

锥形光纤间的耦合特性*

薛春荣 祝生祥 肖志刚

(同济大学 Pohl 固体物理研究所, 上海 200092)

摘要 将通信光纤的末端拉制成锥形, 利用光信号在光纤锥形区特有的传输和耦合特性, 实现了光纤的耦合、连接和分束. 用耦合模理论分析了锥形光纤间的传输和耦合性质, 给出了光信号两锥形光纤间的耦合与两锥形光纤的距离和锥形区重叠长度等实验结果.

关键词 锥形光纤; 光纤传输; 光纤耦合; 光纤分束

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

为了传输和实际应用的需要, 有时要把光纤拉制成锥形, 熔融拉锥型光纤耦合器件是光纤通信系统中重要的基本器件之一, 可以用作各种比例的功率分路器 (splitter)/合路器 (combiner)、波分复用器 (WDM)、光纤全反镜等多种光学测量仪器的关键部件^[1,2]. 因此, 研究锥形光纤间的耦合作用, 对锥形光纤的应用至关重要. 本文主要分析锥形光纤自身的各种参数和两锥形光纤间的相对位置等对光纤间能量耦合的影响, 从而促进锥形光纤在光纤通信中的更好应用.

1 锥形光纤的制作

光纤锥的制作主要有两种方法: 熔拉法和腐蚀法. 用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, 见图 1(a). 腐蚀法得到的探针, 其中包层直径沿 z 向逐渐减小, 而纤芯直径基本不变, 只在接近锥的尖端时, 芯径才逐渐变小, 见图 1(b).

实验中用的锥形光纤是利用普通单模石英光纤, 通过自制的热拉伸装置, 用熔拉法拉制而成. 熔

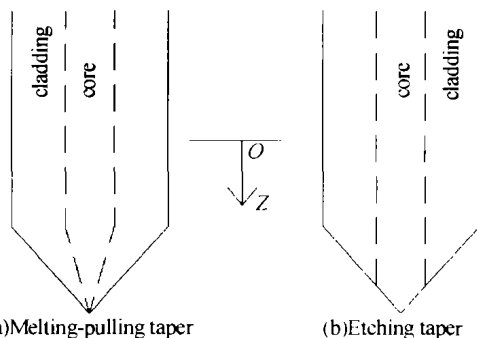


图 1 由于制作方法不同而得到的两种光纤锥
Fig. 1 Two optical taper got from two different method

拉法是利用 CO₂ 激光器使光纤熔融, 在两端施以拉力, 先用较小的力使其成锥, 再用较大的力将其迅速拉断, 断面自然形成光滑平面. 这种制作光纤锥的方法容易控制, 可重复性好, 成锥后表面光滑, 是一种比较理想的制作方法.

2 光信号在锥形区域的传输特性

理想阶跃型单模光纤的基模场为贝塞耳函数, 实际应用中常近似表示为高斯型分布^[3], 即电场振幅 E 可近似表示为

$$E = \exp\left(-\frac{r^2}{2w_0^2}\right) \exp(i\beta z) \quad (1)$$

式中 r 为径向坐标, 基模场的模半径 w_0 由马休斯 (Marcuse) 判据可计算为^[3]

$$(w_0/a) = 0.65 + 1.609V^{-3/2} + 2.879V^{-6} \quad (2)$$

式中光纤参数 v 为

$$V = (2\pi a/\lambda) * (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

a 为纤芯半径, λ 为真空中的光波长, n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率.

在熔拉锥中, 纤芯和包层的半径按其初始的比例同时逐渐减小, 在锥形区域, 沿光纤锥传输的纤芯导模首先有轻度的收缩, 然后模场急剧向包层中扩展而成为包层导模; 扩展成为包层模后, 随着包层中光信号辐射到外空间, 模场半径将急剧下降, 如图 2 所示^[4].

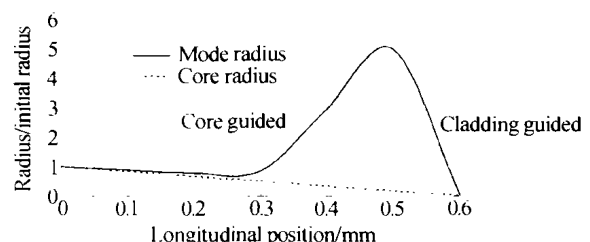


图 2 在 600 μm 长的光纤锥中的模传输
Fig. 2 Mode transformation in a 600 μm tapered fiber

在光纤锥中, 模场半径的变化可以由式 (2) 表示, 并且与光纤锥的锥角 θ 有关, $\tan \theta = dr/dz$, r 是光纤半径. 当模场扩展成为包层模后, 式 (3) 中的 n_1 是包层折射率, n_2 取 1 (空气折射率). 由于边界条件变

* 国家自然科学基金资助项目 (项目批准号 69877014)
Tel: 021-65980949 Email: xcr3721@sohu.com
收稿日期: 2003-06-30

为包层/空气边界,即相对折射率差 Δ 增大,导致包层模中不仅包含基模,而且还含有其他的高阶模式. 为简化计算,只考虑从纤芯到包层基模的耦合,因为随着包层直径的减小,最终这些高阶模式会截止,即辐射到外空间,从而引起传输光较大的损耗. 从光纤传输的观点看,损耗增大是有害的,但可以通过耦合作用把这部分泄露光引入到其它光纤中去.

3 锥形光纤间的耦合特性

锥形光纤间的耦合特性是指信号光纤中的光能量耦合到耦合光纤中的比例,由于两锥形光纤都是单模阶跃弱导光纤,在光学尺度上相隔充分远,符合局域模式耦合的条件^[4],可以用局域模式耦合理论进行分析.

图3 是一对单模锥形光纤间的耦合,两锥形尖端沿轴向的重叠距离用 L 表示,它与两锥体的几何形状有很大关系,且小于或等于锥体的长度. 两光纤的垂直距离,即两平行芯径间的距离用 u 表示,如图3.

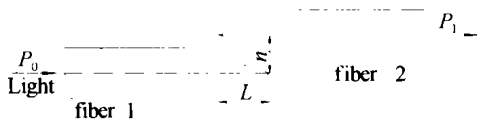


图3 锥形光纤连接器的耦合示意图
Fig.3 The diagrammatic sketch of the connector coupling

假设信号光由左端的 fiber 1 输入,能量为 P_0 , 则根据耦合器中两锥形光纤间的耦合特性,可得到从右端的 fiber 2 输出的光能量应为^[5]:

$$P_1 = P_0 \sin(kz) \tag{4}$$

式(4)表明两锥形光纤间耦合功率的大小是由耦合系数 k 和耦合区域长度 z 决定的. 其中 z 近似等于图6 中的重叠长度 L , k 则取决于光纤芯径 a 、两平行光纤间的距离 u 、和光纤的相对折射指数差 Δ . 可用经验公式^[5]表示为

$$k = (\pi/2) (\sqrt{2\Delta}/a) \exp[-(A + Bw + Cw^2)] \tag{5}$$

式中, $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$, $w = \frac{u}{a}$

$$A = 5.279 - 3.663v + 0.384v^2$$

$$B = -0.777 + 1.225v - 0.015v^2$$

$$C = -0.018 - 0.006v - 0.009v^2$$

特别指出的是,两平行光纤芯径间的距离 u 对耦合系数 k 有很大影响,当光纤间距增大时, k 按指数规律趋于0; a 是光纤的芯半径,在锥形光纤中它沿 z 向缓慢变小. 对一给定锥形角度,局部模的描述对光纤的间隔非常敏感.

至此可以看出,两锥形光纤间的耦合效率,与两锥形平行光纤芯径间的距离、两锥形光纤的耦合长度和锥角的大小都有很大关系.

测量两锥形光纤间耦合特性的装置如图4. 图中光源采用单色性和稳定性较好的氦氖激光器,经过显微物镜聚焦,激光照在耦合器上进入光纤,光纤长约40 m,光信号在传输过程中建立了稳态模式分布,输出功率较为稳定. 装置图中的正方形虚线框是一个暗盒,硅光电二极管和耦合光纤末端形端放在其中. 图中矩形虚线框部分是一部特制的可读数显微镜,该显微镜有两个可移动载物台,左右各一个. 在显微镜的视野中是两锥形光纤的接头处,类似于图3. 通过该显微镜的可移动载物台可调整两锥形光纤的相对位置. 通过该显微镜的测微目镜可读出其相对位置的具体数据.

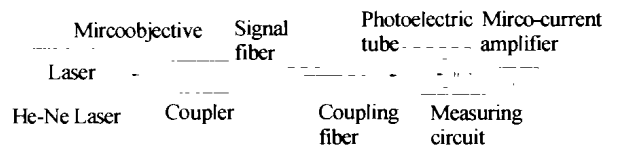


图4 传输效率测量装置图
Fig.4 The measuring setting drawing of transmission efficiency

实验是在暗室中进行的,具体实验步骤如下:

1) 实验前先打开氦氖激光器预热几分钟,使输出功率稳定. 微电流放大器预热半小时左右,并在校准和调零的基础上,调到合适的量程.

2) 把两光纤按图中所示位置放好,信号光纤的平面端与耦合器相连,耦合光纤的平面端粘在正方形暗盒中,光纤端面距硅光电二极管光敏面约1 mm. 两光纤的锥形端分别放在可读数显微镜左右的可移动平台上.

3) 打开氦氖激光器,调节两锥形端的相对位置,从耦合光纤末端出射的光照在硅光电二极管上,电路中产生光电流.

4) 固定重叠长度 l , 测出从耦合光纤末端出射的电流随垂直距离的变化. 测量数据如图5.

5) 固定垂直距离 d , 同样测出出射电流随重叠长度的变化. 测量数据如图6.

6) 将光纤锥形端平放在读数显微镜下,把圆锥体的投影看作等腰三角形,读取直角边(即锥长)和底边的长度,用正切公式分别算出两圆锥的锥角.

图5 和图6 对应的信号光纤的锥角为 28.73° , 锥长0.244mm, 发光区长0.1026mm; 耦合光纤的

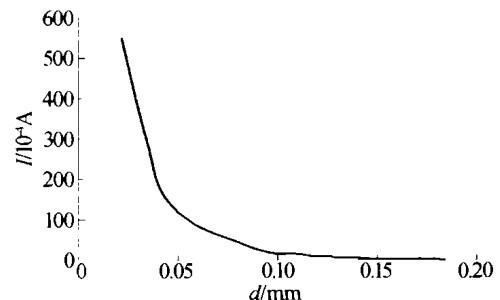


图5 电流随垂直距离的变化关系
Fig.5 The current versus vertical distance

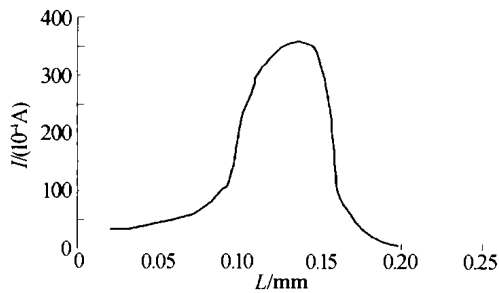


图6 当两光纤间距离不变时,电流随重叠长度的变化

Fig. 6 The current versus overlap length (d is a constant)

锥角为 22.72° , 锥长为 0.311 mm. 测定图 5 数据时, 固定两光纤的重叠长度为 0.1394 mm. 测定图 6 数据时, 固定两光纤的垂直距离为 0.03 mm.

如果让两光纤间的垂直距离和重叠长度同时变化, 而保持两锥形光纤互相靠近的两侧面间距离不变, 如让图 3 中光纤 1 的锥形上表面和光纤 2 的锥形下表面互相紧贴, 可作出图 7 所示的关系曲线.

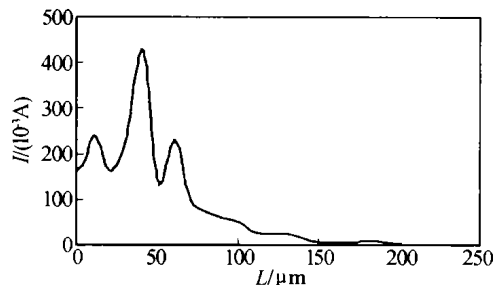


图7 两锥形光纤相对两侧面紧贴时, 电流随重叠长度的变化

Fig. 7 The current versus overlap length (two tapered side is close)

图 7 对应的信号光纤锥长 $422 \mu\text{m}$, 其中发光区长 $99 \mu\text{m}$; 耦合光纤锥长 $390 \mu\text{m}$, 所用的激光器功率也大于前两个表格中数据所对应的激光器功率.

从以上图表可以看出, 两光纤间的距离和两锥

形端的重叠长度对两光纤间的耦合效率有很大关系. 通过调节两锥端的重叠长度和距离可以使两光纤的耦合效果获得最好.

4 结论

利用锥形光纤特有的传输性质, 对锥形光纤间的耦合特性从理论和实验上进行了分析和探索, 实验发现, 在信号光纤锥尖的周围有一明亮的光圈, 处于其附近的一根或多根其他光纤的锥形部位就能接收到它发出的光信号, 从而实现锥形光纤间的耦合.

参考文献

- 1 刘宏利, 王肇圻, 杨新军, 等. 平端光纤与锥端球透射光纤的耦合. 光子学报, 2003, 32(2): 218 ~ 221
Liu H L, Wang Z X, Yang X J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(2): 218 ~ 221
- 2 游善红, 郝素君, 殷宗敏, 等. 单模光纤中弯曲损耗的测试与分析. 光子学报, 2003, 32(4): 409 ~ 411
You S H, Hao S J, Yin Z M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 409 ~ 411
- 3 Mynbaw D K, Scheiner L L. 光纤通信技术. 北京: 科学出版社, 2002, 3: 597 ~ 600 (英文影印版)
Mynbaw D K, Scheiner L L. *Fiber-Optic Communications Technology*. Beijing: Science Press, 2002, 3: 597 ~ 600 (English reprint)
- 4 [澳] 斯奈德 A W, 洛夫著 J D, 周幼威, 等译. 光波导理论. 北京: 人民邮电出版社, 1991, 6: 377 ~ 705
Snyder A W, Love J D (write), Zhou Y W. et al. (translate). *Optical Waveguide Theory*. Beijing: The People's Post and Telecommunications Press, 1991, 6: 377 ~ 705
- 5 Barnard C W, Lit W. Mode transforming properties of tapered single-mode fiber microlenses. *Applied Optics*, 1993, 32(12): 2091 ~ 2093

Coupling Properties Between Two Tapered Fiber

Xue Chunrong, Zhu Shengxiang, Xiao Zhigang

Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092

Received date: 2003-06-30

Abstract Through melting and pulling the end of a fiber into a tapered area, optical fiber transmission and fiber coupling, as well as fiber beam splitting can be realized for the special transmission and coupling characteristic in the tapered area. Optical fiber transmission and fiber coupling between two tapered fibers are analyzed. Also the coupling efficiencies of two tapered fibers versus the vertical distance and the overlap length of two tapered regions of them are analyzed.

Keywords Tapered fiber; Optical fiber transmission; Fiber coupling; Fiber beam splitting



Xue Chunrong was born in 1972 in Shandong Province. She received her B. S. degree from Dept of Physics, Huaibei Coal Industry Teachers College, in 1996. From 1996 to 2001, she had been working in teaching in Fujian. Now she is a M. D. student of Dept. of Physics, Tongji University and her interests of research are optical fiber communication.