

文章编号: 1002-2082(2007)06-0793-04

熔锥型宽带耦合器的研制

吕 敏¹, 冯志江², 杨 笛¹, 张素娟³

(1. 中央民族大学 物理与电子工程学院, 北京 100081;

2. 河北建筑工程学院 计算机系, 河北 张家口 075024; 3. 中国人民解放军 63713 部队, 山西 036301)

摘 要: 介绍了全光纤熔融拉锥型 3 dB 宽带耦合器的理论设计, 根据理论设计制作了样品。应用耦合模理论分析了全光纤非对称熔融拉锥型耦合器的宽带特性; 提出了 3 dB 宽带耦合器的制作方案, 在此基础上制作了样品; 对样品进行测试, 样品带宽大约为 300 nm (在 1 300 nm ~ 1 600 nm 波长之间), 附加损耗小于 0.5 dB, 完全达到了实用化的要求。

关键词: 无源器件; 宽带耦合器; 熔融拉锥; 耦合模理论

中图分类号: TN622

文献标志码: A

Development of fused biconical taper wide band coupler

Lü Min¹, FENG Zhi-jiang², YANG Di¹, ZHANG Su-juan³

(1. Academy of Physics and Electronic Engineering, Central University For Nationalities, Beijing 100081, China; 2. Department of Computer, Hebei Institute of Architecture Civil Engineering, Zhangjiakou 075024, China; 3. The Army of 63713, PLA, Shanxi 036301, China)

Abstract: 3 dB wide band coupler is a passive device widely used in optical fiber communication system, optical fiber sensor, optical fiber measurement technology and signal processing system. A fiber fused biconical taper (FBT) 3dB wide band coupler was designed and some samples were manufactured. The bandwidth characteristics of asymmetric FBT coupler were analyzed by coupled-mode equation. The bandwidth of the wide band coupler is about 300 nm (between 1 300 nm and 1 600 nm), while its excess loss is less than 0.5 dB.

Key words: passive device; wide band coupler; fused biconical taper; theory of coupled-mode

引言

随着光纤到户, 各种大容量的波分复用网络不断涌现。单模光纤耦合器是这些网络中很重要的一类无源器件, 也是光纤传感、光纤测量技术和信号处理系统中一种应用十分广泛的无源器件^[1-3]。然而, 常规的熔锥型光纤耦合器, 其分光比对工作波长的依赖性很强。本文研制的宽带耦合器在大约 300 nm 的范围内, 分光比的变化小于 5%, 其优越性是显而易见的。

目前, 国内外普遍采用熔融拉锥法 (FBT)^[4] 制作光纤耦合器, 用这种方法制作的光纤耦合器,

由于具有损耗低、性能稳定、成本低且制作容易等特点而日益受到人们的重视。本文从理论上设计了 3 dB 熔锥型宽带耦合器, 用 Matlab 软件模拟计算, 从理论上实现了大约 300 nm 的带宽。实验验证了理论模型的正确性, 制作了样品, 并且对其性能进行了测试, 附加损耗低于 0.5 dB。

1 熔融拉锥型宽带光纤耦合器的工作原理

采用耦合模理论分析可以知道, 如果直通臂和耦合臂在熔融拉锥之前是对称的 (即 2 根光纤的芯

收稿日期: 2007-06-12; 修回日期: 2007-08-10

基金项目: 中央民族大学“青年教师科研基金”资助项目 (CUN 36A)

作者简介: 吕敏 (1975—), 女, 山西人, 讲师, 主要从事光通信无源器件的研究。E-mail: lvmin62589149@163.com

径是相同的),则功率转换随波长的变化特别灵敏,在 3 dB(分光比为 50%)处所适应的波长范围非常狭窄。为了减小转换功率对波长的灵敏度,利用非对称(2 根光纤的芯径不一致)的光纤,使这 2 根光纤在拉锥之后各自的本征模传播常数不同,则组合波导内的两最低阶对称和反对称模耦合时光功率在 2 根光纤间就不能实现全转换。宽带耦合器就是利用非对称的光纤在拉锥区耦合,改变器件的波长特性,使得在其带宽范围内达到预定的分光比,满足低的附加损耗和低的偏振相关损耗。

下面分析熔锥形非对称臂宽带耦合器的耦合机理。

图 1 为非对称臂耦合器的中心区横截面。根据文献[5]对组合波导的腰部区域作弱导和弱耦合近似后,在该区域内组合波导的横截面近似不变,功率的交换可以视为在等效的柱型平面波导内发

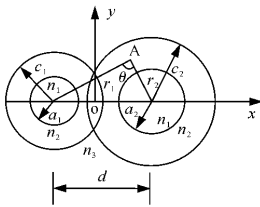


图 1 宽带耦合截面图

Fig. 1 Cross-section of wide-band coupling

生的。在腰部区域,随着拉锥长度的变化,纤芯的半径(a_1, a_2)越来越小,原来在纤芯(折射率为 n_1)中传播的模场透过纤芯,改为在 2 根光纤的包层(折射率为 n_2)和纤外介质(折射率为 n_3)组成的组合波导内传播。由于纤芯的影响,模场在组合波导内的传播近似为三角形分布,此场激发另一根光纤的模场,该模场也是近似为三角形分布^[6]。上述 2 个三角形近似场有相当部分的叠加,其最低次模取为叠加的同相模,第二个低次模取为叠加的反相模。参考文献[6]得到相应的物理模型。

反相模:

$$\Psi_-(x, y) = b_- \left[\left(1 - \frac{r_1}{c_1}\right) - a_- \left(1 - \frac{r_2}{c_2}\right) \right] \quad (1)$$

同相模:

$$\Psi_+(x, y) = b_+ \left[\left(1 - \frac{r_1}{c_1}\right) + a_+ \left(1 - \frac{r_2}{c_2}\right) \right] \quad (2)$$

式中: r_1 和 r_2 为考察点 A 到 2 根光纤中心的距离, $r_1 = [(x+d_1)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}}$, $r_2 = [(x-d_2)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}}$, d_1 和 d_2 分别为 2 根光纤中心到坐标原点 o 的距离, d_1

+ $d_2 = d$; c_1 和 c_2 分别为 2 根光纤的包层直径; a_{\pm} 和 b_{\pm} 为常数; Ψ_+ 和 Ψ_- 为传播函数,且满足正交条件:

$$\int \Psi_+ \Psi_- dx dy = 0$$

组合波导中 Ψ_+ 和 Ψ_- 为独立的波导中基模的叠加,场满足标量 Helmholtz 方程:

$$\nabla^2 \Psi + n^2(r)k^2 \Psi = 0 \quad (3)$$

假设 $\Psi = \Psi_{\pm} e^{i\beta_{\pm} z}$, 且 Ψ_{\pm} 只有径向分量,最后得到的传播常数为

$$\beta_{\pm}^2 = \frac{\iint [n^2(r)k^2 \Psi_{\pm}^2 - \left(\frac{\partial \Psi_{\pm}}{\partial u}\right)^2] dx dy}{\iint \Psi_{\pm}^2 dx dy} \quad (4)$$

化简后可以得到耦合器组合波导内 2 最低次模的传播常数:

$$\beta_{\pm}^2 = k^2 n_2^2 + \frac{I_1 + a_{\pm}^2 I_2 - [\pi(1 + a_{\pm}^2) \pm 2a_{\pm} I_p]}{\frac{\pi}{6} c_1^2 + a_{\pm}^2 \frac{\pi}{6} c_2^2 \pm 2a_{\pm} I} \quad (5)$$

式中:

$$I_p = \frac{1}{c_1 c_2} \iint_B \cos \theta dx dy$$

$$I_n = \pi a_n^2 k^2 (n_1^2 - n_2^2) \left(1 - \frac{4a_n}{3c_n} + \frac{a_n^2}{2c_n^2}\right) \quad (n = 1, 2)$$

$$I = \iint_B \left(1 - \frac{r_1}{c_1}\right)^2 \left(1 - \frac{r_2}{c_2}\right)^2 dx dy$$

相应的耦合拍长:

$$Z_c = \frac{\pi}{\beta_+ - \beta_-}$$

如果波长确定了,对于基模有

$$\frac{\partial \beta_+^2}{\partial a_+} = 0$$

从而确定 a_+ , 同时可求得 β_+ , β_- 和 Z_c 。

光场通过了腰部区域,又分别转换到原来的纤芯中传播, 2 个输出端输出的光功率比由波导内 2 最低模式到达腰部区域末端的相拍情况决定。

设 $z = 0$ 时, $P_2 = 0$, 则在 $z = Z_c$ 即耦合长度等于拍长时,组合波导内的反相模经历了 π 的相位变化,可得到耦合臂的最大可交换功率:

$$P_{2\max} = \frac{4a_+^2 a_-^2 c_2^2}{(a_+ + a_-)^2 c_1^2}$$

从而可以得到耦合臂在任意点处的功率:

$$P_2 = P_{2\max} \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \int \frac{1}{Z_c} dz \right]$$

由于耦合区腰部区域近似为平行段,所以可简化为

$$P_2 = P_{2\max} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{z}{Z_c} \right) \quad (6)$$

从以上分析可知 Z_c 是波长的函数,为了使耦合器在 1 300 nm 处与 1 600 nm 处均具有 50% 的分光比,取 $z=10.673$ mm 的耦合长度,分别改变 c_1 与 c_2 的比例以及 d 的值。用 Matlab 软件计算得到了在不同参数下的分光比曲线。图 2 列出了几个典型参数情况下分光比随着波长变化的曲线。

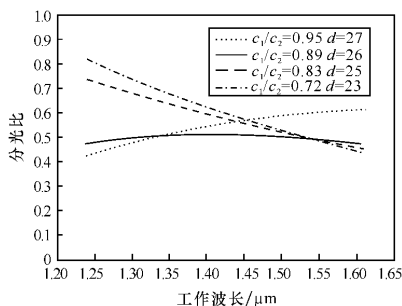


图 2 光纤的不对称性对 1 300 nm~1 600 nm 波段内分光比的影响

Fig. 2 Influence of fiber asymmetry on splitting ratio in wave band of 1 300 nm~1 600 nm

由以上理论分析可知,当 $c_1/c_2=0.89$, $d=26$ μm 时,在 1 300 nm~1 600 nm 波段内分光比曲线是最平坦的,该曲线在 1 520 nm 波长处的分光比为 51%;在工作波长 1 300 nm~1 600 nm 范围内分光比在 $50\% \pm 1.5\%$ 范围内变化,即在大约 300 nm 带宽内分光比只有很小的涨落。

2 实验制作及其测试

基于以上理论,我们制作了实验样品。实验采用美国 Bayspec 公司的拉锥机,选用美国 Corning 公司的 SMF-28 光纤,在耦合段剥去大约 20 mm 的涂覆层,并作清洁处理。根据以上原理分析,只有 2 根非对称光纤耦合才能得到宽带耦合器,所以先把一根光纤预拉伸到 $c_1/c_2=0.89$,跟另外一根清洁处理后的光纤绞合置于精密夹具中,然后通过改变氢气流量和速度得到 d 约为 26 μm 。在拉锥过程中实时监控耦合过程可以看到,随着耦合长度的增加,直通臂的功率下降,耦合臂的功率上升;当达到预定的 3 dB 要求时,火焰退出。这样形成的耦合区极易损坏,必须立即安装石英玻璃基体保护耦合区,然后才能从夹具上取下,进行性能测试,如果符合要求,即可封装。

在制作过程中需要反复尝试预拉伸光纤的长度,因为必须在确定的纤芯比情况下才能达到 3 dB

宽带耦合。一根光纤预拉伸后,还要进行第二次拉伸,很容易发生断裂,所以与另外一根光纤绞合时一定要注意操作方法。我们根据以上理论分析的结果制作了大量 3 dB 宽带耦合器样品。

用 Angilent 86140B 型光谱分析仪测试样品分光比的光谱特性。图 3(a)和图 3(b)分别是宽带 3 dB 耦合器和普通 3 dB 耦合器的光谱特性。普通耦合器是用对称光纤拉制而成的。我们测量了大量样品,从测试数据可知,普通 3 dB 耦合器只对 1 550 nm 的波长有 50% 的分光比,而宽带耦合器的分光比则在大约 300 nm (1 300 nm~1 600 nm 之间)的范围内均为 50%,上下涨落大约 1.5%,其附加损耗最大为 0.5 dB。

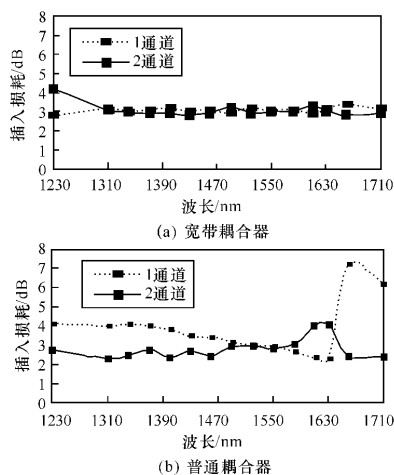


图 3 宽带耦合器和普通耦合器光谱特性比较

Fig. 3 Spectrum comparison between wide band coupler and common coupler

理论和实验证明,我们制作的 3 dB 宽带耦合器带宽达到了大约 300 nm,覆盖了光通信系统的 E+S+C+L 波段,在 CWDM 网络中将会发挥重要的作用。

3 结论

本文对单模光纤 3 dB 宽带耦合器的原理进行了理论分析,设计了带宽大约 300 nm 的宽带耦合器。在此基础上用熔融拉锥法制作了样品。测试结果表明:在 300 nm 带宽范围内,其分束比达到 $50\% \pm 1.5\%$,附加损耗小于 0.5 dB。对熔融拉锥器件来说,耦合区的直径大小直接决定了器件的可靠性,特别是对宽带耦合器而言,其中一根光纤涉及到二

次拉锥,所以很容易发生断裂。我们将在后续研究中摸索新的工艺,比如熔融拉伸加熔烧的方法,我们已经用此方法成功制作出了 $1\ 310\ \text{nm}/1\ 550\ \text{nm}$ 的WDM。我们还在探索用熔融拉伸加熔烧的方法来制作不同分束比的宽带耦合器。

致谢 该论文中提到的普通耦合器和宽带耦合器样品都是在天津市金飞博光通讯技术有限公司制作完成的,特此表示感谢。

参考文献:

- [1] 宋金声. 我国光无源器件的技术发展和发展趋势[J]. 世界宽带网络, 2002,9(11):16-18.
SONG Jin-sheng. Technical evolvement and developing current of optical passive device in our country [J]. International Broadband Network, 2002,9(11):16-18. (in Chinese)
- [2] 敖晖军. 全球光纤耦合器市场浅析[J]. 光纤通信,

2001,23(2):38-43.

AO Hui-jun. Market analysis of fiber coupler in global[J]. Optical Fiber Communication, 2001,23(2):38-43. (in Chinese)

- [3] 钱祥忠. 光纤瓦斯传感系统的研制[J]. 应用光学, 2005,26(6):38-40.
QIAN Xiang-zhong. Study of CH₄ optical fiber sensor structure [J]. Journal of Applied Optics, 2005,26(6):38-40. (in Chinese)
- [4] DAVID S, MARCO A F, JESSICA A. A simple technique to obtain fused fiber optics couplers [J]. Instrumentation and Development, 2001,5(3):170-174.
- [5] HARD A, STREIFER W. Coupled-mode equations for weakly guiding single-mode fibers [J]. Optics Letters, 1986,11(5):324-326.
- [6] WRIGHT J V. Variational analysis of fused tapered couplers [J]. Electronics Letters, 1985, 21 (23): 1064-1065.