}^2) \pm 2a_{\pm} I_p]}{(\pi/6)c_1^2 + a_{\pm}(\pi/6)c_2^2 \pm 2a_{\pm} I}, \\ I_p &= \frac{1}{c_1 c_2} \iint_B \cos \theta dx dy, & I_m &= \pi a_m^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2) [1 - (4a_m/3c_m) + (a_m^2/2c_m^2)], \\ & & & (m=1, 2) \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中 k 为自由空间波数, 由(5)式可得相应的耦合拍长 z_c 为

$$z_c = \pi / (\beta_+ - \beta_-). \tag{6}$$

对某个波长, 基模的传播常数应满足 $(\partial \beta_+^2 / \partial a_+) = 0$, 从而确定 a_+ , 进而确定 a_- 、 β_{\pm} 和 z_c .

熔锥区采用有效平行波导代替, 并考虑到在耦合起始点 $z=0$ 处, 副光纤中光功率 $P_2=0$ 的边界条件, 可得到经平行段耦合长度 z 后, 转换到副光纤中的功率

$$P_2 = P_{2max} \sin^2(\sigma z / 2z_c). \tag{7}$$

因为经一个拍长 $z=z_c$ 的耦合, ψ_+ 和 ψ_- 反相, 故直接在光纤 2 截面中积分得

$$P_{2\max} = \int_2 (\psi_+ - \psi_-)^2 dx dy = \frac{4a_+^2 a_-^2}{(a_+ + a_-)^2} \cdot \frac{c_2^2}{c_1^2} \quad (8)$$

3 实验与计算

本文研制的宽带耦合器,用外径为 $123 \mu\text{m}$ 、芯径为 $8.8 \mu\text{m}$ 、 $n_1=1.462$ 、 $n_2=1.457$ 的阶跃型单模光纤。拉锥前将其中一根在熔锥区的外径用氢氟酸腐蚀到 $108 \mu\text{m}$ 。熔融拉锥以后,用万能工具显微镜测量其纵向截面尺寸,并根据耦合器腰部截面尺寸(如图 2 所示)和未形变截面尺寸,对纵向双锥形外径按照 $2c(z) = 2c_{\max} - 2c_0 \exp(-\alpha z^2)$ 进行拟合。这里 $2c_{\max}$ 为未形变拉锥粗(或细)光纤横截面尺寸, $2c_0$ 为粗(或细)光纤腰部横截面缩减尺寸。由于功率转换主要发生在规格化频率 $V = ak \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 1$ 的区域^[5],取宽带耦合器工作波长 $1.24 \mu\text{m}$ 到 $1.60 \mu\text{m}$ 范围内的中心波长,计算熔锥区粗光纤 $V=1$ 处的芯半径 a ,从而确定此处的 $c(z)$,进一步确定粗光纤双锥形耦合长度 z 。在这一长度范围内,分别对粗细两光纤耦合段的外半径取平均,在拟合精度内得有效平行段参数 $c_1=15.4 \mu\text{m}$, $c_2=16.5 \mu\text{m}$, $d=28.7 \mu\text{m}$ 。参照图 1,对不同工作波长和相应的耦合长度 z ,根据(1)~(8)式,用计算机计算副光纤 2 中耦合功率随波长变化的理论曲线,如图 3 所示,图中的打叉点为该耦合器的耦合功率随波长变化的实测结果。理论和实验值间的偏离在耦合器中心波长附近最大。 $1.38 \mu\text{m}$ 处为理论曲线的峰值位置,分束比为 53.3% ,相应的实验值为 61.0% 。分束比的最大实验值在 $1.40 \mu\text{m}$ 处,为 61.5% ,相应的理论值为 52.9% 。在曲线的两侧,分束比的实验与理论值间的偏离比中间小许多。理论和实验符合得较好。用腐蚀熔锥法制成的宽频带耦合器的技术性能为:在 $1.24 \mu\text{m} \sim 1.59 \mu\text{m}$ 范围内(即带宽为 350 nm), 3 dB 耦合器的分束比误差 $< \pm 10\%$,插入损耗 $< 0.3 \text{ dB}$,隔离度 $> 60 \text{ dB}$,允许工作温度为 $\sim 40 \sim +80^\circ\text{C}$ 。封装器件的分束比变化情况与图 3 基本相同。

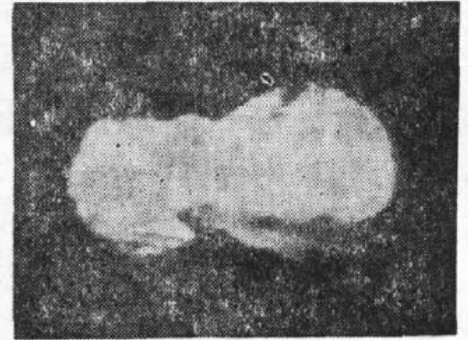


Fig. 2 Cross-section in the taper's waist of our coupler

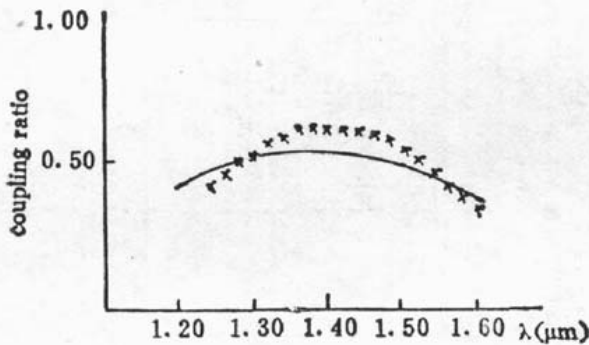


Fig. 3 Wavelength response of the coupling ratio

Full: theoretical curve
cross: Experimental values

Full: theoretical curve
cross: Experimental values

在曲线的两侧,分束比的实验与理论值间的偏离比中间小许多。理论和实验符合得较好。用腐蚀熔锥法制成的宽频带耦合器的技术性能为:在 $1.24 \mu\text{m} \sim 1.59 \mu\text{m}$ 范围内(即带宽为 350 nm), 3 dB 耦合器的分束比误差 $< \pm 10\%$,插入损耗 $< 0.3 \text{ dB}$,隔离度 $> 60 \text{ dB}$,允许工作温度为 $\sim 40 \sim +80^\circ\text{C}$ 。封装器件的分束比变化情况与图 3 基本相同。

4 讨 论

对非对称熔锥耦合器,用拍耦合模型计算耦合功率随波长变化的理论曲线,与实验符合得较好,这表明只要控制好耦合器熔锥区两光纤的尺寸比,可得到性能良好的宽频带单模光纤耦合器。根据这一物理思路,研制成了这样的耦合器。计算表明,耦合器的波谱特性对

c_1 、 c_2 和 d 相当敏感。这与实验中要得到性能良好的宽带耦合器，必须严格控制光纤尺寸和拉锥长度是一致的。由于影响耦合器功率耦合分束比的因素很多，如光纤各区段截面尺寸、形状、折射率分布等，不可能完全一致；耦合器加工过程中不可避免地受到应力的影响等等，都有可能使理论曲线和实验数据发生偏离。

参加过本工作的还有冯昕、龚秀龙和陈为群等。感谢机电部 23 研究所，上海新沪玻璃厂，上海科大光纤研究所，在光纤和器件参数测试方面所给予的帮助。感谢陈翼强博士在本文理论计算方面所给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 陆善达, 冯明和, 黄 勇. 宽温低损耗单模光纤定向耦合器, 光学学报, 1989, 9(1): 93~96
- [2] D. B. Mortimore, Wavelength-Flattened Fused couplers. *Electronics Letters*, 1985, 21(17): 742~743
- [3] J. V. Wright, Variational analysis of Fused tapered couplers. *Electronics Letters*, 1985, 21(23): 1064~1065
- [4] G. 格劳著, 陆善达译. 光通信技术导论, 北京: 科学出版社, 1987: 31~45
- [5] D. T. Cassidy, D.C. Johnson, K. O. Hill, Wavelength-dependent transmission of monomode optical fiber tapers. *Applied Optics*, 1985, 24(7): 945~950

Variational analysis of wavelength-flattened fused tapered couplers

LU SHANDA CHEN XIKUN GU BINGSHENG ZHANG XU LU XUAN
(Department of Physics, Shanghai University of Science and Technology Shanghai 201800)

LU YE

(College of Engineering, Shanghai University, Shanghai 200041)

(Received 20 September 1991; revised 19 February 1992)

Abstract

This paper describes the variation of coupled power with wavelength in the etched fused asymmetric single-mode couplers by using variational technique. According to the fiber parameters and sectional dimensions we analyzed the wavelength response of our lightly fused coupler using effective parallel waveguides. The theoretical curve of the wavelength-flattened coupler is in good agreement with the experimental results. The analysis indicates that the wavelength response of the coupler is sensitive to the diameter ratio of two fibres and the coupling length. This also agrees with the experiment.

Key words optical fiber, coupler, variational technique.