

# 1 × 7 锥形混合棒塑料光纤耦合器\*

夏可宇 于荣金 孟华茂

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北秦皇岛 066004)

**摘要** 利用光线追迹法进行数值仿真得到了锥形混合棒塑料光纤耦合器的分光比与其长度的关系. 数值仿真表明: 这种耦合器的分光比随锥形光波导长度增加, 在 0.143 (即均分处) 上下呈振荡型变化. 选择一均分且分光比变化平缓的区域作为制作光波导的长度, 通过拉伸粗的光波导棒成锥形且达到所需的长度, 并采用精密的机械连接, 制作出了 1 × 7 塑料光纤耦合器. 测试数据表明: 这种塑料光纤耦合器具有很高的均匀性.

**关键词** 光线追迹法; 耦合器; 分光比; 均匀性; 塑料光纤

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## 0 引言

塑料光纤作为光接入网最有前途的传输介质之一, 越来越受到人们的关注, 而塑料光纤耦合器作为塑料光纤网络关键的无源器件之一也吸引了越来越多的研究. 塑料光纤耦合器可用集成光学技术和微光学等方法制作<sup>[1]</sup>, 已有拼接型<sup>[2]</sup>、熔融拉锥型<sup>[2]</sup>、平面光波导型<sup>[3]</sup>和混合棒型<sup>[4,5]</sup>等不同的类型. 但每一种类型都不是很完善, 尚处于研究改进中. 混合棒耦合器 (mixing-rod coupler, 简称 MRC) 型制作难度适中, 均匀性也很好, 是制作均匀分光耦合器比较好的方法. 与文献[5]不同, 通过数值仿真找到了优化的光波导结构, 其长度不是 15 cm, 而是 2.4 cm, 并通过制作与测试, 证明这种 1 × 7 锥形混合棒塑料光纤耦合器不仅尺寸小、制作方便, 同样具有很好的性能.

## 1 光线追迹法

锥形棒塑料光纤耦合器相对于光波尺寸来说是很大的, 对于 1 × 7 的耦合器, 细端直径 1 mm, 粗端直径 3 mm, 而对于 PMMA 芯的塑料光纤来说, 其低损耗传输窗口约为 650 nm, 锥形棒波导的横向尺寸为光波长的几千倍. 因此, 相对于锥形棒光波导来说, 可以认为光波长  $\lambda \rightarrow 0$ , 适合利用几何光学中的光线追迹法来分析和仿真其性能.

由于我们采用芯径 980  $\mu\text{m}$ 、外径 1000  $\mu\text{m}$  的阶跃折射率塑料光纤作为输入端, 在这种光纤中传输的模式数达几百万个, 所以输入端光场达到稳定时可以认为光功率在整个截面上均匀分布, 并且在数

值孔径角内各方向上均匀分布. 我们制作的是阶跃型锥形光波导, 其结构如图 1 所示.

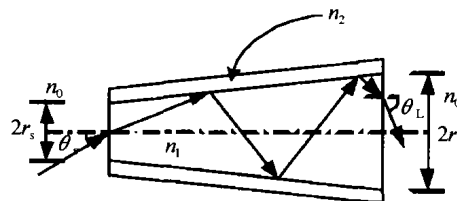


图 1 锥形光波导的结构

Fig. 1 The structure of tapered rod waveguide

图中  $n_0$ 、 $n_1$  和  $n_2$  分别为外界介质 (空气)、芯区介质和包层介质的折射率,  $r_s$  和  $r_L$  分别为芯区细端半径和粗端半径,  $\theta_s$  和  $\theta_L$  分别是光线在细端的入射角和在粗端的出射角. 假设从细端入射的光线能够通过全反射从粗端出射, 则有<sup>[6]</sup>

$$r_s \sin \theta_s = r_L \sin \theta_L \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 对于锥形棒光波导, 细端的孔径角大于粗端的孔径角. 锥形棒光波导耦合器用作分波器时关键在于分光比要一致. 由式(1)可知, 如果输入输出采用相同的光纤, 则从锥形光波导细端入射的光线若能通过全反射从粗端出射, 那么出射光线必在粗端光纤的接收孔径角范围内. 据此分析, 在利用光线追迹法进行仿真时, 以每条光线代表一定的光功率, 作为单位值, 对锥形光波导的细端截面和空间角均匀剖分, 每个人射点在数值孔径角的每个人射方向上有一条光线入射. 入射光线根据在光波导内的传播路径分为三类: 一、直接从粗端面出射的光线; 二、从侧面透射出去的光线, 由于反射光功率很小, 所以认为完全透射出去; 三、通过全反射从粗端面出射. 第三类光线反射后的传播方向由矢量形式的反射定律<sup>[7]</sup>确定

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A} - 2\mathbf{n}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}) \quad (2)$$

式中, 矢量  $\mathbf{n}$  为圆锥面在反射点处的法向量,  $\mathbf{A}$  为入射光线的方向单位矢量,  $\mathbf{A}'$  为反射光线的方向单位矢量.

\*河北省科委攻关项目 (99213567D) 和国家自然科学基金 (60277007) 资助项目

Tel: 03358074706 Email: xycomeon@ysu.edu.cn

收稿日期: 2003-08-12

PMMA 光波导的损耗较大,在仿真时可以根据光线传播的路径长度取其代表的功率值.不考虑损耗时的分光比与光波导长度的关系如图 2 所示.根据我们制作的混合棒塑料光纤的传输损耗取 1000 dB/km 时的分光比与光波导长度的关系如图 3 所示.从图可以看到,由于锥形光波导很短,传输损耗对分光比的影响很小,研究分光比与光波导长度的关系时可以不加考虑.此外,分光比并不是随光波导长度呈单调变化的,而是随着光波导长度的增加在均匀分光比值 0.143 的上下快速振荡变化的.在某些点处虽然分光比很一致,但分光比随光波导长度变化很快,变化幅度很大,要求锥形光波导的制作准确度很高.为了进一步选择和确定最佳的耦合器长度,对锥形光波导长度在 2 ~ 4 cm 范围内取 0.1 mm 的间隔进行更加精确的数值仿真,得到图 4 和图 5.由图可知,取光波导长度在 2.3 ~ 2.5 cm 之间较合适,在此区域内分光比变化缓慢且一致.我们制作的光波导长度为  $2.4 \pm 0.1$  cm.

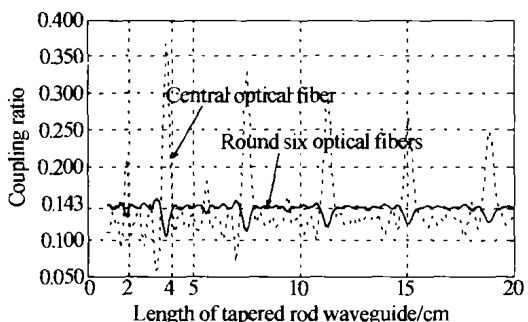


图 2 无损锥形光波导分光比与长度的关系  
截面剖分间距:  $20 \mu\text{m}$ , 空间角剖分间距:  $\pi/40$  rad  
Fig. 2 The relation between coupling ratio and length of a lossless tapered rod waveguide  
The section intervals:  $20 \mu\text{m}$ , space angle intervals:  $\pi/40$  rad

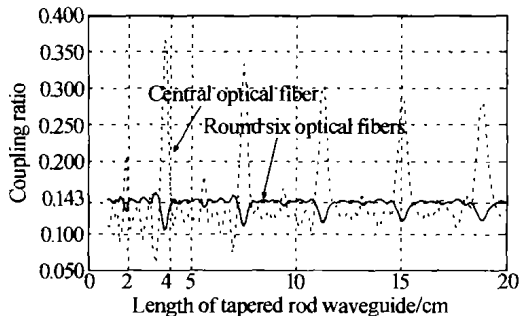


图 3 损耗为 1000 dB/km 的锥形光波导的分光比与长度的关系  
截面剖分间距:  $20 \mu\text{m}$ , 空间角剖分间距:  $\pi/40$  rad  
Fig. 3 The relation between coupling ratio and length of a tapered rod waveguide with 1000 dB/km loss  
The section intervals:  $20 \mu\text{m}$ , space angle intervals:  $\pi/40$  rad

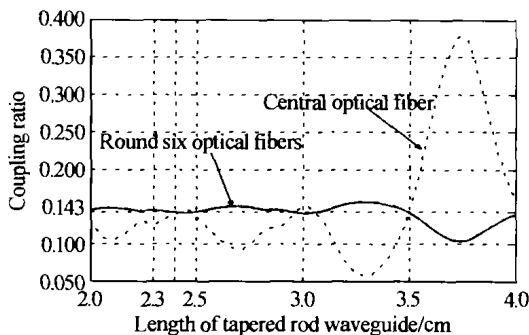


图 4 无损锥形光波导分光比与长度的关系  
截面剖分间距:  $20 \mu\text{m}$ , 空间角剖分间距:  $\pi/40$  rad  
Fig. 4 The relation between coupling ratio and length of a lossless tapered rod waveguide  
The section intervals:  $20 \mu\text{m}$ , space angle intervals:  $\pi/40$  rad

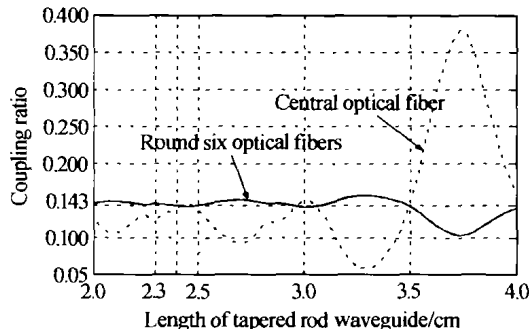


图 5 损耗为 1000 dB/km 的锥形光波导的分光比与长度的关系  
截面剖分间距:  $20 \mu\text{m}$ , 空间角剖分间距:  $\pi/40$  rad  
Fig. 5 The relation between coupling ratio and length of a tapered rod waveguide with 1000 dB/km loss  
The section intervals:  $20 \mu\text{m}$ , space angle intervals:  $\pi/40$  rad

## 2 耦合器制作

我们通过本体聚合制作出  $\Phi 18$  mm 的圆棒状 PMMA 光波导,然后拉伸得到细端直径 1 mm、粗端直径 3 mm,长度为  $2.4 \pm 0.1$  cm 的锥形棒光波导.锥形棒光波导芯区折射率为 1.49,包层采用有机硅,折射率为 1.34.实际制作的锥形光波导的锥面母线为指数型<sup>[8]</sup>,但其锥度很小,可以认为是直线.锥形混合棒光波导芯区粗端为  $\Phi 3.0$  mm,细端为  $\Phi 1.0$  mm.输入输出用光纤为市场上的商品塑料光纤,其纤芯为 PMMA,折射率为 1.492,包层折射率 1.417,外径为 1 mm,芯径为 0.98 mm. 1 × 7 耦合器结构示意图如图 6 所示.

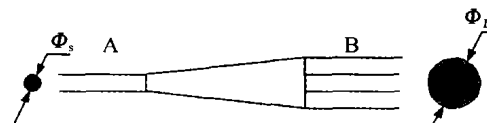


图 6 1 × 7 塑料光纤耦合器的结构示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of a 1 × 7 POF coupler

锥形光波导两端与光纤采用精密机械连接,机械连接部分组装后的 1/3 剖分立体图如图 7 所示. 拉制的锥形光波导放在 3 中,构成 1×7 耦合器时,单根光纤插入2中,由1拧紧固定,七根光纤插入4中,由5拧紧固定,然后由连接螺套6将光纤紧紧的与锥形光波导对接. 1与2,4与5通过锥面紧固光纤. 零件2,3和4的端面粗糙度为▽8,零件2对接端的孔径为 1.0<sup>+0.01</sup>/<sub>+0.00</sub> mm,零件3的孔径为 3.0<sup>+0.010</sup>/<sub>+0.005</sub> mm,零件4对接端的孔径为 3.0<sup>+0.02</sup>/<sub>+0.01</sub> mm.

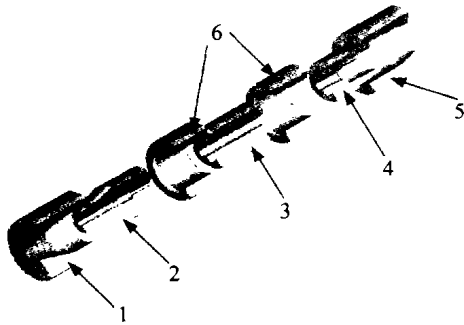


图7 机械连接 1/3 剖分立体图  
Fig.7 Stereogram of a mechanical connector to be cut away 1/3

### 3 数据测试与分析

对于制作的 1×7 塑料光纤耦合器作为分波器和合波器分别进行测量. 用作分波器时,用波长为 660 nm 的光信号通过塑料光纤从 A 端入射,然后在 B 端进入到 7 根光纤中. 测量输入功率和 7 根光纤的输出功率,计算出插入损耗、分光比和均匀性,具体数据如表 1 所示. 我们制作的光波导传输损耗约为 1000 dB/km,由表1可以看到,附加损耗只相当

表1 1×7 分波器与 7×1 合波器的性能指标

Loss	1×7 splitter	7×1 combiner
Total Loss $L_{total}$ /dB	5.54	12.96
Fundamental loss $L_f$ /dB	4.16	12.61
Excess Loss $L_{excess}$ /dB	1.38	0.35
Mean Loss $m_L$ /dB	14.03	12.98
Maximum Loss $L_{max}$ /dB	14.53	13.70
Minimum Loss $L_{min}$ /dB	13.12	12.22
Standard deviation $\delta_L$ /dB	0.53	0.48
Uniformity $\Delta L$ /dB	1.41	1.48

于 1.38 m 长的锥形混合棒塑料光纤的损耗,这是可以接受的. 在所有  $N$  个信道中,损耗的平均值  $m_L$  与标准偏差  $\delta_L$  的计算公式如下

$$m_L = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{N} \quad (3)$$

$$\delta_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (L_i - m_L)^2}{N}} \quad (4)$$

耦合器的损耗除了光波导本身的传输损耗外,

还包括器件端接时端面与光纤截面积的几何失配、端面连接间隙、端面倾斜、菲涅尔反射和数值孔径失配等引起的损耗. 与混合棒耦合器结构有关的基本损耗为几何失配与数值孔径失配引起的损耗. 耦合器用作分波器与用作合波器时,它们的基本损耗为

$$L_f = \begin{cases} -10 \log \left[ \frac{7(\Phi NA)^2}{(\Phi_L NA_L)^2} \right] & \text{分波器 A} \rightarrow \text{B} \\ -10 \log \left[ \frac{(\Phi NA)^2}{(\Phi_L NA_L)^2} \right] & \text{合波器 B} \rightarrow \text{A} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\Phi$  为耦合器尾纤的芯径,  $NA$  为耦合器尾纤的数值孔径,  $\Phi_L$  为锥形光波导粗端芯区的直径,  $NA_L$  为锥形光波导粗端的数值孔径.

由上述方法制作的耦合器的具体参量,可得

$$L_f = \begin{cases} 4.16 \text{ dB} & \text{分波器 A} \rightarrow \text{B} \\ 12.61 \text{ dB} & \text{合波器 B} \rightarrow \text{A} \end{cases}$$

在没有数值孔径失配的情况下,

$$L_f = \begin{cases} 1.27 \text{ dB} & \text{分波器 A} \rightarrow \text{B} \\ 9.72 \text{ dB} & \text{合波器 B} \rightarrow \text{A} \end{cases}$$

由此可见数值孔径失配带来的损耗是很大的,为减小耦合器的损耗,在芯区材料均为 PMMA 的情况下,应选锥形光波导包层折射率与尾纤包层折射率相同的材料.

将本文测试的数据与文献[5]的数据进行比较,其性能指标如表 2 所示.

表2 性能比较

Performance	Sample in this paper		Sample in Ref. 5	
	Splitter A→B	Combiner B→A	Splitter A→B	Combiner B→A
Length of tapered rod waveguide/cm	2.4 ± 0.1		15	
Total Loss $L_{total}$ /dB	5.54	12.96	2.90	9.89
Fundamental loss $L_f$ /dB	4.16	12.61	1.18	8.22
Excess Loss $L_{excess}$ /dB	1.38	0.35	1.72	1.67
Mean Loss $m_L$ /dB	14.03	12.98	11.37	9.91
Maximum Loss $L_{max}$ /dB	14.53	13.70	11.89	10.49
Minimum Loss $L_{min}$ /dB	13.12	12.22	10.89	9.51
Standard deviation $\delta_L$ /dB	0.53	0.48	0.4	0.39
Uniformity $\Delta L$ /dB	1.41	1.48	1.0	0.98

从表 2 可以看到,本实验样品主要由于数值孔径失配引起的损耗过大,使得总损耗大于文献[5]中的样品的损耗,但附加损耗比它们小. 此外,以长度仅 2.4 ± 0.1 cm 的锥形光波导作为耦合区实现了分光比均匀性接近于文献[5]中样品的性能,文献[5]中锥形光波导长度为 15 cm,器件尺寸大,不便于拉制.

### 4 结论

本文提出了适于混合棒塑料光纤耦合器数值分

析的光线追迹法. 利用光线追迹法进行数值仿真, 按数值仿真的最优锥形混合棒光波导长度范围, 制作出了长度为  $2.4 \pm 0.1$  cm 的  $1 \times 7$  锥形混合棒耦合器, 其分光比均匀且变化幅度很小. 由于制作锥形混合棒包层的材料折射率与尾纤包层材料折射率不同, 造成数值孔径失配, 使得耦合器的基本损耗大大增加, 但这一问题是容易解决的. 本研究有助于实现器件的小型化, 且制作起来也更简单方便.

#### 参考文献

- Ernst C, Hohman R, Loddoch M, *et al.* Fabrication of polymer optical fiber couplers; the integrated optical or micro-optical way?. POF2000, USA, 2000. 64 ~ 67
- Kawase L R, dos Santos J C, da Silva L P C, *et al.* Comparison among different fabrication techniques for POF couplers. POF2000, USA, 2000. 68 ~ 71
- Li Y, Fasanella K, Wang T. Low-cost planar optical couplers for large-core POF-based interconnects. SPIE, 1999, **3631**: 66 ~ 70
- 杨春, 孙小菡, 王云明, 等.  $1 \times 7$  圆柱形混合棒塑料光纤耦合器. 全国第十次光纤通信暨第十一届集成光学学术会议, 中国上海, 2001. 595 ~ 598  
Yang C, Sun X H, Wang Y M, *et al.*  $1 \times 7$  Cylindrical mixing-rod POF coupler. OFCIO2001, Shanghai, 2001. 595 ~ 598
- Ai J, Li Y. Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers. *Opt Eng*, 1999, **38**(6): 1024 ~ 1028
- 廖延彪. 光纤光学. 北京: 清华大学出版社, 2000. 5 ~ 6  
Liao Y B. Fiber optics. Beijing: Tsinghua University press, 2000. 5 ~ 6
- A. И. 杜德罗夫斯基著, 王之江, 王乃弘译. 光学仪器理论 (第一卷). 北京: 科学出版社, 1975. 17 ~ 20  
ТУДОРОВСКИЙ А И, translated by Wang Zhijiang, Wang Naihong. Theory of optical apparatus ( I ). Beijing: Science Press, 1975. 17 ~ 20
- Birks T A, Li Youwei W. The shape of fiber tapers. *J Lightwave Technol*, 1992, **10**(4): 432 ~ 438

## $1 \times 7$ Tapered Mixing-rod POF Coupler

Xia Keyu, Yu Rongjin, Meng Huamao

College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004

Received date: 2003-08-12

**Abstract** The relation between coupling ratio of  $1 \times 7$  tapered mixing-rod POF couplers and the length of tapered rod waveguides through numerical simulation by ray tracing method is given. The simulated results show that the coupling ratio oscillates around the uniform splitting point of 0.143 with the tapered rod waveguide length increasing. The coupling ratio is uniform and varies slowly when the tapered rod waveguide length lies in the region  $2.4 \pm 0.1$  cm. Some  $1 \times 7$  POF couplers was made through stretching the big diameter rod waveguides to a demanded size and using exact machine conjunctions. The measured data shows that this kind of POF coupler has not only small size, but also good uniformity.

**Keywords** Ray tracing method; Coupler; Coupling ratio; Uniformity; Polymer optical fiber



**Xia Keyu** was born in 1977, in Hubei Province. He graduated from Yanshan University and received B. S. degree in 1999. He is working at Yanshan University as an associate teacher. Now he is pursuing M. S. degree in Yanshan University. He is taking part in POF coupler's development. He is interested in optical fiber couplers and optical information processing.