

# 熔锥型全波耦合器

张瑞峰 葛春风 王书慧 胡智勇 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电科学技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2002 年 4 月 10 日收到; 2002 年 6 月 26 日收到修改稿)

从耦合模方程出发, 分析了全光纤非对称熔融拉锥型耦合器的带宽特性, 提出和论证了全波(O + E + S + C + L band)耦合器的制作方案, 并且在工艺上实现了全波耦合, 其带宽达到了 390nm(1260—1650), 分束比 1:99; 附加损耗 0.1dB.

**关键词:** 全波耦合器, 熔融拉锥, 带宽, 预拉伸

**PACC:** 4281M, 4280S, 4281

## 1. 引 言

随着全波光纤的出现, 光通信网的各种节点器件的宽带特性日为重要, 熔融拉锥型全光纤耦合器(coupler)是光纤通信系统中重要的基本器件之一, 可以用作各种比例的功率分路器(splitter)/合路器(combiner), 波分复用器(WDM), 光纤全反镜<sup>[1]</sup>, 非线性光环境(NOLM)<sup>[2,3]</sup>, 光纤环形腔<sup>[4]</sup>, Mach-Zehnder 光纤滤波器<sup>[5]</sup>, 非线性全光开关<sup>[6,7]</sup>等; 在传感领域可利用其作成 Mach-Zehnder, Michelson, Sagnac<sup>[8]</sup>, Fabry-Perot 光纤干涉型和光纤环形腔干涉型光纤传感器; 此外还是光纤陀螺仪和光纤水听器及多种光学测量仪器的关键部件<sup>[9]</sup>.

光通信技术迅速发展. 光纤方面, 朗讯公司于 1998 年 6 月研究出全波光纤(All-wave Fiber), 消除了 1385nm 水峰, 带宽达到了 1280—1625nm. 98 年全波光纤在美国商用, 美国的 NEON、南方贝尔公司等均已选用全波光纤建设各自的城域网. 康宁公司也推出了城域网(MetroCor™)光纤, 属于负色散单模光纤, 工作波长范围也为 1280—1625nm, 无中继传输距离可达 350km, 且无需色散补偿. 在光放大器方面, 超宽带 EDFA 和光纤拉曼放大器(FRA)的研究不断进展<sup>[10]</sup>, 光纤拉曼放大器由于其自身固有的全波段(1292—1660nm)可放大特性和可利用传输光纤在线放大的优点, 1999 年已成功地应用于 DWDM 传输系统. 在光源方面, 出现了宽带可调谐光源, 例如,

各种形式的 DBR 可调谐半导体激光器, SG-DBR, SSG-DBR<sup>[11]</sup>等, 可调谐范围有望达到 80nm; 全光纤超连续脉冲光子源, 带宽可以达到传统半导体激光器(LD)无法达到的波长区域, 可在连续光谱区得到脉宽 < 0.3ps 的超短脉冲. 可以为 DWDM 及 OTDM 系统提供 200nm 平坦带宽的稳定光源<sup>[12,13]</sup>.

总之, 纵观整个光纤通信系统, “宽带化”已经成为新型电信网的主要特征之一. 所有这些都对光通信器件的工作带宽提出了越来越高的要求, 相应的器件技术也将实现向宽带技术的过渡. 光纤耦合器也不例外, 目前广泛商用的 1550 窗口的 DWDM 系统中, 对耦合器的要求至少是单窗口宽带的. 而在可能利用 1310 和 1550 两个窗口资源为用户提供“多业务”服务的光纤接入网系统中, 共传信号采用双窗口宽带分路器, 不仅能够获得最佳性能, 而且, 还为系统预留了丰富的带宽, 避免日后升级时对分路器进行重复性投资. 鉴于以上考虑本文将提出一种熔锥型全波(O + E + S + C + L band)耦合器(all-wave coupler), 并详细地阐述其性能指标、原理、应用等.

## 2. 熔锥型全波耦合器的原理及分析

all-wave coupler 是利用带宽拓展技术(非对称工艺)以改变器件的波长特性, 使其带宽达到 1260—1650nm, 使得在其带宽范围内均能满足分光精度的要求, 而且满足低附加损耗、低偏振相关损耗(PDL).

在弱导和弱耦近似下,忽略自耦合效应,并假设光纤是无吸收损耗的,则在耦合区有模式耦合方程组

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = i\bar{\beta}_1 A_1(z) + i\bar{C}_{12} A_2(z), \\ \frac{dA_2(z)}{dz} = i\bar{\beta}_2 A_2(z) + i\bar{C}_{21} A_1(z), \end{cases} \quad (1)$$

式中  $A_1(z)$ ,  $A_2(z)$  是两根光纤的模场振幅;  $\bar{\beta}_1$ ,  $\bar{\beta}_2$  是两根光纤在孤立状态的纵向模传播常数;  $\bar{C}_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) 是耦合系数. 实际中近似有  $\bar{C}_{12} = \bar{C}_{21}$ , 可以求得上述方程组的解为

$$\begin{aligned} A_1(z) = & \left\{ A_1(0) \cos\left(\frac{C}{F}z\right) \right. \\ & \left. + iF \left[ A_2(0) + \frac{\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2}{2C} A_1(0) \right] \right. \\ & \left. \times \sin\left(\frac{C}{F}z\right) \right\} \exp(i\bar{\beta}_a z), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_2(z) = & \left\{ A_2(0) \cos\left(\frac{C}{F}z\right) \right. \\ & \left. + iF \left[ A_1(0) - \frac{\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2}{2C} A_2(0) \right] \right. \\ & \left. \times \sin\left(\frac{C}{F}z\right) \right\} \exp(i\bar{\beta}_a z), \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} F = & \left[ 1 + \frac{(\bar{\beta}_1 - \bar{\beta}_2)^2}{4C^2} \right]^{-1/2} \\ = & \left[ 1 + \frac{(\Delta\bar{\beta})^2}{4C^2} \right]^{-1/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

耦合系数

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0(Wd/\rho)}{\rho V^3 K_1^2(W)}, \quad (4)$$

其中  $\rho$  是光纤半径,  $d$  是两光纤中心的距离,  $U$  是纤芯横向传播常数,  $W$  是包层横向衰减常数,  $V$  是孤立光纤的归一化频率,  $K_0$ ,  $K_1$  是零阶和一阶修正第二类 Bessel 函数.

采用非对称熔融拉锥工艺,未预熔拉伸以前有  $\bar{\beta}_1 = \bar{\beta}_2 = \beta_0$ , 假设预拉光纤 1, 其纤芯折射率为  $n_{co}$ , 包层折射率为  $n_{cl}$ ; 在预拉过程中, 纤芯和包层的折射率均保持不变, 只是纤芯半径从  $\rho$  变为  $\rho + \delta\rho$ , 于是其纵向传播常变为<sup>[14]</sup>

$$\bar{\beta}_1 = \beta_0 + (2\Delta)^{1/2} \frac{\delta\rho}{\rho^2} \frac{U^2}{V} \frac{K_0^2(W)}{K_1^2(W)}. \quad (5)$$

因为是非对称工艺故假设光纤 2 没有预拉伸, 所以两光纤的传播常数差为

$$\Delta\bar{\beta} = (2\Delta)^{1/2} \frac{\delta\rho}{\rho^2} \frac{U^2}{V} \frac{K_0^2(W)}{K_1^2(W)}. \quad (6)$$

将(6)式代入(3)式可得两根芯径相近的阶跃型剖面光纤组成的复合波导的  $F$  系数<sup>[14]</sup>

$$\begin{aligned} F = & \left[ 1 + \frac{WV^4}{2\pi} K_0^4(W) \frac{d}{\rho} \right. \\ & \left. \times \exp\left(2W \frac{d}{\rho}\right) \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)^2 \right]^{-1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

两输出端口的光功率分别为

$$\begin{cases} P_1(z) = |A_1(z)|^2 = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \\ P_2(z) = |A_2(z)|^2 = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right). \end{cases} \quad (8)$$

从(7)式和(8)式可以看到  $F$  是一个很重要的参数, 首先以二次形式决定了耦合器输出端的功率幅值, 同时影响着功率变化的空间周期.  $F$  是初始归一化频率  $V$ 、归一化中心距  $d/\rho$  及芯径变化  $\delta\rho/\rho$  的函数(如图 1 所示). (8)式中  $\delta\rho$  是一个关键参量, 因为如果其值为零, 那么  $F$  系数将退化成为常数 1, 对应标准耦合器; 反之如果其值非零, 像我们所讨论的一根光纤被预拉伸的情况,  $F^2$  与  $V$  相关, 表明功率幅值对光波长的依赖关系, 最终决定着耦合器的波长相关特性, 如带宽大小、是功率分束器还是波分复用器等.  $d/\rho$  和  $\delta\rho$  可以视为  $V^4$  的系数, 对  $V^4$  的影响起调整作用.

耦合器的空间周期  $T_z$  由(4)、(7)和(8)式导出

$$T_z = \frac{\pi\rho V^3 K_1^2(W)}{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0(Wd/\rho) \left[ 1 + \frac{WV^4}{2\pi} K_0^4(W) \frac{d}{\rho} \exp\left(2W \frac{d}{\rho}\right) \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)^2 \right]^{1/2}}. \quad (9)$$

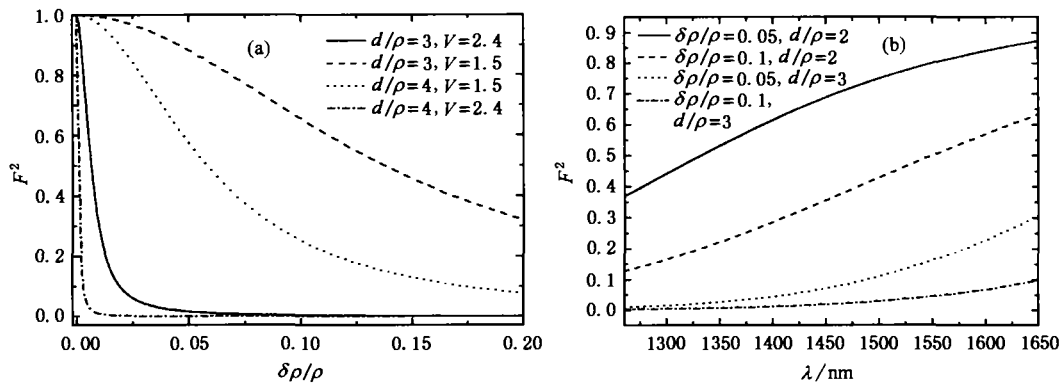


图 1  $F$  系数与预拉伸  $\delta\rho/\rho$ 、光波长  $\lambda$  及归一化中心距  $d/\rho$  的关系

从(9)式来看空间周期与波长的解析关系不是十分的明晰,我们通过数值模拟的方法得出如下结论:对于一定的波导结构,波长越长,周期越小;二光纤相距越远,周期越大;预拉伸越多,周期越小(见图 2)。

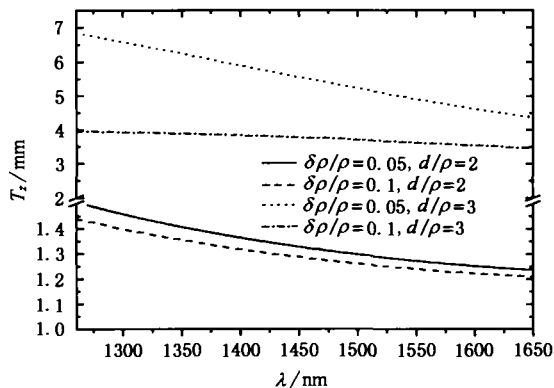


图 2 耦合器的空间周期  $T_c$  与光波长  $\lambda$ 、预拉伸  $\delta\rho/\rho$  及归一化中心距  $d/\rho$  的关系

通过以上讨论可知,在  $\delta\rho/\rho \neq 0$  的情况下,

波长越长,功率幅值越大,空间周期越小。

### 3. 数值模拟和实验数据

综上所述,适当调整拉锥距离和预拉伸参数,使得熔拉过程在长波区尚未达到峰值而短波长区已经越过了第一个峰值处停止,应该有可能获得很大的带宽.我们用 Matlab 数值模拟了熔融拉锥过程的波谱特性(图 3),图 3(a)和(b)分别表示一个分束比为 50:50 的普通耦合器和全波耦合器的频域和空域特性,可知后者的带宽达到了近 400nm。

依据以上理论分析,我们利用美国 Bayspec 公司的拉锥机采用特殊的非对称熔融拉锥方法制作了全波耦合器,分束比为 1:99;附加损耗:0.1dB;偏振相关损耗 < 0.1dB;所用的光纤是美国 Corning 公司的 SMF-28,并用 Agilent 的 86140B OSA 测试了全波耦合器分束比的光谱特性,图 4 和图 5 分别是分束比为 1:99 的普通耦合器(1550nm)和全波耦合器(1260—1650nm)。

理论分析和实验表明,我们制作的全波耦合器

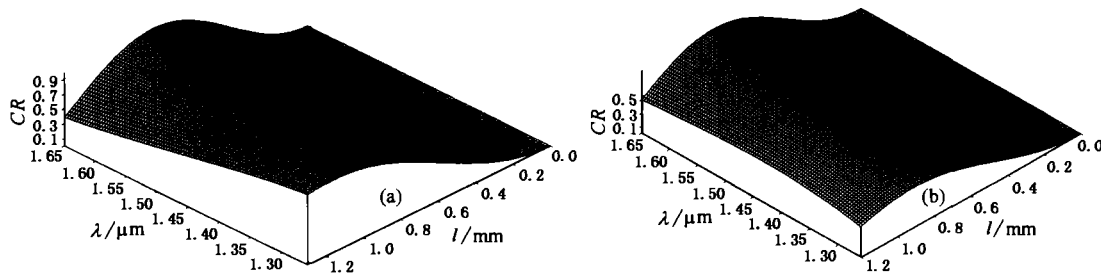


图 3 耦合率  $CR$  与耦合区长度  $l$  及光波长  $\lambda$  的关系

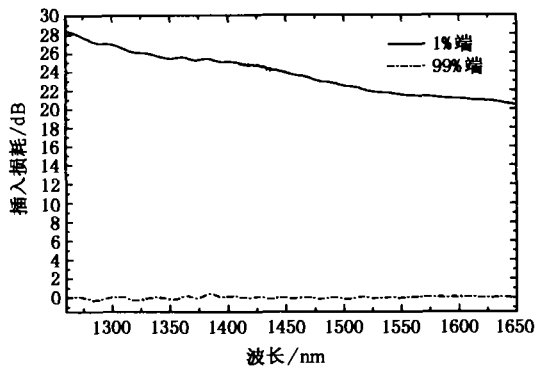


图4 熔锥型普通耦合器光谱图

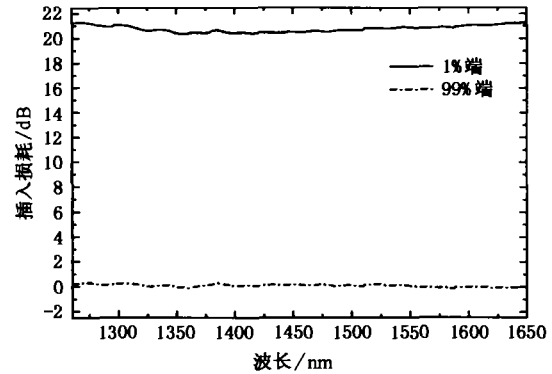


图5 熔锥型全波耦合器光谱图

带宽达到了 390nm (1260—1650nm), 覆盖了光通信系统的 O + E + S + C + L 波段, 在即将全面展开的应用全波光纤的 CWDM 城域网建设中会被广泛应用, 并且将来全波光纤如果应用到骨干网, 全波耦合器将发挥更重要的作用, 还有在目前非常热门的光纤

拉曼放大器中要用到多个超宽带的抽头耦合器 (tap-coupler), 熔锥型全波耦合器是其最佳选择。

我们制作的全波耦合器还有不完善之处, 比如其偏振相关损耗 (PDL) 指标还有待进一步提高, 将在后续研究中解决这一问题。

- [1] Mortimore D B *et al* 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 1417
- [2] Nakazawa M, Suzuki K, Yamada E *et al* 1996 *Electron. Lett.* **32** 1122
- [3] Han M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 751 (in Chinese) [韩明等 2000 物理学报 **49** 751]
- [4] Stokes L F, Chodorow M, Shae H J *et al* 1982 *Opt. Lett.* **6** 288
- [5] Pang Y *et al* 1996 *SPIE-Int Soc for Opt Engineering* (Bellingham) WA USA p110
- [6] Agrawal G P 2001 *Applications of Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, Incorporated) p63
- [7] Yu C Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 904 (in Chinese) [俞重远等 2001 物理学报 **50** 904]
- [8] Shu X W *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文等 2000 物理学报 **49** 1731]
- [9] Gu B S *et al* 1995 *Journal of Applied Sciences* **13** 288 (in Chinese) [顾炳生等 1995 应用科学学报 **13** 288]
- [10] Mori A, Masuda H, Shikano K *et al* 2001 *Electron. Lett.* **37** 1442
- [11] Sarlet G *et al* 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1351
- [12] Moriok T, Uchiyama K, Kawanishi S *et al* 1995 *Electron. Lett.* **31** 1064
- [13] Morioka T, Kawanishi S, Mori K and Saruwatari M, 1994 *Electron. Lett.* **30** 790
- [14] Snyder A W and Love J D 1983 *Optical Waveguide Theory* (Chapman and Hall, London) p574

## Fused biconical taper all-wave coupler

Zhang Rui-Feng Ge Chun-Feng Wang Shu-Hui Hu Zhi-Yong Li Shi-Chen

(*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Optoelectronics Information*

*Technical Sciences, Chinese Ministry of Education, Tianjin 300072, China*)

(Received 10 April 2002; revised manuscript received 26 June 2002)

### Abstract

This paper, on the basis of coupled-mode equations, analyzes the bandwidth characteristic of asymmetric fused biconical taper (FBT) coupler, and proposes and proves a solution of all-wave coupler (O + E + S + C + L band). We also succeed in making all-wave couplers with a bandwidth of 390nm, while the excess loss is only 0.1 dB and the coupling ratio is 1:99.

**Keywords:** all-wave coupler, FBT, bandwidth, pre-stretch

**PACC:** 4281M, 4280S, 4281