

文章编号:1001-5078(2007)09-0882-03

锥形光纤的结构与特性

薛春荣^{1,2}, 侯海虹¹

(1. 常熟理工学院, 江苏 常熟 215500; 2. 中科院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要:通过理论分析和仿真试验,研究了锥形光纤的几何形状对锥形光纤的传输损耗和耦合效率的影响。用几何光学的分析方法,说明了光信号在锥形光纤中的传输损耗远低于同类型的圆柱形光纤;仿真试验研究了光源与光纤的相对位置、锥形光纤的尖端半径、锥形光纤的锥角大小对锥形光纤耦合效率的影响。

关键词:锥形光纤;传输损耗;耦合效率

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Structure and Characteristics of Tapered Fiber

XUE Chun-rong^{1,2}, HOU Hai-hong¹

(1. Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China;

2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Both transmission loss and coupling efficiency of tapered fibers are discussed in this paper. With the geometrical optics method, the fact is explained that transmission loss of tapered fiber is lower than that of cylindrical fiber. Simulation study finds that both tip radius of tapered fiber and cone angle of it have an effect on efficiency of tapered fibers. The effect of relative position between light source and tapered fiber on coupling efficiency of tapered fibers is also studied.

Key words: tapered fiber; transmission loss; coupling efficiency

1 引言

随着光纤技术的飞速发展,光纤在信息社会的诸多领域起着越来越重要的作用。锥形光纤因其独特的结构和性能优势,在许多领域得到了越来越广泛的应用。因此,研究锥形光纤的结构与特性,对锥形光纤的应用至关重要。本文的主要工作就是研究锥形光纤的几何形状对其性能的影响,明确不同形状的锥形光纤所具有的性能差异,为优化锥形光纤的几何形状、更有效地加工出符合性能要求的锥形光纤提供参考,从而更有效地促进锥形光纤的合理应用。

2 锥形光纤的结构

常见的锥形光纤的加工方法有化学腐蚀法、研磨法和熔拉法,其中熔拉法是最为广泛采用的方法^[1-2]。本文所指的锥形光纤就是用熔拉法制作

的。熔拉法制作的光纤锥的特点是光纤的包层和纤芯的直径沿光纤轴向均逐渐变细,一般可认为在整个锥区,包层和纤芯的直径之比保持恒定,锥形光纤的视频显微镜图像如图1所示,其相应的几何结构剖面图如图2所示。其中 l 是光锥长度, α 是光锥锥度, a 是光纤锥的粗端半径, b 是尖端半径。通过简单计算可得锥形光纤几何参数之间的关系:

$$\alpha = \arctan \frac{a-b}{l} \quad (1)$$

可见其他参数已经设定的情况下,尖端直径越大, α 越大;光纤的锥形过渡区越短,即 l 值越小相对的锥角 α 就越大,锥形变化也就越尖锐。

作者简介:薛春荣(1972-),女,常熟理工学院教师,中科院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光学、光电子及光学薄膜方面的研究。E-mail: xcr163@163.com

收稿日期:2007-03-21

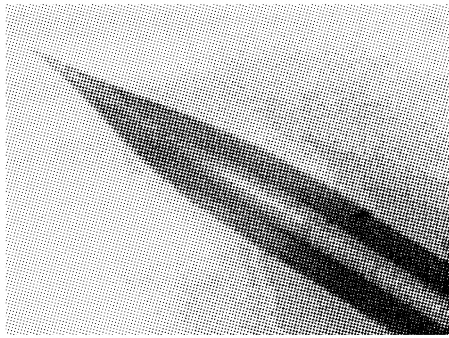


图1 锥形光纤的视频显微镜图像
Fig.1 video microscope image of tapered fiber

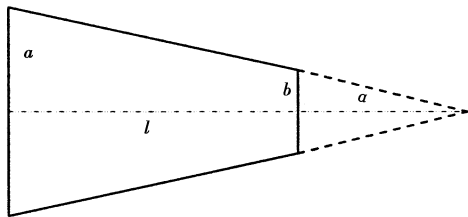


图2 锥形光纤的几何剖面图
Fig.2 geometric profile of tapered fiber

3 锥形光纤的特性

锥形光纤因其特有的结构,在进行光的传输以及 LD 等光源或其他器件耦合时也表现出许多与圆柱形光纤不同的特性,如低的传输损耗和高的耦合效率。

3.1 锥形光纤的传输损耗

根据光在光纤中的传输和损耗理论,光在圆柱形光纤中传输时,沿轴向单位长度的反射次数 n 和每次反射所引起的传输损耗 k 分别为^[3]:

$$n = \frac{1}{|AB|} = \frac{1}{d \tan \theta} \tag{2}$$

$$k = -10 \lg \rho \tag{3}$$

其中, d 为光纤内径; θ 为激光光束与光纤轴线的夹角; ρ 为光纤内反射膜的反射率。可见,单位长度上的反射次数越多,激光能量的损耗就越多。图 3 是激光光束在圆柱形光纤中传播时的示意图。

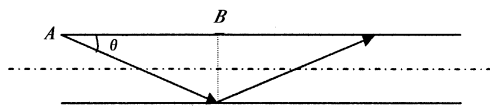


图3 光在圆柱形光纤中的传播
Fig.3 lights transmitting in a cylindrical fiber
光在锥形光纤中传播时的示意图如图 4 所示。

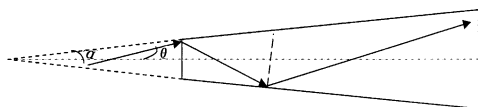


图4 光在光纤锥中的传播示意图
Fig.4 lights transmitting in a tapered fiber

假定锥形光纤的锥度夹角为 2α ,激光光束的入射角为 θ ,激光在第一和第二次反射之间沿轴向所传输的距离为 x_1 ,第二和第三次之间反射所传输的距离为 x_2 ,依次为 x_3, \dots, x_n 。通过几何计算可得到: $x_1 < x_2 < x_3 < \dots < x_n$,激光在单位长度的锥形光纤中的反射次数^[3]为:

$$n < \frac{1}{x_1} = \frac{\tan(\theta - 2\alpha) - \tan \alpha}{d} \tag{4}$$

把式(4)与式(2)相比较可以看出,激光在锥形光纤中的反射次数少于在圆柱光纤中的反射次数,并且,由于反射角的增大,在相同的传播距离内,激光走过的路程减少了。这样一来,激光在锥形光纤中的损耗要小于在圆柱光纤中的损耗。另外,激光在圆柱光纤中反射时每次反射的入射角不变,而在锥形光纤中第 n 次反射时的入射角为:

$$\theta_n = \frac{\pi}{2} - [\theta - (2n - 1)\alpha] \tag{5}$$

入射角随反射次数的增加而增大,反射率也逐渐增大^[3]。

从以上看出,锥形光纤在传输激光能量时,既可以减少激光光束在光纤中的反射次数,还使激光在传输过程中入射角逐渐增大,从而缩短了光束传播的路径,也增大了反射率,使得该光纤的传输损耗进一步降低,远小于同类型的圆柱形光纤。

3.2 锥形光纤的耦合效率

按照模式耦合理论,LD 到光纤的耦合实质是两者之间的模场匹配。如果用平端面的光纤进行直接耦合,因为模场失配,其耦合效率很低,约为 10%,而用锥形光纤进行耦合,则可以大大提高耦合效率^[4]。本文用光学设计仿真软件对锥形光纤进行了研究,力求找到锥形光纤的几何形状与耦合效率间的关系,以便优化锥形光纤的形状,提高耦合效率。

对锥形光纤仿真研究的原理是光线追迹,通过追踪射入与射出锥形光纤的不同光线的传播路径计算锥形光纤的耦合效率。仿真用的光源为方向性强、稳定性好的波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 的 He - Ne 激光器,光纤参数为 $50/125\mu\text{m}$,锥形光纤的几何结构如图 2 所示,各几何参数间的关系由式(1)决定。

首先,看光源与光纤的相对位置对耦合效率的

影响。所用锥形光纤的锥形长度为 $200\mu\text{m}$, 尖端纤芯半径为 $1\mu\text{m}$, 包层半径为 $2.5\mu\text{m}$, 仿真结果如表 1 所示, 相应的关系图见图 5, 光源距光纤距离用 h 表示, 耦合效率用 η 表示。

表 1 光源和锥形光纤相对位置对耦合效率的影响

Tab. 1 the effect of relative position between light source and tapered fiber on coupling efficiency of tapered fibers

$h/\mu\text{m}$	1.56	6.25	9.4	12.5	25	50	100	570	600
$\eta/\%$	5.97	6	6.04	86.4	86.4	86.4	86.4	65.43	8.06

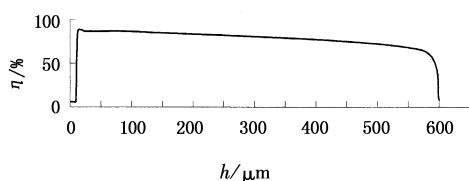


图 5 耦合效率与光源和锥形光纤相对位置的关系

Fig. 5 the effect of relative position between light source and tapered fiber on coupling efficiency of tapered fibers

可见, 只要光源与锥形光纤相距适当的距离, 光纤耦合效率就可以达到一个比较理想的水平, h 过大或过小都使得耦合效率降低, 因为距离太小会因为光纤端面的反射而产生干涉现象。

其次, 看锥形光纤的几何结构对耦合效率的影响, 试验中光源距离锥形光纤光敏面 $100\mu\text{m}$ 。表 2 为锥形光纤的尖端半径对耦合效率的影响, 图 6 为其相应的曲线, 所用锥形光纤的锥形区长度为 $200\mu\text{m}$; 表 3 为锥形光纤的锥角大小对耦合效率的影响, 图 7 为其相应的曲线, 所用锥形光纤的锥形区长度为 $200\mu\text{m}$, 所用锥形光纤的尖端纤芯半径为 $1\mu\text{m}$, 包层半径为 $2.5\mu\text{m}$, 锥度大小用 α 表示。

表 2 锥形光纤的尖端半径对耦合效率的影响

Tab. 2 the effect of tip radius of tapered fiber on coupling efficiency of tapered fiber

$h/\mu\text{m}$	62.5	41.67	31.25	27.5	25	18.52	15.63	7.81	3.91	1.95	0.25	0.1	0.05
$\eta/\%$	1.99	1.99	1.99	1.99	84.4	84.4	84.4	84.4	84.4	84.4	84.4	84.4	4.31

表 3 锥形光纤的锥角对耦合效率的影响

Tab. 3 the effect of cone angle of tapered fiber on coupling efficiency of it

$\alpha/(\circ)$	5.5	5.61	5.63	5.65	5.68	5.7	5.72	5.74	5.75	5.76	5.77	5.79	11	42
$\eta/\%$	10.68	17.38	22.49	29.16	37.55	46.89	59.82	65.92	72.1	80.37	86.4	86.4	86.4	86.4

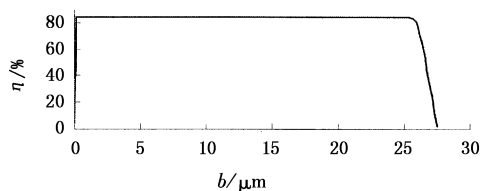


图 6 锥形光纤的尖端半径对耦合效率的影响

Fig. 6 the effect of tip radius of tapered fiber on coupling efficiency of tapered fiber

可以看出锥形光纤的尖端半径过小或过大都会使得光纤耦合效率过小, 只有当尖端半径在一个合适的大小范围内, 才有高的耦合效率。如在本试验中, 尖端半径 $0.1\mu\text{m} < b < 25\mu\text{m}$ 时耦合效率较高。

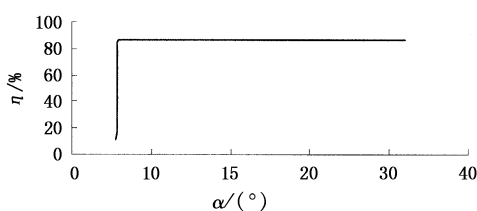


图 7 锥角对耦合效率的影响

Fig. 7 the effect of cone angle of tapered fiber on coupling efficiency of it

可见, 锥形光纤的锥度越大, 即在尖端半径与芯径确定的情况下, 锥形变化越快, 光纤的耦合效率就越大。

4 结论

本文通过理论分析和仿真试验研究了锥形光纤的几何形状对锥形光纤的传输损耗以及耦合效率的影响, 这对于优化锥形光纤的几何形状、更好地利用锥形光纤的传输和耦合特性有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 黄祝明, 张国平. 光纤锥探针传输特性的研究[J]. 物理与工程, 2000, 2(12): 45-47.
- [2] 陈晓刚, 等. 扫描近场光学显微镜光纤锥中导波反射特性[J]. 光学学报, 1999, 19(6): 659-664.
- [3] 侯峙云, 周桂耀, 侯蓝田. 低损耗倒锥光纤的研究[J]. 红外技术, 2001, 1(23): 23-27.
- [4] 宋军, 安伟, 许立新, 等. 光纤锥模场传输特性及光纤微透镜最佳位置研究[J]. 量子电子学报, 2000, 6(17): 534-537.