

新型 1×4 塑料光纤功率耦合器的研制*

葛文萍 李忠辉 殷宗敏 周正利

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)

摘要: 提出了一种新型的塑料光纤功率耦合器,该耦合器与传统的拉锥型和混合棒塑料光纤耦合器不同。理论分析了它的损耗特性。该耦合器基于塑料光纤本身的热特性,分别将塑料光纤进行拉锥和热缩构成耦合器的两端,结构简单,制作容易,实验结果表明其性能也可满足塑料光纤短距离通信网的要求。

关键词: 塑料光纤; 耦合器; 锥形光纤; 插入损耗

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

随着掺铒光纤放大器技术和密集波分复用技术的发展,低损耗单模石英光纤在长距离骨干网的应用取得了很大的成功。而塑料光纤因其芯径大,连接容易,组网成本低廉,使用其作为短距离通信网的传输媒质越来越受到重视。随着塑料光纤技术的发展和低损耗高带宽塑料光纤的研制开发,塑料光纤作为短距离接入和局域网介质的可能性被更多人认可。尽管目前塑料光纤通信系统还处于研究或应用的初期阶段^[1,2],但它在未来短距离通信中所担当的角色是不容忽视的,它在价格及性能上的优势,使其在入户接入方面的应用具有广泛的前景。在连接器密集的短距离通信网中,光耦合器作为网络中的基本器件是必不可少的,石英光纤耦合器技术早已成熟,各种技术的耦合器都已商品化。但是由于塑料光纤传输网也只是实验阶段,塑料光纤的各种光器件技术并不成熟。本文比较熔融拉锥型和混合棒塑料光纤耦合器的优缺点,提出一种新的方法制作塑料光纤功率耦合器。

2 塑料光纤耦合器的种类

成熟的商品化石英光纤耦合器种类众多。而塑料光纤耦合器近年来报道的主要以下两种。

2.1 熔融拉锥型塑料光纤星型耦合器

早在 1986 年 Imoto 等^[3]就报道了熔融拉锥型塑料光纤耦合器,制作熔拉型塑料光纤耦合器是作

者源于石英光纤熔锥耦合器的启示。制作过程:数根光纤集成一束平行放置,在加热过程中,边拉边扭转制成熔拉型塑料光纤耦合器。这样制作引出一些问题。首先,插入损耗太高,这是由塑料光纤在扭转和拉制过程的不均匀造成的;并且高数值孔径的塑料光纤是弱导耦合,也就是说,在高数值孔径的光纤中,芯径内的模转变成包层模以及包层模转变为芯模的转换效率很低。要得到更高的转换效率,就要增加扭转的次数,但是由于扭转导致高阶模的辐射损耗很大。扭转部分以外的损耗是由于不均匀性造成的,另外光纤有时在拉制过程中变形,很难控制得到理想的形状和直径。该作者提出一种改进的方法制作熔融拉锥塑料光纤耦合器,首先将光纤加热预拉成双芯锥型,然后再次加热每束光纤的预拉锥腰部,并收缩扭转形成一较短的扭转区,这样在收缩锥部的过程中提高了芯径模向包层模转变效率,预拉过程提高了包层模向芯层模的转换效率,这样可以通过减少扭转次数和缩短扭转区域降低插入损耗。

2.2 混合棒塑料光纤耦合器

混合棒塑料光纤耦合器利用波前分割概念,不同于波导型的耦合器,用一混合棒代替波导,这种方法适用于包层薄的光纤,由于包层很薄,可有效提高耦合效率,减小插入损耗。混合棒采用与光纤相同的材料制作确保折射率匹配。耦合器一端是一根光纤,中间是锥形混合棒,另一端是 7 根光纤束(结构简图见文献^[4,5]),锥型混合棒采用热挤出方式预制,锥形器的长度与耦合器性能有很大关系,长度短于 10 cm 的耦合器均匀性较差,长度大于 20 cm 的耦合器又有较大的损耗。文献^[4]中,作者制作的耦合器作为分路器和合波器时损耗分别为 2.9 dB 和 9.89 dB。

* 国防科技预研基金(4131105010)资助课题。

E-mail: gewp517@sohu.com

收稿日期:2002-06-12; 收到修改稿日期:2002-09-02

3 新型 1×4 塑料光纤耦合器

3.1 耦合器的结构

我们制作了 1×4 塑料光纤耦合器,塑料光纤结构示意图见图 1。塑料光纤采用 GH4001 聚甲基丙烯酸甲酯塑料光纤,纤芯和包层折射率分别为 1.490 和 1.417,数值孔径为 0.47,外径为 1 mm,在波长

650 nm 时的衰减为 170 dB/km。通过加热塑料光纤至软化温度将其拉成锥形,锥形腰部直径 0.5 mm,长约 10 mm,4 根同样的光纤集成一束构成耦合器的 A 端;耦合器 B 端一根光纤通过加热将其缩成锥型,直径 1.33 mm,锥形长度约 10 mm。

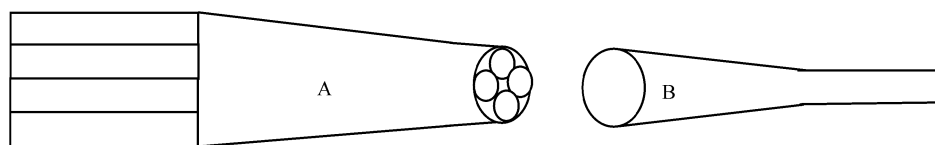


Fig. 1 Schematic diagram of 1×4 plastic optical fiber coupler

在锥形光纤中,如光线从大端入射,光线在光纤芯包层界面的反射角随着反射次数的增加而逐渐变小,全反射的条件很容易破坏。在光纤芯包界面发生全发射的条件是 $\theta > \theta_c$, θ_c 为临界角,而锥形光线的 θ 一直在减小,到某次反射后全反射条件不再满足,即使在锥角很小的情况下,也会有 $\theta < \theta_c$,从小端出射的光显得发散^[6]。当光线从锥形光纤的小端入射时,每次从光纤芯包层的内界面上反射后,反射的角度就会增加,所以大多数的入射光线都能满足全反射条件,同样相应的出射角比原来的入射角小,出射光因而有聚光作用。光从大端入射时在锥形光纤中的传播路径如图 2 所示。

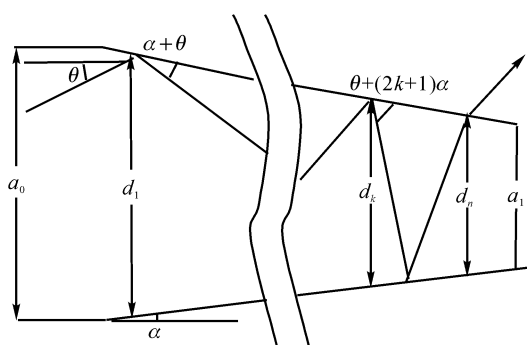


Fig. 2 Ray trajectory in a tapered fiber

光纤中传导模转变成包层模的效率 k 为^[3]

$$k = 1 - (a_1/a_0)^2, \quad (1)$$

不发生辐射的条件是 $d_n < a_1$ 。 d_n 为光线在锥形光纤中第 n 次反射的直径:^[3]

$$d_n = d_1 - 2 \tan \alpha \sum_{i=1}^{n-1} r_i \cot(\theta + 2i\alpha), \quad (2)$$

$$n = \frac{\arccos(n_2/n_1) - \theta + \alpha}{2\alpha} + 1, \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan(a_0 - a_1)/\Delta l, \quad (4)$$

其中, θ 为入射光线与光纤轴的夹角, α 为锥形光纤

的半锥角。 n_1 和 n_2 分别为芯层和包层的折射率, n 为光线变成泄漏光线时在纤芯内的反射次数, Δl 为锥形的长度。当耦合器作为分路器时(即 B→A),光线都是从锥形光纤的小端入射,入射的光纤不会变成泄漏光线;当光纤作为合波器(即 A→B)时,制作耦合器时,通过计算选择两端锥形光纤尺寸参量 a_0 和 a_1 ,以满足光线不发生辐射的条件。

3.2 耦合器的指标

光纤耦合器的重要指标有附加损耗、插入损耗、通道均匀性及通道间串扰。

1) 附加损耗和插入损耗

附加损耗主要来源于两端光纤连接处的各种因素,包括两光纤端面不平行、端面处理不完善、两光纤的不完全准直等,另外在拉制和热缩光纤形成锥形过程中,光纤的弯曲变形也带来辐射损耗。所有这些因素都与工艺的控制密切相关。由于耦合器几何结构的原因,两端光纤受光面积的不完全匹配带来基本损耗。

附加损耗和插入损耗的定义分别为

$$\left. \begin{aligned} L &= -10 \lg(P_o/P_i) = -10 \lg(\eta_r \eta_E \eta_G), \\ L_i &= -10 \lg(P_{oi}/P_i), \end{aligned} \right\} (5)$$

其中, P_o 为各个端口的输出功率和, P_{oi} 为第 i 个端口的输出功率, P_i 为总输入功率。 η_r 为端面反射的耦合效率, η_E 为两端面连接处各种附加损耗因素的耦合效率, η_G 为几何结构本身的耦合效率,即两光纤端面面积失配引起的,其值分别为

$$\eta_r = 1 - [(n_1 - n_0)/(n_1 + n_0)]^2, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_G &= 4(d_A/d_B)^2, \quad (A \rightarrow B) \\ \eta_G &= (d_A/d_B)^2, \quad (B \rightarrow A) \end{aligned} \right\} (7)$$

其中, n_0 为两光纤之间介质的折射率, d_A 、 d_B 分别为 A 端、B 端光纤的直径。

2) 耦合器通道的均匀性

通道均匀性定义为

$$\Delta L = -10 \lg(P_{\text{omin}}/P_{\text{omax}}), \quad (8)$$

其中, P_{omin} 和 P_{omax} 分别为各端口中输出功率最小值和最大值。

3) 耦合器串扰

耦合器串扰是某一光路对其它光路中的光信号的影响, 作为合波器时串扰定义为

$$C_{ij} = -10 \lg(P_{j\text{o}}/P_{i\text{i}}), \quad (9)$$

其中, $P_{i\text{i}}$ 为第 i 个端口的输入功率, $P_{j\text{o}}$ 是第 j 个端口的输出功率。

4 实验结果

实验测得的耦合器作为分路器(B→A)时的耦合损耗为 3.78 dB, 其中计算得出的反射损耗是 0.17 dB, 几何结构引入的面积不匹配带来的损耗为 2.477 dB($d_A=0.5, d_B=1.33$), 因此分路器的附加损耗是 1.13 dB。四个端口的插入损耗分别是 10.88 dB, 9.22 dB, 10.92 dB, 9.81 dB, 均匀性 ΔL 为 1.7 dB。各个端口的串扰见表 1。

Table 1 Crosstalk from various ports

C_{ij}/dB	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$
$i=1$	—	39.2	40.6	38.7
$i=2$	37.1	—	37.2	37.7
$i=3$	38.2	36.6	—	37.2
$i=4$	37.9	36.0	37.8	—

讨论 从实验结果来看我们制作的耦合器损耗和串扰基本可满足要求, 但是均匀性较差, 主要原因还是工艺问题。在实验中, 塑料光纤的拉锥和热缩都是手工控制, 均匀性大受影响, 并且难以完全避免塑料

光纤的变形, 由此导致弯曲损耗; 锥形光纤端面的处理以及光路的准直对实验结果都有很大影响。我们制作的耦合器 B 端光纤直径是 1.33 mm, 在最佳情况下, A 端光纤的直径最大可为 0.55 mm, 此时, 几何结构的基本损耗是 1.65 dB, 因此可以严格控制 A 端细光纤的直径使其接近最佳直径以减小损耗。将我们制作的耦合器与混合棒型耦合器从结构上进行比较, 该功率耦合器少了混合棒这个中间元件, 结构显然更简单, 相应地也减少了混合棒的两个端面处理及连接带来的诸多影响。对于这种耦合器的制作下一步工作是采用机械的而非手工拉制和热缩光纤, 完善工艺中的各个步骤, 进一步改善其均匀性, 减小损耗。耦合器性能可望达到实用化的要求。

参 考 文 献

- 1 Giaretta G, White W, Wegmuller M *et al.*. High-speed (11 Gbit/s) data transmission using perfluorinated graded-index polymer optical fibers for short interconnects (<100 m). *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3):347~349
- 2 Schnitzer P, Grabherr M, Jager R *et al.*. GaAs VCSEL's at 780 and 835 nm for short-distance 2.5-Gb/s plastic optical fiber data links. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(7):767~769
- 3 Imoto K, Sano H, Maedu M. Plastic optical fiber star coupler. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(19):3443~3447
- 4 Ai Jun, Li Yao. Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6):1024~1028
- 5 Yang Chun, Sun Xiaohan, Wang Yunming *et al.*. 1×7 Cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9):1116~1122
- 6 Yin Zongmin. *Fiber and Guided Wave—Theory and Component* (光纤导波——理论和元件). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1995. 36~40 (in Chinese)

A Novel 1×4 Plastic Optical Fiber Power Coupler

Ge Wenping Li Zhonghui Yin Zongmin Zhou Zhengli

(National Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 12 June 2002; revised 2 September 2002)

Abstract: A novel plastic optical fiber (POF) power coupler is proposed, which is different from fused-taper type and mixing rod POF couplers. Loss factors of this coupler are analyzed theoretically. This coupler is based on thermal feature of POF, the two ends of the coupler is composed of fused-drawn tapered fiber and thermal-contracted tapered fiber. It is characterized by its simple configuration and easy fabrication. Experimental results indicate that the performance can meet the requirement of short distance plastic optical fiber transmission networks.

Key words: plastic optical fiber; coupler; taper fiber; insertion loss