

熔锥型光纤耦合器宽带特性研究

顾炳生

(上海科学技术大学物理系, 上海 201800)

摘 要 报道了在常规熔锥型单模光纤定向耦合器工艺基础上, 以氢氟酸腐蚀法, 将两光纤耦合区直径腐蚀成适当比例, 用水平直接熔融拉锥系统, 将耦合区域拉制成非对称臂组合波导, 从而获得了具有宽频带特性、且尺寸较小的单模光纤定向耦合器。实验结果说明: 通过控制耦合区长度, 可以使耦合器耦合功率在某个特定波长附近、预定小于 100% 分束比上具有相当平坦(宽带)特性; 从而, 通过控制组合波导的不同直径比, 可望得到不同分束比宽带耦合器。

关键词 宽带特性, 耦合器, 分束比。

1 引 言

常规熔锥型耦合器以其低损耗、温度稳定性好、结构坚固及容易制造而受到人们喜爱。然而常规对称臂光纤定向耦合器有个明显缺点, 即分束比随工作波长变化相当灵敏。由于工程上使用的半导体光源产品, 其中心波长并不一致, 中心波长间的这些偏离使分束比误差大于 $\pm 10\%$, 而且半导体光源的发射波长还随结温而变。这种频带十分狭窄的对称臂耦合器实用时很不理想, 也不能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需要。因此本文对光纤耦合器带宽特性与组合波导尺寸之间关系进行了研究。

2 原 理

根据文献[1, 2]两光纤在熔锥区的粗细配合适当, 则功率随波长变化最大转换点高度几乎是在对称臂耦合器功率随波长变化曲线的 50% 处, 该点随波长变化最不灵敏。图 1(a) 为对

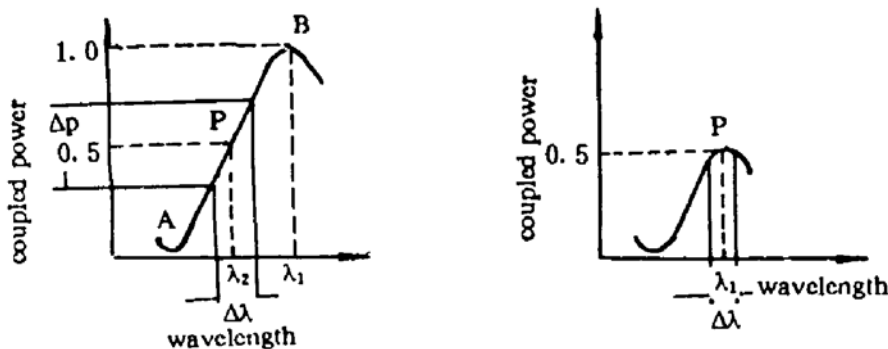


Fig. 1 (a) spectral of standard fused coupled power normalised to input power

(b) coupled power against wavelength

称臂耦合器转换功率随波长变化的曲线。在 P 点附近, 功率转换随波长变化最灵敏。如果两光纤在拉锥以后, 各自的本征模传播常数不同, 导致组合波导内两最低阶对称和反对称模拍耦合的最终结果使光功率在两光纤间不能象对称臂一样实现全转换, 如图 1(b) 所示, 在 P 点附近功率转换随波长变化最不灵敏。因此, 只要两光纤耦合区尺寸控制恰当, 可以得到波长响应平坦的 3dB 单模光纤耦合器。

2.1 耦合机理

图 2 为非对称耦合器中心区域横截面。根据文献[3]对组合波导腰部区域作弱导和弱耦合近似后, 在该段区域内组合波导横截面近似不变。耦合区两臂间主要功率交换发生在等效圆柱型平行波导内。该区长度可由拉锥长度控制。信号从一根光纤输入端输入, 在独立光纤中传播时其模场分布为贝塞耳函数 $J_0(2.405r/C)$, 如图 3(a) (C 为包层半径)。然而在腰部区域, 经熔融拉锥后折射率为 n_1 的纤芯变得很细。如果耦合发生在变细的两光纤芯(折射率为 n_1) 和

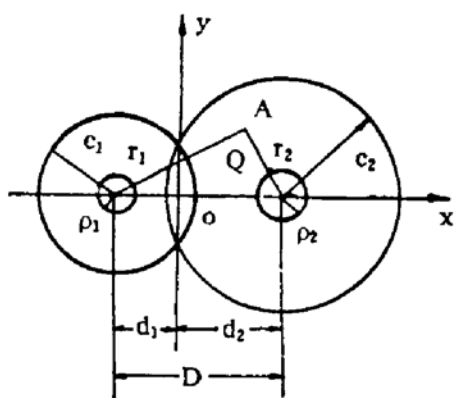


Fig. 2 Transverse section of wide frequency band couplers

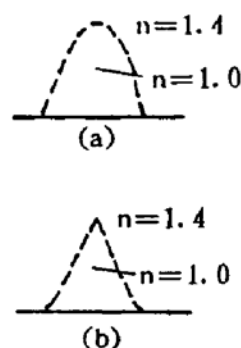


Fig. 3 Fields dispersion in single fiber waveguide

石英包层(折射率为 n_2) 构成的组合波导内, 则此组合波导反对称模规格化截止频率 V_{c0} 为

$$V_{c0} = \sqrt{\frac{8}{1 + 4 \ln(D/\rho)}}, \quad (1)$$

式中 D 为腰部两熔融光纤中心间距, ρ 为腰部单根光纤芯半径, 如图 2 所示。这细光纤规格化频率为 V_0 。

$$V_0 = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_1^2 n_2^2} \quad (2)$$

对所得耦合器, V_0 明显地小于 V_{c0} , 反对称模将成为漏模, 耦合器就有很大损耗。然而测试结果说明, 器件插入损耗小于 0.2 dB; 若考虑组合波导是由熔融两光纤中折射率为 n_2 的原包层构成哑铃形芯和折射率为 n_3 的周围介质(空气或硅橡胶)构成包层的新波导, 则该新波导规格化截止频率 V_{c1} 为:

$$V_{c1} = \sqrt{\frac{8}{1 + 4 \ln(D/C)}} \quad (3)$$

其中 C 为腰部单根光纤包层外半径。而新波导规格化频率为:

$$V_1 = \frac{2\pi C}{\lambda} \sqrt{n_2^2 n_3^2} \quad (4)$$

当 $V_1 \gg V_{c1}$ 时, 反对称模为低损耗传输, 所以耦合波也应是后一种波导内两个最低价模的相拍^[4]。原来在纤芯中的模场在组合波导中传播, 并由于细芯 n_1 影响, 其场分布近似为三角形

分布,如图 3(b)所示。这两个三角形近似场有相当部分叠加,其最低次模取为叠加的同相模;第二个最低次模应取为叠加的反相模^[4];

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= (d^2 - C_2^2 + C_1^2)/2d, & d_2 &= (d^2 + C_2^2 - C_1^2)/2d, \\ \psi_+(x, y) &= b_+ \left[\left(1 - \frac{r_1}{C_1}\right) + a_+ \left(1 - \frac{r_2}{C_2}\right) \right], & r_1 &= [(x + d_1)^2 + y^2]^{1/2}, \\ \psi_-(x, y) &= b_- \left[\left(1 - \frac{r_1}{C_1}\right) - a_- \left(1 - \frac{r_2}{C_2}\right) \right], & r_2 &= [(x - d_2)^2 + y^2]^{1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

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 A 到两光纤中心的距离(图 2); a_+ 、 a_- 、 b_+ 、 b_- 为耦合系数。

2.2 耦合功率

根据弱耦合波导条件,传播模 $\phi_{\pm} \exp(j\beta_{\pm} z)$ 仍可满足标量亥姆霍兹方程,从而可导出传播常数 β_+ 和 β_- 的变分表达式,据此可计算耦合拍长 $z_c = \pi/(\beta_+ - \beta_-)$ 。对基模可由 $\partial \beta_{\pm} / \partial a_{\pm} = 0$ 确定 a_+ 、 a_- 根据 ψ_+ 、 ψ_- 的正交条件由 a_+ 表示出来。在任意点 z 处副光纤可耦合到的功率 P_2 经运算可表示为:

$$P_2 = P_{2 \max} \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \int \frac{1}{z_c} dz \right] \quad (6)$$

由于耦合器功率耦合主要发生在腰部规格化频率 $V < 1$ 区域,将这段区域近似以两段平行波导处理,则

$$P_2 = P_{2 \max} \sin^2 [\pi z / 2z_c] \quad (7)$$

2.3 实验依据

由于拍长 Z_c 是波长的函数,由(7)式可知,对一定熔锥长度 z 可得图 1(a)所示常规对称臂耦合器光谱响应曲线,其耦合功率相对于输入功率作了规范化处理。从图 1(a)可以看出耦合功率随波长的变化率,对某一特定波长 λ_2 在 50% 耦合功率附近为最大;对于波长 λ_1 在曲线顶点,即 100% 耦合功率附近为最小,在该处转换功率对波长最不敏感,由此可知,如果使耦合器光谱响应曲线在低于 100%(如 50%)处具有转折点,如图 1(b),就可以在 λ_1 附近 $\Delta\lambda$ 范围内对于预定 50% 分束比上得到宽带效果。

对称臂定向耦合器,两光纤在耦合区粗细一样。理论计算表明,对(5)式表示的最低次模有^[4]:

$$a_+ = a_- = 1; \quad b_+ = b_- \quad (8)$$

该组合波导中模场是独立光纤中四个同样大小的三角形近似场的叠加,(如图 4)。其结果使耦合初始状态时光纤 1 有光信号;光纤 2 最低次模与第二个最低次模相抵消而无光信号;经过一个耦合拍长,假定最低次模不变,第二个最低次模位相变化了 π ,光纤 1 的光信号由于反相而抵消,光纤 2 的光信号同相叠加,所以对称耦合器最大耦合功率为 1。对非对称臂耦合器其耦合区两光纤粗细不同,理论计算表明对于(5)式表示的最低次模可得^[4]:

$$a_+ = a_-, \quad a_+ b_+ = a_- b_- \quad (9)$$

该组合波导模场如图 5 所示,经过一个耦合拍长,第二个最低次模位相变化了 π ,光纤 2 信号达到最大时,光纤 1 信号并不完全抵消,而仍有一定光信号,其耦合度小于 100%。所以非对称臂耦合功率小于 1,功率不能实现完全转换。

使用非对称臂光纤可以降低最大耦合功率。同时,由于耦合拍长与 λ 有关,通过控制耦合区长度 z ,使耦合器在某个特定波长附近预定小于 100% 分束比上具有宽带的特性。

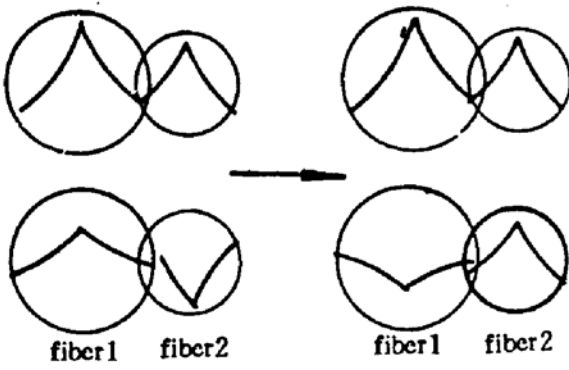


Fig. 4 Added together of field in standard coupling waveguide

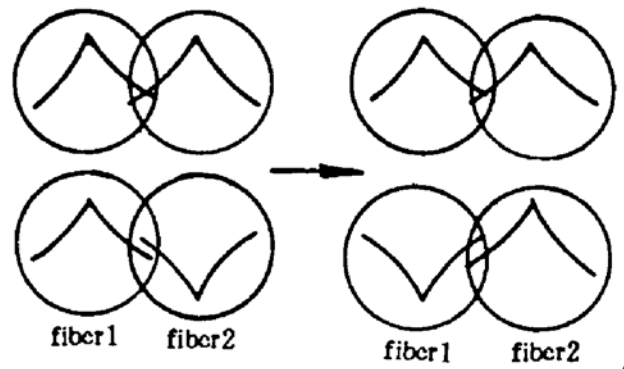


Fig. 5 Added together of field in coupling waveguide of wide frequency band . 3dB coupler

3 实 验

根据原理,开始时用两根不同截止波长的光纤制造宽带耦合器,但由于无法调节两光纤之间芯径比,而在实际使用时无法与系统光纤相匹配;后来用两根相同特性光纤,把其中一根需耦合的区域先拉锥变细,然后与另一根相绞合后再次拉锥,但很难控制芯径比,而且经二次拉锥的光纤很脆,给后道工艺带来很大困难。最后在总结这两种方法基础上,将两根光纤需耦合部分用 HF 溶液腐蚀成适当比例,经处理后将两光纤粗细不同的耦合区紧密合拢,然后用丁烷和氧气火焰熔融拉锥。轮流打开两输入端光源以分别注入 1.30 μm 和 1.57 μm 波长光。两输出端的光经过光电转换由电子仪表实测监控。当 1.57 μm 波长光信号在第一个拍长内达到所需要分束比时撤离火焰。若两

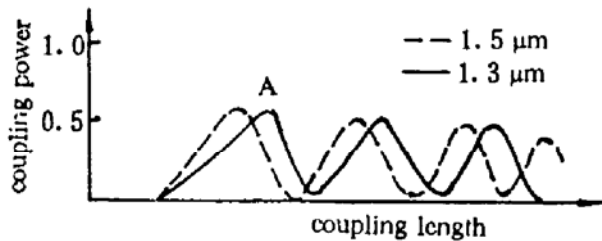


Fig. 6 Coupled power against coupling length

两根光纤耦合区直径配比恰当,1.30 μm 波长的分束比也接近这个数值。在拉锥过程中严格把握 1.57 μm 和 1.30 μm 波长的光在曲线上第一个交点即 A 点(如图 6)就能使插入损耗降到最小。用直接熔融水平拉锥装置可以使熔锥区尺寸缩小到 4 cm 以内。

用双组份硅橡胶将耦合区部分固定在事先制作好的基片上,并加热使其固化。在固化过程中如发现分束比偏离,可微调封装装置。为保证结果正确性,在拉制过程中设法先去除包层膜。

4 结 果

图 7 输出端 1 光功率为 P_1 , 输出端 2 光功率为 P_2 , 输入耦合器总功率为 P_0 , 则分束比 1 为 $P_1/(P_1 + P_2)$; 分束比 2 为 $P_2/(P_1 + P_2)$ 。例如测得某样品分束比如表 1 所列。耦合器损耗为 $-10 \log (P_1 + P_2)/P_0$ 。例上述样品用截尾法测得插入损耗如表 2。设 P' 为空端反射光功率,由于器件插入损耗很小,输入样品总功率近似为 $P_1 + P_2$, 则隔离比为 $-10 \log [P'/(P_1 + P_2)]$ 。上述样品的反向隔离度如表 3。测试结果证明耦合器工作带宽在 100 nm 以上,其中最宽在 1.24 μm 至 1.60 μm 带宽范围内,达 350 nm,分束比

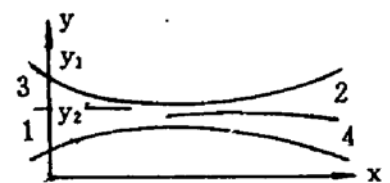


Fig. 7 Side view of coupling waveguide

$3 \pm 10\%$ dB。插入损耗小于 0.2 dB, 反向隔离度大于 50 dB, 经 24 hr 高低温老化试验, 工作温度从 -40°C 至 $+80^\circ\text{C}$ 。实验过程中用双踪示波器监察 1.57 和 1.30 μm 波长耦合功率随拉伸长度的变化, 注意两波长曲线第一个交点 A 位置的高度, 得图 8。对 3 dB 分束比图 8(a)是

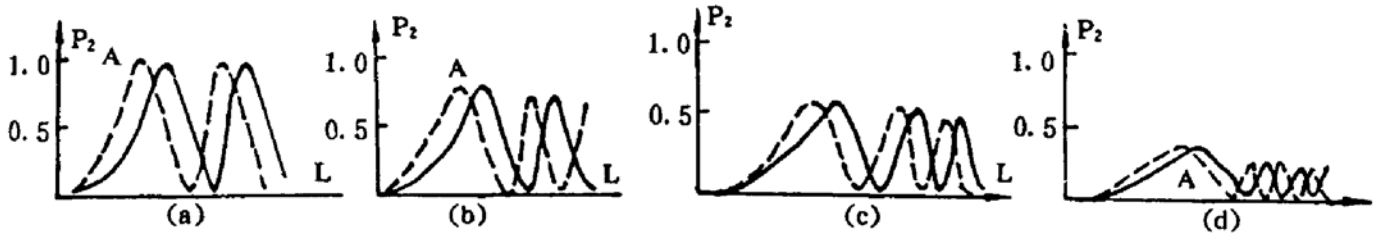


Fig. 8 Coupled power against length 1.57 μm — 1.30 μm

两直径比为 1:1 的对称臂组合波导, 即窄频带耦合器; 图 8(b)是两直径较接近的非对称臂组合波导; 图 8(c)是两直径比适中的一组波导; 图 8(d)是两直径相差较大的一组波导。以图 8(c)为例, 当拉伸长度达 Z_0 时(图 9), 光纤 2 中 1.57 μm 和 1.30 μm 波长的光功率都在 50%处, 即图 9 中 A 点。对介于这两种波长间的光信号, 其耦合功率随拉伸长度的响应曲线在相应的两条曲线中间, 如图 9 中点划线。B 为该波长曲线上的点, 耦合功率近似为 50%, 从而可在 z_0 处找到 3 dB 宽带耦合器的最佳点。进而, 通过控制波导的不同直径比, 可望得到在一定波长范围内具有宽带特性的各种分束比的定向耦合器。

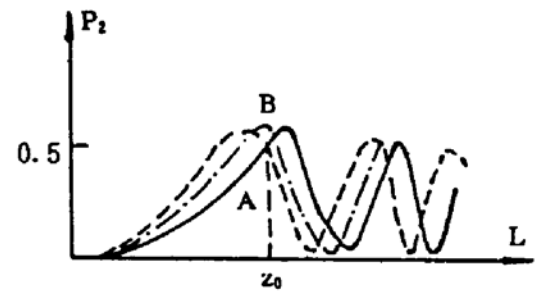


Fig. 9 Analysis on Fig. 7(c) 1.57 μm
— 1.30 μm · - · - 1.30 μm
 $< \lambda < 1.57 \mu\text{m}$

Table 1. splitting ratio against wavelength

| λ (μm) | output 1 (mV) | output 2 (mV) | splitting ratio 1 | splitting ratio 2 |
|-----------------------------|---------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 1.24 | 0.0832 | 0.0615 | 57.5% | 42.5% |
| 1.26 | 0.0785 | 0.0672 | 53.9% | 46.1% |
| 1.28 | 0.0745 | 0.0695 | 51.7% | 48.3% |
| 1.30 | 0.0702 | 0.0715 | 49.5% | 50.5% |
| 1.32 | 0.0642 | 0.0770 | 45.5% | 54.5% |
| 1.34 | 0.0585 | 0.0750 | 43.8% | 56.2% |
| 1.36 | 0.0595 | 0.0737 | 44.7% | 55.3% |
| 1.38 | 0.0442 | 0.0645 | 40.7% | 59.3% |
| 1.40 | 0.0375 | 0.0562 | 40.0% | 60.0% |
| 1.44 | 0.0395 | 0.0605 | 39.5% | 60.5% |
| 1.48 | 0.0420 | 0.0520 | 44.7% | 55.3% |
| 1.50 | 0.0435 | 0.0497 | 46.7% | 53.3% |
| 1.52 | 0.0447 | 0.0525 | 46.0% | 54.0% |
| 1.53 | 0.0455 | 0.0517 | 46.8% | 53.2% |
| 1.55 | 0.0462 | 0.0492 | 48.8% | 51.6% |
| 1.57 | 0.0452 | 0.0435 | 51.0% | 49.0% |
| 1.58 | 0.0450 | 0.0407 | 52.5% | 47.5% |
| 1.60 | 0.0440 | 0.0315 | 58.3% | 41.7% |

Table 2. Tnsertion loss

| λ (μm) | total output (mV) | output 1 (mV) | output 2 (mV) | loss (dB) |
|-----------------------------|-------------------|---------------|---------------|-----------|
| 1.55 | 0.0962 | 0.0517 | 0.0437 | 0.04 |
| 1.30 | 0.1490 | 0.0725 | 0.0707 | 0.17 |

Table 3. Directivity

| output 1 (V) | output 2 (V) | (μV) | (dB) |
|--------------|--------------|-------------------|-------|
| 1.040 | 0.772 | 10 | 52.58 |

5 分 析

对测得表 1 数据的样品, 用工具显微镜测其侧向外形, 示意图为图 6, 侧向外形数据如表 4, 其中 $\Delta y_1 = y_2 - y_1$, $\Delta y_2 = y_3 - y_2$ 。由于耦合波导呈弱融状态, 因此可以近似地把 Δy_1 , Δy_2 看作两光纤直径, 耦合器中每一根光纤直径满足式:

$$D(z) = D_{\max} - D_0 \exp(-\alpha z^2) \quad (10)$$

其中 D_{\max} 为光纤最粗处外径, D_0 为光纤最细处(腰部)外径减少量, α 为光纤长度参数。由表 4 可看出: 在 $x = 102.1495$ mm 处, $\Delta y_1 = 23.8 \mu\text{m}$, $\Delta y_2 = 15.3 \mu\text{m}$ 为最细处, 即(10)式中 $z = 0$ 处。利用(10)式从 $z = 0$ 处分别向 1、2、3、4 端进行曲线拟合, 即:

$$\sigma = \sqrt{\sum \left[\frac{D_i(Z) - D(Z_i)}{n} \right]^2} \quad (11)$$

Table 4. Size of side view

| x (mm) | y_1 (mm) | y_2 (mm) | y_3 (mm) | Δy_1 (μm) | Δy_2 (μm) |
|----------|------------|------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 115.0310 | 51.9720 | 52.0950 | 52.1950 | 123.0 | 100.0 |
| 110.0310 | 51.8816 | 51.9725 | 52.0590 | 90.9 | 86.5 |
| 106.0020 | 51.8453 | 51.8896 | 51.9390 | 44.3 | 49.4 |
| 102.1495 | 51.8092 | 51.8330 | 51.8483 | 23.8 | 15.3 |
| 98.1495 | 51.7700 | 51.7960 | 51.8228 | 26.0 | 26.8 |
| 94.1495 | 51.7155 | 51.7465 | 51.7830 | 31.0 | 36.5 |
| 89.1495 | 51.6075 | 51.6530 | 51.7100 | 45.5 | 57.0 |
| 84.1495 | 51.4660 | 51.5329 | 51.6285 | 66.9 | 95.6 |

从而得表 5。对粗光纤用 $V < 1$ 法, 在计算机上计算耦合长度, 从 $z = 0$ 处向输出端 1 方向的长度为 $ZF_1 = 5$ mm, 向输出端 2 方向的长度 $ZF_2 = 12$ mm。在 $z = ZF_1 + ZF_2 = 17$ mm 这个耦合区总长度上对两光纤半径进行平均得

$$C_1 = \bar{C}_1 \pm \bar{\sigma}_1 = 14.7 \pm 3.7 (\mu\text{m}), \quad C_2 = \bar{C}_2 \pm \bar{\sigma}_2 = 17.2 \pm 2.3 (\mu\text{m}) \quad (12)$$

$$\bar{\sigma}_1 = (\sigma_2 + \sigma_4)/2, \quad \bar{\sigma}_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

Table 5. Modelling result

| output | D_{\max} (μm) | D_0 (μm) | α | σ (μm) |
|--------|------------------------------|-------------------------|----------|----------------------------|
| 1 | 123 | 101.54 | 0.01787 | 1.94 |
| 2 | 123 | 106.87 | 0.00390 | 4.75 |
| 3 | 108 | 88.79 | 0.02238 | 3.94 |
| 4 | 108 | 89.69 | 0.00236 | 2.60 |

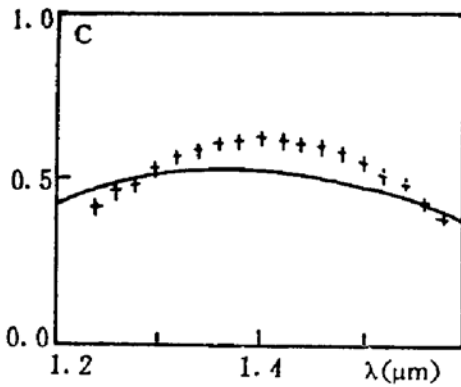


Fig. 10 Comparison between theoretical curve and experimental curve
+ experimental result — theory

在曲线拟合精度范围内取 $\bar{C}_1 = 15.4 \mu\text{m}$, $\bar{C}_2 = 16.5 \mu\text{m}$ 。另外, 在显微镜下观察该耦合器截面尺寸, 得两光纤中心间距 $D = 28.7 \mu\text{m}$, 则 $D/(\bar{C}_1 + \bar{C}_2) = 89.9\%$; 光纤折射率 n_1 , n_2 由光纤参数仪测得。按弱熔理论, 根据(7)式, 利用上述数据上机运算, 计算不同波长下 z 和 z_c , 最后得到该样品理论规范化耦合功率与波长的响应曲线。与表 1 实测数据相应的实测曲线和理论规范化曲线的对照如图 10 所示。由图 10 可见, 实际耦合器波谱响应与理论计算相吻合、与(7)式相一致, 这与文献[3]的报道相符。计算中波谱特性对 C_1 , C_2 和 D 的敏感性与实验中严格控制光纤尺寸和熔锥长度相一致, 这与文献[2]的报道相符。

参 考 文 献

- [1] 顾炳生, 章介伦, 陆善达, 宽频带熔锥型耦合器的研制与分析. 光子学报, 1992, 21(5): 103~186
- [2] D. B. Mortimore, Wavelength-Flattened Couplers Electronics Letters, 1985, 2(17): 742~743
- [3] A. Hardy, W. Streifer, Coupled-Mode equations for two weakly guiding single-mode fibers. Optics Letters, 1986, 11(5): 324~326
- [4] J. V wright, Variational analysis of fused tapered couplers. Electronics Letters, 1985, 21(23): 1064~1065

Study on Wide Band Characteristic of Fused Fiber Couplers

Gu Bingsheng

(Department of Physics, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

(Received 1994; revised 1994)

Abstract The wide band characteristic of fused fiber couplers is studied in this paper. Two fibers of stepping refraction index with different thickness at the coupled zone made by itching method are used to form an unsymmetrical arm. Thus a single mode directional fiber coupler is obtained with wide band and smaller size. Experimental results show that the coupled power can be flat distributed near a given wavelength and $<100\%$ splitting ratio by controlling the coupling length. A wide band coupler with different splitting ratio can be obtained by controlling the diameter ratio of two coupled arms.

Key words wide band characteristic, coupler, splitting ratio.