

文章编号: 0253-2239(2001)09-1116-07

# 1 × 7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器<sup>\*</sup>

杨 春 孙小菡 王云明 张明德 丁 东

(东南大学电子工程系, 南京 210018)

摘要: 提出一种新型的使用圆柱形混合棒的 1 × 7 塑料光纤耦合器。该耦合器直接使用粗塑料光纤制作混合棒, 与传统的 1 × 7 圆锥形混合棒塑料光纤耦合器相比省略了成本高的混合棒拉锥过程, 因而成本较低。对混合棒失配面外接 U 形光纤光吸收器的 1 × 7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器进行了理论分析和实验研究, 实验测量该耦合器的通道串音小于 -40 dB, 其耦合效率接近于 1 × 7 圆锥形混合棒塑料光纤耦合器。实验结果表明该耦合器是一种高性能价格比的塑料光纤耦合器。

关键词: 耦合器; 塑料光纤; 混合棒; 串音; 损耗

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来, 大直径塑料光纤作为宽带局域网的传输介质已成为研究热点, 塑料光纤可望在降低自身及其光收发器和互连器件成本的基础上, 以显著的性能价格比优势与电缆和石英光纤相竞争, 从而成为高速局域网的一个主要传输介质<sup>[1-3]</sup>。塑料光纤作为通信介质已被采纳为异步转移模式(ATM)通信标准, IEEE-1394“fire wire”等通信标准纳入塑料光纤的工作正在进行<sup>[1,2]</sup>。由于塑料光纤局域网中需要使用大量的光纤互连器件, 因此国外在研制高性能塑料光纤方面取得很大进展的同时<sup>[4-6]</sup>, 正在积极开展塑料光纤耦合器的研究<sup>[7-11]</sup>。其中, 混合棒光纤耦合器(MRC)是一种特别适合于塑料光纤的高性能价格比的耦合器结构。首先, 大直径塑料光纤的包层很薄(通常为 10 μm), 使得在光纤束与混合棒的连接界面上光纤芯的面积占界面总面积的比率较高, 从而确保耦合器具有很高的耦合效率。其次, 混合棒塑料光纤耦合器的结构简单且制作简便, 因而生产成本较低。

在目前的混合棒塑料光纤耦合器中,  $N \times N$  耦合器的结构简单且制作简便, 而  $1 \times N$  耦合器的制作较为困难<sup>[11]</sup>。传统的圆锥形混合棒的  $1 \times N$  耦合器使用时, 为了确保混合棒具有较小的散射损耗并且与光纤束的折射率、数值孔径相匹配, 圆锥形的混

合棒需要用圆柱形的混合棒进行加热拉锥制成, 而且拉锥过程中需要精确地控制温度分布、拉伸速率和拉伸长度才能得到所需几何形状的混合棒, 这就显著增大了  $1 \times N$  耦合器的生产成本, 从而不能满足塑料光纤局域网使用低成本器件的要求。

本文提出了使用圆柱形混合棒的  $1 \times 7$  塑料光纤耦合器(CMRC), 其耦合效率接近于  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器, 但加工简便, 成本显著低于  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器, 但也带来了结构性的串音。为此, 本文研究使用光吸收涂层和 U 形光纤光吸收器的两种具有较小串音的  $1 \times 7$  CMRC 耦合器。

## 2 混合棒耦合器的结构和性能

### 2.1 混合棒耦合器

图 1 为  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器的结构简图, 图 2 为  $1 \times 7$  圆柱形混合棒耦合器的结构简图。二种耦合器的 A 端是一根外径为  $\phi_f = 0.5$  mm、芯径为  $\phi_{\text{core}} = 0.48$  mm 的塑料光纤, B 端是由 7 根与 A 端同样的塑料光纤组成的光纤束, 位于耦合器中间的是混合棒, 混合棒与光纤及光纤束采用热缩套管内充填环氧树脂胶的方法进行连接。圆锥形混合棒耦合器的混合棒包括两个圆柱形的连接段  $l_A$  和  $l_B$ , 中间是圆锥形的过渡段  $l_T$ , 其 A 端的芯径  $\phi_s = 0.48$  mm, B 端的芯径  $\phi_L = 1.48$  mm。圆柱形混合棒耦合器的混合棒为圆柱形, 其长度为  $l_M$ , 混合棒 A 端横截面上未接光纤的阴影区域, 称为混合棒的失配面。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60007005)和国家 95 重点科技项目(95-720-22-01)资助课题。

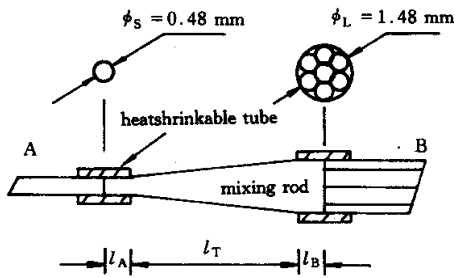


Fig. 1 Schematic of 1×7 TMRC

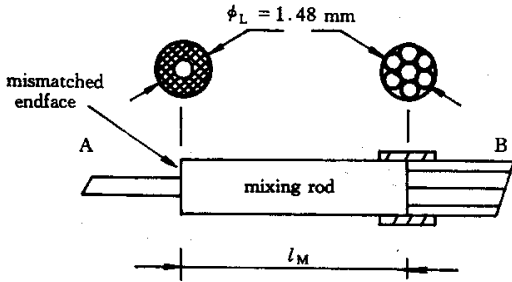


Fig. 2 Schematic of 1×7 CMRC

### 2.1.1 损耗

混合棒耦合器的耦合效率  $\eta$  可以表示为<sup>[11]</sup>:

$$\eta = P_o/P_i = \eta_T \eta_C \eta_L \eta_i \eta_o, \quad (1)$$

式中,  $P_i$  和  $P_o$  分别是耦合器的输入和输出光功率。 $\eta_T$  表征圆锥形波导的集光效率, 它与混合棒的锥度有关。 $\eta_C$  表征混合棒与光纤及光纤束连接端面的面积匹配效率, 等于光纤束中纤芯的面积与连接端面总面积的比率。 $\eta_L$  是与耦合器长度有关的效率因子, 它由耦合器所用光纤和混合棒的传输损耗决定。 $\eta_i$  表征混合棒与光纤芯接触界面的菲涅耳反射, 由于界面有环氧树脂,  $\eta_i$  由环氧树脂、光纤及混合棒的折射率决定。 $\eta_o$  表征由弯曲等其它因素造成的损耗。混合棒耦合器的总损耗可表示为:

$$L = -10 \lg \eta = L_f + L_e = -10 \lg(\eta_T \eta_C) - 10 \lg(\eta_L \eta_i \eta_o), \quad (2)$$

式中,  $L_f$  由  $\eta_T$  和  $\eta_C$  表征的损耗项构成, 它是由混合棒耦合器的拼接式结构决定的基本损耗。本文定义耦合器的附加损耗  $L_e$  为  $\eta_L$ 、 $\eta_i$  和  $\eta_o$  构成的损耗。

对于 1×7 圆锥形混合棒耦合器,  $\eta_T^T$  和  $\eta_C^T$  与耦合器中光传输的方向有关。并且, 当耦合器作合波器使用时 (B→A), 由于锥形混合棒能激发大量的辐射光线, 因此  $\eta_T^T$  还与混合棒和输出端光纤中光场的空间瞬态有关, 因而与输出光纤的长度有关。设耦合器输入端的光纤足够长, 以致能在输入光纤中均匀激发所有的模式, 若输出端光纤足够长, 则当输出

光纤中光场达到空间稳态时 1×7 圆锥形混合棒耦合器的基本损耗达到其上限, 如(3)式所示(详见附录 A):

$$L_f^T = -10 \lg(\eta_T^T \eta_C^T) = \begin{cases} -10 \lg[\chi(\phi_{core}/\phi_L)^2] & A \rightarrow B, \\ -10 \lg[(\phi_{core}/\phi_L)^2] & B \rightarrow A. \end{cases} \quad (3)$$

而 1×7 圆柱形混合棒耦合器使用圆柱形的混合棒, 在光纤与混合棒的数值孔径相同的情况下, 输入光纤中的束缚光线耦合入混合棒中仍为束缚光线, 混合棒中的束缚光线耦合入输出光纤中也为束缚光线, 因而输出光纤中的光场接近于空间稳态, 因此 1×7 圆柱形混合棒耦合器的基本损耗为(详见附录 B):

$$L_f^C = -10 \lg(\eta_T^C \eta_C^C) = \begin{cases} -10 \lg[\chi(\phi_{core}/\phi_L)^2] & A \rightarrow B, \\ -10 \lg[(\phi_{core}/\phi_L)^2] & B \rightarrow A. \end{cases} \quad (4)$$

比较(3)式和(4)式可知, 1×7 圆柱形混合棒耦合器的基本损耗与 1×7 圆锥形混合棒耦合器的输出达稳态时的基本损耗相同。由于实际的塑料光纤局域网中, 作为中心节点的星型耦合器到用户端的距离通常 30 m ~ 100 m 之间, 最远可达 1 km, 此时 1×7 圆锥形混合棒耦合器输出光纤中的光场接近于空间稳态, 而其基本损耗也接近于其上限, 如(3)式所示, 因此在实际使用中, 1×7 圆柱形混合棒耦合器的基本损耗接近于 1×7 圆锥形混合棒耦合器的基本损耗。

### 2.1.2 串音

串音 (CT) 是光纤耦合器的一项重要性能指标, 它直接影响了通道的信噪比和误码率。对于图 1 和图 2 所示的耦合器, 设由 B 端第  $i$  根光纤输入的光功率为  $P_i$ , 其中耦合入 B 端第  $j$  根光纤的光功率为  $P_j$ , 则从 B 端第  $i$  根光纤到第  $j$  根光纤的通道串音效率  $\eta_{ij}$  为:

$$\eta_{ij} = P_j/P_i = \eta_{s,ij} \eta_{e,ij}. \quad (5)$$

式中,  $\eta_{s,ij}$  表征由混合棒 A 端失配面的菲涅耳反射造成的串音。 $\eta_{e,ij}$  表征由混合棒内部的散射以及混合棒与光纤芯连接界面的散射、菲涅耳反射等其它因素造成的串音。通道间串音  $CT_{ij}$  为:

$$CT_{ij} = 10 \lg \eta_{ij} = CT_{s,ij} + CT_{e,ij} = 10 \lg \eta_{s,ij} + 10 \lg \eta_{e,ij}. \quad (6)$$

式中, 耦合器的附加通道串音  $CT_{e,ij}$  由  $\eta_{e,ij}$  表征的串音构成。 $CT_{s,ij}$  由  $\eta_{s,ij}$  表征的串音构成, 它与混合棒

A 端失配面的结构有关,称为耦合器的结构性通道串音。对于  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器,混合棒 A 端不存在失配面,因此没有结构性通道串音,只存在附加通道串音。但对于  $1 \times 7$  圆柱形混合棒耦合器,则不仅存在附加串音,还存在由混合棒 A 端失配面造成的结构性通道串音。

考察图 2 所示的圆柱形混合棒耦合器,混合棒 A 端失配面裸露在空气中,故称其为 N-CMRC (Naked-CMRC)。对于这类耦合器,混合棒 A 端失配面与端面总面积的比率为  $[1 - (\phi_f/\phi_L)^2]$ ,从 B 端第  $i$  根光纤到第  $j$  根光纤的结构性通道串音为

$$CT_{s,ij}^K = 10 \lg \eta_{f,ij}^K = 10 \lg \left\{ \left( \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\phi_f}{\phi_L} \right)^2 \right] \left( \frac{\phi_{\text{core}}}{\phi_L} \right)^2 \right\}, (7)$$

式中  $\phi_f$  为分支光纤的外径,  $\phi_{\text{core}}$  为分支光纤的芯径,  $n_1$  为混合棒纤芯的折射率,空气的折射率  $n_0 = 1.0$ 。若图 2 中的耦合器采用聚苯乙烯 (PS) 塑料光纤制作混合棒,其纤芯折射率  $n_{1,PS} = 1.58$ 。根据 (7) 式计算得  $CT_{f,ij}^K = -23.3$  dB。由于光纤耦合器通常要求串音小于  $-40$  dB<sup>[12]</sup>,因此 N-圆柱形混合棒耦合器需要改进以降低串音。

## 2.2 低串音的 $1 \times 7$ 圆柱形混合棒耦合器

由于  $1 \times 7$  圆柱形混合棒耦合器的结构性通道串音来源于混合棒 A 端失配面的菲涅耳反射,因此降低失配面的菲涅耳反射是降低串音的有效途径。本文研究了两种降低串音的方法。第一种方法是在混合棒 A 端失配面上涂覆光吸收材料,称为 C-CMRC (Coated-CMRC),根据光吸收介质反射界面的功率损耗公式可知<sup>[12]</sup>,通过选择合适的光吸收材料可以显著地降低反射光功率,从而可以显著地降低串音。第二种方法是在混合棒 A 端失配面上外接光吸收器,若使用吸收比为 1 的黑体作为光吸收器,则入射失配面的光全部被吸收,没有光被反射回混合棒 B 端,从而可以较为彻底地降低串音。

外接 U 形光纤光吸收器的  $1 \times 7$  圆柱形混合棒耦合器称为 U-CMRC,其结构如图 3 所示。图 3(a) 是用塑料光纤制成的光吸收器,光纤 C 端被加热弯成 U 形,使 U 形弯曲段的曲率半径  $R$  等于光纤的半径,从光纤 A 端入射的光在 U 形段几乎全部辐射出光纤。因此,当光从与光纤芯的折射率相同的介质入射 U 形光纤 A 端时,光纤 A 端面就相当于该介质中的黑体表面。图 3(b) 是用 U 形光吸收器制成的  $1 \times 7$  U-CMRC 的结构简图,图 3(c) 是该耦合

器的外形示意图,位于耦合器中间的是长度为  $l_M$  的圆柱形混合棒,混合棒的 A 端和 B 端均连接了由 7 根光纤组成的光纤束,但两端光纤束的作用有所不同,B 端的 7 根光纤用作为耦合器的 7 个分支端口,而 A 端的光纤束中只有中间的一根光纤用作为耦合器的端口,A 端其余 6 根光纤的末梢被加热弯成 U 形,从而构成 U 形光纤光吸收器。

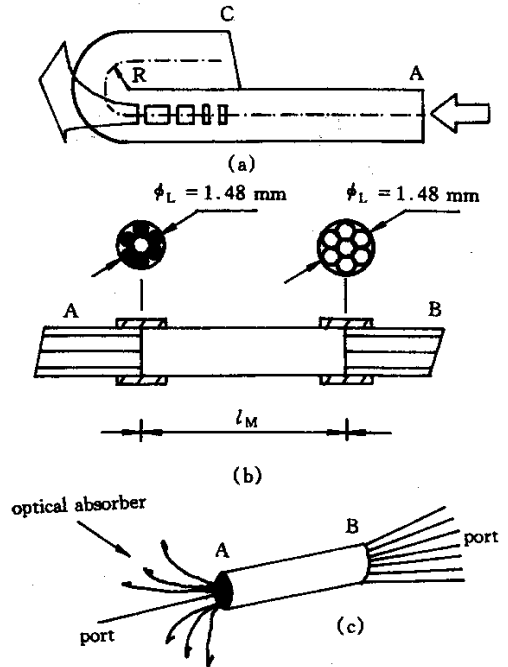


Fig. 3 (a) Enlargement of U shape optical absorber ;(b) Schematic of  $1 \times 7$  U-CMRC ;(c) Outline of  $1 \times 7$  U-CMRC

因 U-CMRC 的混合棒 A 端外接了光吸收器,失配面与端面总面积的比率减小为  $[1 - (\phi_f/\phi_L)^2]$ ,从 B 端第  $i$  根光纤到第  $j$  根光纤的结构性通道串音减小为

$$CT_{s,ij}^U = 10 \lg \eta_{f,ij}^U = 10 \lg \left\{ \left( \frac{n_1 - n_m}{n_1 + n_m} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\phi_f}{\phi_L} \right)^2 \right] \left( \frac{\phi_{\text{core}}}{\phi_L} \right)^2 \right\}, (8)$$

式中,  $n_m$  是填充在混合棒 A 端失配面上介质的折射率。若 U-CMRC 采用 PS 塑料光纤制作混合棒, A 端光纤束间隙填充的是折射率为 1.578 的环氧树脂胶,则将  $n_m = 1.578$  代入 (8) 式计算得:

$$CT_{f,ij}^U = -80.1 \text{ dB}.$$

由此可见,  $1 \times 7$  U-CMRC 的结构性通道串音是非常小的。

综合以上的分析结果可知,  $1 \times 7$  U-CMRC 的结构性通道串音非常小,其基本损耗接近于  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器,因此其关键性能与  $1 \times 7$  圆锥形混

合棒耦合器相当。特别是,U-CMRC使用粗塑料光纤作为圆柱形混合棒,与圆锥形混合棒耦合器相比省略了加工难度大、成本高的混合棒拉锥过程,从而显著降低了成本、提高了性能价格比。

### 3 实验

实验中制作了1×7的N-CMRC、C-CMRC、U-CMRC这3种圆柱形混合棒塑料光纤耦合器,并测量了耦合器的损耗、通道均匀性和通道串音性能。

#### 3.1 耦合器的结构参数

实验中制作的3种1×7圆柱形混合棒耦合器使用同样的分支光纤和混合棒。耦合器的分支光纤采用日本Asahi Chemical公司的PMMA阶跃塑料光纤,其外径 $\phi_f = 0.5$  mm,纤芯直径 $\phi_{core} = 0.48$  mm,纤芯折射率 $n_{1,PMMA} = 1.492$ ,数值孔径 $NA = 0.5$ ,在650 nm波长的传输损耗为100 dB/km。光纤束由7根60 cm长的分支光纤组成,其端面用刀片简单切平。

混合棒采用南京玻璃纤维研究院提供的PS阶跃塑料光纤,其外径为1.5 mm,纤芯直径 $\phi_L = 1.48$  mm,纤芯折射率 $n_{1,PS} = 1.58$ ,数值孔径 $NA_r = 0.5$ ,在650 nm波长的传输损耗为500 dB/km。混合棒的长度 $l_M$ 是决定耦合器的通道均匀性的关键因数。Jun Ai等人<sup>[11]</sup>通过实验发现 $l_M = 18$  cm时混合棒弯曲的耦合器具有较好的通道均匀性,通道插入损耗的分散性小于3.23 dB。因此,本实验中3种1×7圆柱形混合棒耦合器均采用长度为18 cm的混合棒,但混合棒未作弯曲以免增大损耗。混合棒制作时,先用刀片将混合棒截取到预定长度,然后用1000目的金相砂纸将混合棒的两端磨平。

用上海树脂厂生产的E51环氧树脂和593固化剂配制粘接剂,对混合棒与光纤束进行粘接,环氧树脂胶充分固化后用V棱镜折射仪测得其折射率 $n_{epoxy} = 1.578$ 。

#### 3.2 性能测量与分析

表1列出了3种1×7圆柱形混合棒耦合器串音性能的测量数据,表1底部还列出了结构性通道串音的理论计算值 $CT_{s,ij}$ ,为方便与实测数据的对比,表中 $CT_{s,ij}$ 已用耦合器中混合棒和分支光纤的传输损耗 $L_t$ 进行了修正, $L_t = 2 \times 18$  cm  $\times$  500 dB/km  $+ 2 \times 60$  cm  $\times$  100 dB/km = 0.3 dB。根据耦合器的实测串音 $CT_{ij}$ ,从中扣除结构性通道串音( $CT_{s,ij}$

-  $L_t$ )就得到由其它因素造成的附加通道串音 $CT_{e,ij}$ :

$$CT_{e,ij} = 10 \lg \{ 10^{(CT_{ij}/10)} - 10^{[CT_{s,ij} - L_t]10} \}, (9)$$

表1中,N-CMRC通道串音的平均值为-23.5 dB,远高于-40 dB,因而不能满足光纤耦合器对串音的要求。另外,N-CMRC的结构性通道串音远远高于由其它因素造成的附加通道串音,表明N-CMRC的串音主要由结构性通道串音造成,因此降低结构性通道串音是获得低串音圆柱形混合棒耦合器的必然途径。C-CMRC的通道串音比N-CMRC降低了5 dB左右,但仍然远高于-40 dB,也不能满足光纤耦合器对串音的要求。U-CMRC的结构性通道串音仅为-80.4 dB,与附加通道串音相比微不足道,表明U-CMRC能够较为彻底地消除因使用圆柱形混合棒而带来的结构性通道串音。并且,U-CMRC通道串音的平均值为-40.1 dB,能够满足耦合器对串音的要求。另外,N-CMRC和U-CMRC的附加通道串音基本一致,因此测量数据客观地反映了N-CMRC和U-CMRC仅A端失配面的结构不同而其它部分的结构完全相同的本质,从而也证明了测量数据的可靠性。

Table 1. Crosstalk performance data of 1×7 CMRC

crosstalk	N-CMRC	C-CMRC	U-CMRC
max./dB	-23.0	-27.9	-39.4
min./dB	-23.8	-28.3	-41.0
mean/dB	-23.5	-28.2	-40.1
max - min /dB	0.8	0.4	1.6
mean square deviation/dB	0.2	0.2	0.6
structural crosstalk ( $CT_{s,ij} - L_t$ )	-23.6	—	-80.4
excess crosstalk ( $CT_{e,ij}$ )	-39.9	—	-40.1

表2列出了1×7 U-CMRC损耗性能的测量数据,还列出了Ai等人用PMMA塑料光纤和PMMA混合棒制作的1×7圆锥形混合棒耦合器的损耗性能以作对比<sup>[11]</sup>。表2中1×7圆锥形混合棒耦合器的损耗性能是在分支光纤长度短于5 m且混合棒作较大弯曲的情况下测量得到的。弯曲的锥形混合棒有利于模式耦合,从而能够提高耦合器的分光均匀性,但也使得相当部分的束缚光线耦合成辐射光线,并且当1×7圆锥形混合棒耦合器作为合波器时,超过 $(1 - \phi_{core}^2/\phi_L^2) \approx 90\%$ 的束缚光功率将耦合成辐射光线,其中隧道光线的光功率在辐射光线中占有一定的比重。而对于芯径和数值孔径都较大的塑料光纤,隧道光线经数百米后才能衰减到原功率的

10%<sup>[13]</sup> 此时输出光纤中的光场接近于空间稳态,  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器的基本损耗也接近于其上限。因此 Ai 等人在分支光纤长度短于 5 m 的情况下测量  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器的损耗值, 由于大量的辐射光线被检测并计入有效耦合光功率, 从而使损耗的测量值要小于耦合器的输出达到空间稳态时的损耗值。而表 2 中 U-CMRC 的损耗值是用波长为 650 nm 的激光二极管作为光源, 在混合棒未作弯曲的情况下测量得到的, 由于圆柱形混合棒中的束缚光线耦合入分支光纤中仍然为束缚光线, 分支光纤中基本上没有辐射光线, 因而分支光纤中的光场接近于空间稳态, 因此实验测得的 U-CMRC 的损耗值接近与耦合器的输出达到空间稳态时的损耗值。

表 2 中 U-CMRC 的基本损耗  $L_f$  按(4)式计算得到, 附加损耗  $L_e$  等于总损耗  $L$  减去基本损耗  $L_f$ 。U-CMRC 按分波器测量时附加损耗为 2.5 dB, 按合波器测量时附加损耗为 2.1 dB, 比圆锥形混合棒耦合器的附加损耗稍大。这一方面是由于 U-CMRC 的损耗测量值接近于耦合器的输出达到空

间稳态时的损耗值, 而 Ai 等人用较短分支光纤测得的圆锥形混合棒耦合器的损耗值小于耦合器的输出达到空间稳态时的损耗值, 从而使圆锥形混合棒耦合器的损耗测量值显得相对较小; 另一方面, 可能是由于 U-CMRC 的分支光纤和混合棒的端面处理不完善以及使用传输损耗较大的 PS 塑料光纤制作混合棒造成的。对于 U-CMRC 实验样品, PS 混合棒的传输损耗以及与 PMMA 光纤连接端面的菲涅耳反射损耗共计 0.16 dB。对于数值孔径为 0.5 的塑料光纤, 研磨端面的连接损耗为 0.7 dB, 用热平板处理的端面其连接损耗为 0.4 dB<sup>[14]</sup>。

由于实验中混合棒的端面用 1000 目的金相砂纸研磨, 分支光纤的端面仅用刀片简单切平, 因此混合棒两端与光纤的连接损耗大于 1.4 dB。如果  $1 \times 7$  U-CMRC 的混合棒和光纤束均使用 PMMA 塑料光纤, 其端面使用热平板处理, 则其附加损耗可以达到 1.7 dB 以下。因此, 实验数据表明  $1 \times 7$  U-CMRC 的损耗性能可以达到接近于  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器的水平。

Table 2. Loss of  $1 \times 7$  U-CMRC and  $1 \times 7$  TMRC

loss /dB	1 × 7 U-CMRC		1 × 7 TMRC	
	splitter (A → B)	mixer (B → A)	splitter (A → B)	mixer (B → A)
	overall performance		overall performance	
total loss $L$	3.80	11.89	2.90	9.89
fundamental loss $L_f$	1.27	9.72	1.18	8.22
excess loss $L_e$	2.53	2.17	1.72	1.67
	per channel performance		per channel performance	
max insertion loss in outer 6 channels	13.19	13.09	11.89	10.49
min insertion loss in outer 6 channels	12.21	11.95	10.89	9.51
center channel insertion loss	10.14	9.53	—	—
mean insertion loss	12.38	12.04	11.37	9.91
uniformity in outer 6 channels /dB	0.98	1.14	—	—
uniformity /dB	3.05	3.56	1.0	0.98

表 2 中, 位于 U-CMRC 分支光纤束周围的 6 个通道的插入损耗值基本接近, 其通道均匀性在分波器时为 0.98, 在合波器时为 1.14, 通道均匀性与 Ai 等人所测圆锥形混合棒耦合器的基本相同。但 U-CMRC 分支光纤束的中心通道的插入损耗明显比周围 6 个通道小 2 dB ~ 3 dB, 造成整个耦合器的通道均匀性较高, 在分波器时为 3.05 dB, 在合波器时为 3.56 dB。这是由于 U-CMRC 使用接近于准直光束的激光二极管作为光源测量损耗性能而造成的, 当大数值孔径的塑料光纤在准直光束的激励下, 光纤中低阶模的光功率显著高于高阶模的光功率, 又

因为低阶模的分布较为接近光纤轴线, 高阶模则离光纤轴线较远, 因此混合棒 B 端面上, 接近光纤轴线处的光功率密度较强, 而离光纤轴线较远处的光功率密度相对较弱, 从而使得耦合入分支光纤束中心通道的光功率较多, 而耦合入周围 6 个分支通道的光功率相对较弱, 造成了 U-CMRC 通道均匀性的测量值较高。由于在目前研究的塑料光纤通信系统中, 普遍采用激光二极管作为光源, 因此提高 U-CMRC 的通道均匀性需从耦合器的结构考虑。采用 Ai 等人将混合棒作较大弯曲是提高通道均匀性的一个效果较好的方法, 但可能增大耦合器的损耗;

另一个方法可以考虑将 U-CMRC 的 A 端单根光纤偏离混合棒轴线处连接, 这样在作为分波器时, 即使 A 端输入光纤在激光二极管的激励下具有较强的低阶模, 也能在混合棒中较为均匀地激励高阶模和低阶模, 从而确保耦合器 B 端具有较高的分光均匀性, 在作为合波器使用时, 混合棒中的高阶模和低阶模也能够较为均匀地耦合入 A 端的单根光纤, 使得耦合器在保持耦合效率不变的情况下具有较高的通道均匀性。

结论 研究了  $1 \times 7$  圆柱形混合棒塑料光纤耦合器, 理论计算表明  $1 \times 7$  圆柱形混合棒塑料光纤耦合器的基本损耗与  $1 \times 7$  圆锥形混合棒塑料光纤耦合器输出达稳态时的基本损耗相同, 但串音比后者高。为减小串音, 设计并通过实验研究了混合棒失配面外接 U 形光纤光吸收器的  $1 \times 7$  圆柱形混合棒塑料光纤耦合器, 实验结果表明该耦合器的串音小于  $-40$  dB, 其耦合效率接近于  $1 \times 7$  圆锥形混合棒塑料光纤耦合器, 又由于该耦合器直接使用粗塑料光纤制作混合棒, 与  $1 \times 7$  圆锥形混合棒塑料光纤耦合器相比省略了成本高的混合棒拉锥过程, 因而成本较低, 因此该耦合器是一种高性能价格比的塑料光纤耦合器。

### 参 考 文 献

- [1] DeCusatis C. Optical data communication: Fundamentals and future directions. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(12):3082~3099
- [2] Cirillo J. High speed plastic networks (HSPN): A new technology for today's. *Application IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1996, **11**(10):10~13
- [3] 杨 春, 孙小菡, 张明德等. 用于短距离通信的塑料光纤技术. *高技术通信*, 2000, **10**(2):107~110
- [4] Koeppen C, Shi R F, Chen W D et al.. Properties of plastic optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1998, **15**(2):727~739
- [5] Ilyashenko V, Berman E. Graded index plastic optical fiber: Quo vadis?. *Proceeding of the 48th Electronic Components & Technology Conference*, Piscataway: IEEE, 1998. 987~991
- [6] Koike Y, Ishigure T. Progress of low-loss GI polymer optical fiber from visible to  $1.5 \mu\text{m}$  wavelength. *The 23th European Conference on Optical Communications*. Stevenage: IEE, 1997. 59~62
- [7] Imoto K, Sano H, Maeda M. Plastic optical fiber star coupler. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(19):3443~3447
- [8] Blyler L L, Grimes G J. Polymer optical mixing rod coupler. *IEEE Transactions on Components*, 1990, **13**(1):144~146
- [9] Li Yao, Wang Ting, Fasanella K.  $4 \times 16$  polymer fiber optical array couplers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*,

1996, **8**(12):1650~1652

- [10] Li Yao. An overview of NECI projects on thin-cladding POF-based optical interconnects. *Proc. SPIE*, 1999, **3632**:70~77
- [11] Ai J, Li Yao. Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6):1024~1028
- [12] Robert J H. *Fiber Optic Communications Design Handbook*. Prentice-Hall International, (Englewood Cliffs, N.J. 07632, USA), 1990. 136
- [13] Snyder A W, Love J D. 光波导理论. 北京:人民邮电出版社, 1991. 836
- [14] Hove A V, Coosemans T, Dhoedt B et al.. Termination of small diameter ( $125 \mu\text{m}$ ) plastic optical fiber for  $1 \times 12$  datacommunication. *Proceedings of 48th IEEE Electronic Components and Technology Conference*, Piscataway: IEEE, 1998. 783~789
- [15] Senior J M. *Optical Fiber Communications*. UK, Cambridge: Prentice Hall, 1992. 221
- [16] Snyder A W, Love J D. 光波导理论. 北京:人民邮电出版社, 1991. 132~134
- [17] 李 劭, 虞秀琴, 屈 刚等. 复合抛物面型集光器与多模光纤的耦合. *光学学报*, 1998, **18**(8):1097~1101

### 附录

在以下的推导中, 设混合棒和分支光纤的包层和芯层的折射率相同。

A  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器的表达式

1) 分波器 (A $\rightarrow$ B)

由于从耦合器 A 端光纤入射锥形混合棒的光在混合棒中仍为束缚光线, 因而混合棒锥形段的集光效率  $\eta_T^T$  为

$$\eta_T^T = 1. \quad (\text{A1})$$

设锥形混合棒中光场从 A 传播到 B 端时, 光场的模式功率分布趋于均匀, 则混合棒  $l_B$  段与 B 端单根分支光纤的接头因芯径不等而造成的耦合效率为  $(\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2$  [15], 式中  $\phi_L$  是混合棒  $l_B$  段的芯径,  $\phi_{\text{core}}$  是分支光纤的芯径。因此, 从混合棒  $l_B$  段到 B 端 7 根分支光纤总的耦合效率  $\eta_C^T$  为:

$$\eta_C^T = \kappa (\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2, \quad (\text{A2})$$

由 (A1) 式和 (A2) 式可得分波器时  $1 \times 7$  圆锥形混合棒耦合器的  $L_T^T$  为:

$$L_T^T = -10 \lg(\eta_T^T \eta_C^T) = -10 \lg[\kappa (\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2], \quad (\text{A3})$$

2) 合波器 (B $\rightarrow$ A)

光场从混合棒 B 端向 A 端耦合时, 部分束缚光线将合成辐射光线。设从耦合器 B 端入射锥形混合棒的光场具有均匀的模式功率分布, 若混合棒中的辐射光线全部由辐射而损失, 则混合棒锥形段的集光效率  $\eta_T^T$  为 [16, 17]

$$\eta_T^T = (\phi_s/\phi_L)^2, \quad (\text{A4})$$

式中,  $\phi_L$  是混合棒  $l_B$  段的芯径,  $\phi_s$  是混合棒  $l_A$  段的芯径。

设混合棒  $l_A$  段的芯径  $\phi_s$  与光纤的芯径  $\phi_{\text{core}}$  相等, 则从混合棒  $l_A$  段到 A 端光纤的耦合效率  $\eta_C^T$  为

$$\eta_C^T = 1, \quad (\text{A5})$$

由 (A4) 式、(A5) 式及  $\phi_s = \phi_{\text{core}}$  可得合波器时  $1 \times 7$  圆锥形混

合棒耦合器的  $L_f^T$  为：

$$L_f^T = -10 \lg(\eta_T^T \eta_C^T) = -10 \lg[(\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2], \quad (\text{A6})$$

B  $1 \times 7$  圆柱形混合棒耦合器的表达式

由于光纤与圆柱形混合棒的数值孔径相同,则输入光纤中的束缚光线耦合入混合棒中仍为束缚光线,混合棒中的束缚光线耦合入输出光纤中也为束缚光线,混合棒中光场没有辐射光线造成的损耗,因此圆柱形混合棒的集光效率  $\eta_T^C$  为<sup>[16]</sup>

$$\eta_T^C = 1. \quad (\text{B1})$$

1) 分波器 (A→B)

设从圆柱形混合棒 A 端入射的光场传播到混合棒 B 端时模式功率呈均匀分布,则混合棒与 B 端单根光纤的接头因芯径不等而造成的耦合效率为  $(\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2$ <sup>[15]</sup>,式中  $\phi_L$  是混合棒的芯径, $\phi_{\text{core}}$  是分支光纤的芯径。因此从混合棒到 B 端

7 根分支光纤总的耦合效率  $\eta_C^C$  为：

$$\eta_C^C = (\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2, \quad (\text{B2})$$

根据(B1)式和(B2)式可得分波器时  $1 \times 7$  圆柱形混合棒耦合器的  $L_f^C$  为：

$$L_f^C = -10 \lg(\eta_T^C \eta_C^C) = -10 \lg[\tau(\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2], \quad (\text{B3})$$

2) 合波器 (B→A)

设从圆柱形混合棒 B 端入射的光场传播到混合棒 A 端时模式功率呈均匀分布,则混合棒与 A 端单根光纤的接头因芯径不等而造成的耦合效率为<sup>[15]</sup>

$$\eta_C^C = (\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2, \quad (\text{B4})$$

根据式(B1)和(B4)可得合波器时  $1 \times 7$  圆柱形混合棒耦合器的  $L_f^C$  为：

$$L_f^C = -10 \lg(\eta_T^C \eta_C^C) = -10 \lg[\tau(\phi_{\text{core}}/\phi_L)^2], \quad (\text{B5})$$

## 1 × 7 Cylindrical Mixing-Rod Plastic Optical Fiber Coupler

Yang Chun Sun Xiaohan Wang Yunming Zhang Mingde Ding Dong

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

(Received 26 June 2000; revised 4 December 2000)

**Abstract:** A novel high cost-effective  $1 \times 7$  cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler (CMRC) is proposed. Comparing with conventional tapered mixing-rod plastic optical fiber  $1 \times 7$  coupler (TMRC),  $1 \times 7$  CMRC using cylindrical plastic optical fiber (POF) as mixing-rod instead of tapered-POF, thus the high demanding POF tapering process is eliminated and the cost of the coupler is greatly reduced. In order to reduce the crosstalk of  $1 \times 7$  CMRC introduced by using of cylindrical mixing-rod, a U-shape optical fiber absorber is placed on the mismatched area on the end face of the mixing-rod. Theoretical analysis and experimental measurement indicate that  $1 \times 7$  CMRC with U shape absorber has a equivalent coupling efficiency as  $1 \times 7$  TMRC. The measured crosstalk of the  $1 \times 7$  CMRC with U shape absorber is lower than  $-40$  dB.

**Key words:** coupler; plastic optical fiber; mixing rod; crosstalk; loss