

文章编号: 0258-7025(2001)05-0418-03

低损耗耦合器的研究

周桂耀 侯峙云 侯蓝田

(燕山大学红外光纤与传感研究所 秦皇岛 066004)

摘要 利用光线光学原理,通过理论计算,设计一种可降低耦合损耗的新型耦合器。经实验证明,在传输 CO₂ 激光能量时,光纤传输损耗可降低 50% 左右。

关键词 耦合器,低损耗,空芯光纤

中图分类号 TN 622 **文献标识码** A

Research on the Low Transmission Loss Fiber Coupler

ZHOU Gui-yao HOU Zhi-yun HOU Lan-tian

(Infrared Optical Fibers & Sensors Institute of Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract A novel taper coupler was fabricated. The transmission loss of hollow-core optical fibers with the taper coupler can be reduced to about 50 percent.

Key words taper coupler, low transmission loss, hollow-core optical fibers

1 引言

为了使大直径光束的激光能量耦合到空芯光纤中,若采用一个焦距为 $f = 100 \text{ mm}$ 的 ZnSe 透镜来完成,光束直径为 7.0 mm ,则耦合角为 4° ,聚光斑 $\phi = 0.5 \text{ mm}$ 。这对于一个直径 $\phi = 1.0 \text{ mm}$,长 $L = 1.0 \text{ m}$ 的空芯光纤来说,光束要在光纤中反射 70 次左右。考虑到反射是在有吸收的介质表面进行,那么就会给传输的激光能量造成很大的损耗。日本 Yuji Matsuura 等为小芯径空芯光纤设计了一种新型耦合器^[1,2],其损耗仅为 0.5 dB ,这种耦合器的主要作用是提高耦合效率,但当激光束在光锥中传输时,输出端激光光束发散角变大,这样在光纤中的反射次数增加,对于带有吸收介质的大芯径光纤效果是不明显的。为此,制造了一种专为大芯径的空芯光纤 ($> 1.3 \text{ mm}$) 使用的低损耗耦合器。

2 设计原理

把激光能量耦合进空芯光纤要根据激光光束直径尺寸、聚焦透镜在焦点上的光斑大小、空芯光纤的直径等因素来决定设计方案。如果光纤的芯径比聚

焦后的光斑大,则应该以降低耦合损耗为目的来设计耦合器,本文就是进行这种耦合器的设计。

根据光线光学原理,光波长远小于光纤直径时计算在光纤中两次反射之间激光所传输的距离 $|AB|$,如图 1,可求得 $|AB|$ 为

$$|AB| = \frac{d}{\tan\theta}$$

d 为光纤内径; θ 为入射角,也就是激光光束经透镜聚焦后的光锥半角。

同理可求出,入射激光在光纤的单位长度中反射次数 n

$$n = \frac{1}{|AB|} = \frac{\tan\theta}{d}$$

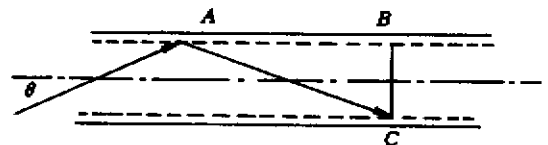


图 1 激光光束在光纤内反射

Fig. 1 Schematic view of the reflection of laser beam in the hollow-core fiber

根据光纤的传输损耗,若激光在光纤中进行第一次反射时的损耗表达式

$$dB = -10 \lg \frac{W_1}{W_0} = -10 \lg T_1$$

其中 W_0 为光纤的入射功率； W_1 为光纤输出功率；则 $T_1 = W_1/W_0$ 为激光光束只在光纤中发生一次反射时的反射率，若空芯光纤内反射膜的反射率为 ρ ，则输出功率 W_1 是光纤反射率 ρ 的函数，即 $W_1 = \rho W_0$ 。那么进行 n 次反射后的光纤损耗值为

$$dB = -10 \lg T_n = -10 \lg \rho^n = -10n \lg \rho = -\frac{10 \lg \rho}{d} \tan \theta$$

作 $dB-\theta$ 关系图如图 2 所示。

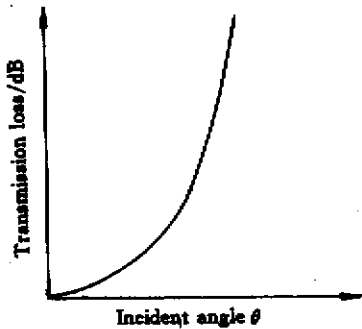


图 2 $dB-\theta$ 关系图

Fig. 2 Relation between transmission loss and incident angle

由图 2 可以看出空芯光纤传输损耗随入射角 θ 的增大而急剧增加。具有吸收特性介质的反射率与反射角 θ 有关，若考虑 θ 角满足全内反射的条件，可以忽略 θ 的影响。因此，光纤的传输损耗直接依赖于材料的反射率 ρ 和反射次数 n ，而反射率 ρ 由反射介质膜本身性能决定，本文不作讨论。为了减少传输损耗，由图 2 可知需使入射角 θ 尽量小，因此必须设计一种使入射激光光束近似与光束轴线重合的耦合器装置。

由图 3 可知，为了使光线 1 平行于光轴出射，必须有一反射镜位于 A 点，并与光轴成 $\theta/2 = \alpha$ 角的状态，对激光光束中的 $\theta - \Delta\theta$ 角的另一点也应具有一个与光轴成 $(\theta - \Delta\theta)/2$ 的反射镜，如此下去，设每有 $\Delta\theta$ 变化的角度，即入射角为 $\theta - m\Delta\theta$ 时，也有一个与光轴成 $(\theta - m\Delta\theta)/2$ 的反射镜。如图 4，当 $m =$

1 时光线长度为 L_1 ，它在 y 轴上的坐标为 $a_1 = L_1 \sin \alpha_1$ ，而在 x 轴上的坐标为 $b_1 = L_1 \cos \alpha_1$ ，以此类推，当 $m = 1, 2, 3, \dots$ 时分别得到 y 轴上的各点 y_1, y_2, \dots, y_m ， x 轴上的各点坐标为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ ，它们分别表示为

$$y_m = L_m \sin \alpha_m = L_m \sin \frac{\theta - m\Delta\theta}{2}$$

同理得 $x_m = L_m \cos \alpha_m = L_m \cos \frac{\theta - m\Delta\theta}{2}$

当 $\Delta\theta \rightarrow 0, m \rightarrow \infty$ 时，就会描绘出无限多个点 (x_m, y_m) 值，再用平滑法处理曲线后得到以 x 轴为旋转轴得到的圆锥，从而获得了具有最低耦合损耗的耦合器。

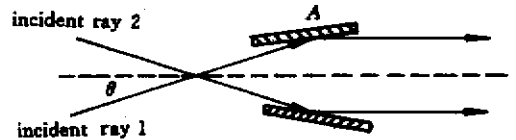


图 3 激光在锥形光纤中的反射

Fig. 3 Reflection of the Laser beam in the inverse taper fiber

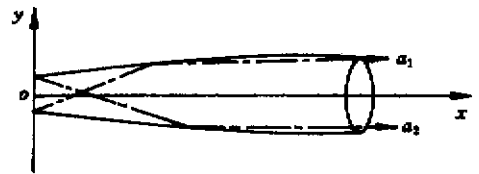


图 4 倒锥形光纤

Fig. 4 Schematic view of a inverse taper fiber

3 实验结果

按照上述结果用内壁带有高反射率的金属制造直的空芯倒锥光纤耦合器， $L = 32.5 \text{ mm}$ ， $\phi_{\max} = 1.6 \text{ mm}$ 和 $\phi_{\min} = 1.3 \text{ mm}$ ，把它耦合在直空芯光纤 ($L = 1.0 \text{ m}$ ， $\phi_{in} = 1.6 \text{ mm}$) 上，经检测它可以比直接用透镜耦合的空芯光纤损耗降低 0.5 dB/m 左右。

使用 50 W CO_2 激光器，激光光束直径 $\phi = 10 \text{ mm}$ ， ZnSe 透镜焦距 $f = 165 \text{ mm}$ 焦点光斑直径为 $\phi = 0.51 \text{ mm}$ 。测试结果如下表和图 5。

	Length of fiber/m	Inputed of fiber face/W	Outputed of fiber face/W	Fiber loss/dB
Without a inverse taper coupler	0.5	34	25.1	0.64
	1.0	34	23.3	1.31
	1.5	34	21.6	1.93
With a inverse taper coupler	0.5	34	32.2	0.24
	1.0	34	30.3	0.51
	1.5	34	28.3	0.80

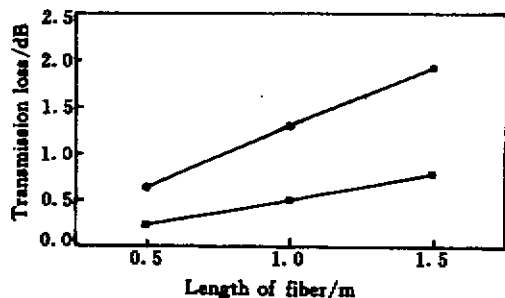


图 5 用倒锥光纤耦合与直接耦合

●: 用光纤直接耦合; ○: 用耦合器耦合

Fig. 5 Measured transmission losses with and without a inverse taper coupler vs length of fiber

●: with taper coupler; ○: with coupler

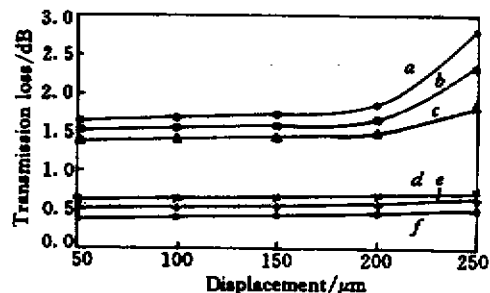


图 6 激光偏离光轴与光纤损耗值

$a(L = 1.5 \text{ m})$, $b(L = 1.0 \text{ m})$, $c(L = 0.5 \text{ m})$ 为用光纤直接耦合;
 $d(L = 1.5 \text{ m})$, $e(L = 1.0 \text{ m})$, $f(L = 0.5 \text{ m})$ 为用倒锥光纤耦合

Fig. 6 Transmission losses of the fibers as a function of axial displacement

$a(L = 1.5 \text{ m})$, $b(L = 1.0 \text{ m})$, $c(L = 0.5 \text{ m})$ with taper coupler;
 $d(L = 1.5 \text{ m})$, $e(L = 1.0 \text{ m})$, $f(L = 0.5 \text{ m})$ with inverse taper coupler

由此可以看出,当用锥形光纤作为耦合器,把激光能量耦合进空芯光纤进行传输,损耗由 1.31 dB/m 降到 0.51 dB/m,从而使空芯传能光纤的损耗降低了 0.80 dB/m。

其次,还进行了光束移位测量,得到了光束偏离光轴后,光纤耦合器损耗的变化。结果如图 6 所示,倒锥(反用光锥)光纤耦合器对光束偏离光轴引起的损耗也有很强的补偿作用,这样就可以降低机械加工和安装的误差要求。

4 结 论

用透镜聚焦激光能量,激光光束变成圆锥形,而这种圆锥形光束在空芯光纤里传输时,将会产生一些附加损耗,降低了光纤的传输性能。由透镜聚焦后再通过锥形光纤进行耦合,使锥形光束变成平行的圆柱形光束,然后再在空芯光纤中传输,这样可以减少激光光束在空芯光纤内的反射次数,并且还可以使激光在光纤内满足全反射条件,因此可明显地降低空芯光纤的损耗。这种锥形光纤耦合器特别适合于传输大功率激光能量使用。

参 考 文 献

- 1 Yuji Matsuura, Hajime Hiraga, You Wang. Lensed-taper launching coupler for small infrared hollow fibers. *Appl. Opt.*, 1997, 36(30):7818~7821
- 2 Hajime Hiraga *et al.*. Lensed taper coupler for hollow waveguides. *SPIE*, 1997, 2977:47