

# 扫描近场光学显微镜中两类光纤探针 传输特性的研究\*

张国平\*\* 明海 陈晓刚 吴云霞 谢建平  
(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

**摘 要** 采用局域模式耦合理论, 对扫描近场光学显微镜(SNOM)中的两类光纤探针——腐蚀锥和熔拉锥的传输特性进行了比较和分析。给出了光在探针锥中传输时耦合效率的分布情况, 以及传输效率随锥长、针尖直径和光波长变化的特性。

**关键词** 扫描近场光学显微镜, 光纤探针, 传输效率。

## 1 引 言

扫描近场光学显微镜是近几年发展起来的一种新型超高分辨率显微成像技术, 是扫描探针技术和光学显微技术相结合的产物。扫描近场光学显微镜的分辨率远远超出了瑞利衍射极限(约  $\lambda/2$ ), 目前扫描近场光学显微镜的横向截止分辨已达到  $12 \text{ nm}^{[1,2]}$ 。

扫描近场光学显微镜系统中的关键元件是光纤探针。由于制备方法不同, 光纤探针可分为两类——腐蚀锥和熔拉锥, 它们在波导结构上存在着差异, 因而其传输特性也将有所不同, 这一点在目前关于扫描近场光学显微镜探针的大量研究中被忽视了。本文采用局域模式耦合理论, 对这两种探针锥的传输特性进行了分析和比较。

## 2 光纤探针

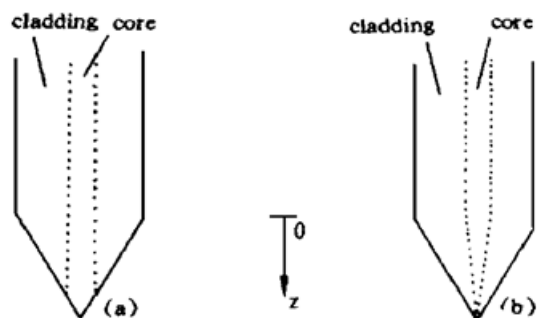


Fig. 1 Two kinds of fiber probes  
(a) Etched taper; (b) Pulled taper

目前扫描近场光学显微镜探针一般采用单模光纤制备而成, 制备方法可分为化学腐蚀法和熔拉法两种<sup>[3]</sup>。将单模光纤的一端经化学腐蚀或加热熔拉而成光纤锥, 并使锥的尖端直径小于光波长(一般在几百至几十纳米), 即成为光纤探针。探针的针尖大小决定着扫描近场光学显微镜系统的分辨率, 探针锥的几何形状对系统的传输效率影响很大。

图 1 给出了分别由腐蚀法和熔拉法得到的光纤探

\* 国家自然科学基金资助项目。

\*\* 现在地址: 华中师范大学物理系, 武汉 430079

收稿日期: 1997-05-26

针示意图。图 1(a) 为腐蚀法得到的探针, 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, 由于包层已被全部腐蚀掉而使纤芯遭到腐蚀, 芯径才逐渐变小, 称这种光纤探针锥为腐蚀锥。图 1(b) 为熔拉法得到的探针, 这时包层和纤芯的直径沿纤轴方向均逐渐变细, 一般可认为在整个锥区, 包层和纤芯的直径之比保持恒定, 称这种光纤探针锥为熔拉锥。两种探针在目前的扫描近场光学显微镜中均用得较多。由此可见, 腐蚀锥探针和熔拉锥探针在波导结构上是不一样的, 光在其中传播时, 便会呈现出不同的传输特性。

### 3 探针锥的传输特性分析

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

$$E = (A/w_0) \exp(-r^2/w_0^2) \quad (1)$$

式中  $A$  为归一化振幅,  $r$  为径向坐标, 基模场的模半径  $w_0$  由马修斯(Marcuse)判据可计算为<sup>[4]</sup>

$$(w_0/a) = 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6} \quad (2)$$

式中光纤波导归一化频率  $V = (2\pi a/\lambda) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ ,  $a$  为纤芯直径,  $\lambda$  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。

根据局域模式理论, 可将光纤锥按其拍长近似为一系列圆柱段光纤, 每一段中的模式场可用具有相同折射率分布的无限长光纤的模式场来近似<sup>[5]</sup>。设两相邻圆柱段光纤的模场分布分别为  $E_1$  和  $E_2$ , 模半径分别为  $w_1$  和  $w_2$ , 则模场  $E_1$  和  $E_2$  之间的耦合效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \iint E_1 E_2^* ds \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式, 在归一化条件下, 可得到计算耦合效率  $\eta$  的一个简单表示式为

$$\eta = 2w_1 w_2 / (w_1^2 + w_2^2) \quad (4)$$

在腐蚀锥中, 包层直径沿  $z$  向逐渐减小, 不过除了锥尖附近以外, 可认为光纤锥中的模式在传输过程中不受影响, 因为此时包层的直径仍远大于芯径。当锥中的包层直径沿  $z$  向减小到小于芯径的两倍以后, 由于包层中的倏逝场会延伸至包层/空气边界上, 使得光纤锥中传输的模式受到影响。这时波导的边界条件由原来的纤芯/包层边界变成了纤芯/包层/空气边界, 此边界条件下的严格模式求解是很困难的。在弱导条件下, 即纤芯和包层的折射率相差很小时, 可近似将上述边界条件处理成(纤芯+包层)/空气边界, 也就是将纤芯和包层作为一个整体<sup>[6]</sup>。这样, 在(2)式中计算模场半径时,  $a$  取包层的半径值,  $n_1$  仍为纤芯折射率,  $n_2$  则取为空气的折射率。当更接近针尖时, 包层已被完全腐蚀掉, 使纤芯遭到腐蚀而成纤芯锥, 这时波导边界条件变为纤芯/空气边界, 用(2)式计算模场半径时,  $a$  为腐蚀后的纤芯半径,  $n_1$  和  $n_2$  分别为纤芯和空气的折射率。

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, 此时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; 扩展成包层模后, 模场半径沿锥的方向又逐渐减小<sup>[6]</sup>。由于包层导模的边界条件变为包层/空气边界, 即相对折射率差  $\Delta$  增大, 导致包层导模中不仅包含基模, 还含有其它高阶模式。为简化计算, 只考虑从纤芯模到包层基模的耦合, 因为随着包层直径的减小, 最终这些高阶模式会截止。

下面的分析中，采用的光纤参数为：纤芯折射率  $n_1 = 1.4544$ ，包层折射率  $n_2 = 1.45$ ，空气折射率  $n_3 = 1.0$ ，纤芯直径  $2a = 8 \mu\text{m}$ ，包层直径  $2b = 125 \mu\text{m}$ ，光波长  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 。并假定光纤锥直径是线性递减的。

图 2 为两种探针锥中光沿  $z$  向传输时的耦合效率分布情况(坐标原点在锥的根部，如图 1 所示)，其中针尖直径  $d = 0.2 \mu\text{m}$ ，锥长  $L = 500 \mu\text{m}$ ，曲线(a)和(b)分别对应腐蚀锥和熔拉锥(以下同)。从图中可看出，对于腐蚀锥，开始时模场传输几乎不受影响，只在接近针尖时，由于包层直径减小到一定程度，使得模场向包层中扩展，模场耦合效率  $\eta$  开始下降；越接近针尖处，耦合效率衰减得越厉害。在熔拉锥中，由于纤芯直径和包层直径一起递减，在模场急剧扩展的区域(如图中  $z = 200 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$  范围)耦合效率急剧下降，然后又经历一段缓慢下降的过程；在锥的开始部分和接近针尖的范围，熔拉锥中光耦合效率的变化情况与腐蚀锥的基本一致。图 3 为探针的传输效率  $T$  随针尖直径  $d$  的变化情况，此时锥长不变( $L = 500 \mu\text{m}$ )。结果表明，当针尖直径较大(如  $d > 0.6 \mu\text{m}$ )时，传输效率  $T$  随  $d$  的减小而下降得较缓慢；当针尖直径小到一定程度以后(如  $d < 0.4 \mu\text{m}$ )，随着  $d$  的进一步减小，传输效率急剧下降，例如  $d = 0.1 \mu\text{m}$  时  $T$  已下降为  $3.60 \times 10^{-6}$ (腐蚀锥)和  $1.98 \times 10^{-6}$ (熔拉锥)。目前扫描近场光学显微镜探针的针尖直径一般为几百至几十纳米，因而探针的传输效率是很低的，从探针出射的光非常弱，这已是众所周知的事实。

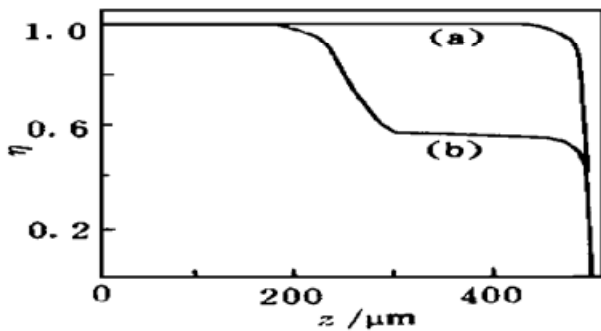


Fig. 2 Coupling efficiency  $\eta$  versus the distance  $z$  in the probe. (a) Etched taper; (b) Pulled taper

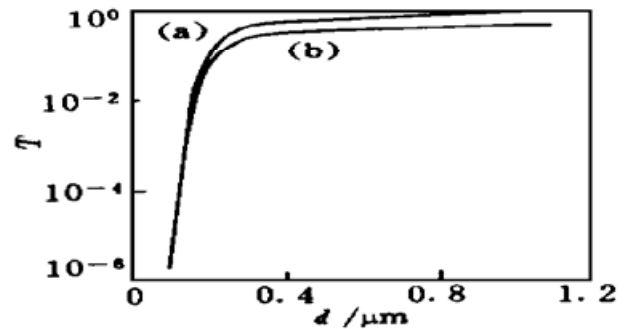


Fig. 3 Transmission efficiency  $T$  versus the tip diameter  $d$ . (a) Etched taper; (b) Pulled taper

图 4 表示两种光纤探针的传输效率  $T$  随锥长  $L$  的变化情况(此时针尖直径  $d = 0.2 \mu\text{m}$ )，图中表明锥的长度对探针的传输效率影响不大。这是因为根据局域模式理论，在针尖直径不变时，锥长的变化对模场沿光纤锥的分布影响很小，只引起计算中的耦合次数有一定的改变，但这种变化对总的模场耦合效率影响不大。精确计算时要考虑包层导模中高阶模的影响，这时传输效率随锥的增长应有所下降。

图 5 给出了探针的传输效率随入射光波长  $\lambda$  的变化关系。从图中可看出，随着波长的增加，两种探针的传输效率均下降。这是因为，在其它条件相同而波长增加时，实质上等效于波长不变而针尖直径  $d$  减小。也就是说，可以将图 3 和图 5 综合起来，横坐标用针尖的相孔直径  $d/\lambda$  表示，探针的传输效率随相对孔径  $d/\lambda$  的减小而降低。

综观图 2~ 图 5 可以发现，在相同条件下(即锥长和针尖的相对孔径均相同)，腐蚀锥具有比熔拉锥较高的传输效率(约高出 1 倍)。这主要是因为熔拉锥中有一段模式从纤芯急剧向包层扩展的区域，使其模式耦合效率急剧下降，而此时腐蚀锥中的模式耦合效率基本不变，这可以从图 2 中清楚地看出。由此造成腐蚀锥的传输效率要比熔拉锥的高一些。

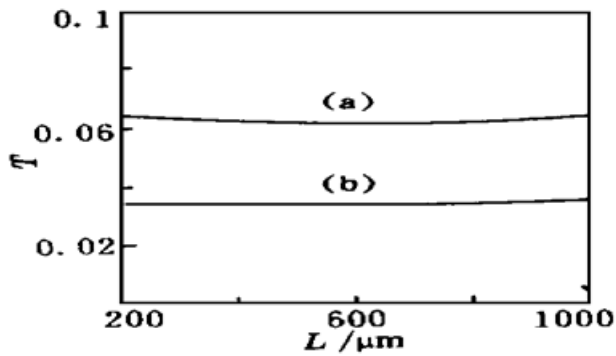


Fig. 4 Transmission efficiency  $T$  versus the taper length  $L$ . (a) Etched taper; (b) Pulled taper

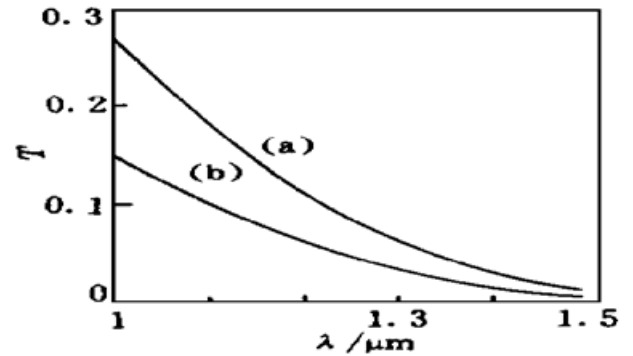


Fig. 5 Transmission efficiency  $T$  versus the incident wavelength  $\lambda$ . (a) Etched taper; (b) Pulled taper

**结束语** 根据局域模式耦合理论, 本文对两种扫描近场光学显微镜光纤探针的传输特性进行了分析和比较, 结果表明腐蚀锥具有比熔拉锥更高的传输效率, 同时给出了传输效率随锥长和针尖相对孔径的变化关系。

由于目前严格地求解光纤探针锥中光场的传输还比较困难, 所以在计算中采取了某些近似处理。这些结果有利于定性地(或者说半定量地)了解两类扫描近场光学显微镜探针中光场的传输特性, 从而有利于对探针的制备进行优化控制, 对于兼顾扫描近场光学显微镜的分辨率和灵敏度、改善图像的信噪比等具有指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] E. Betzig, J. K. Trautman. Near-field optics: microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit. *Science*, 1992, **257**(5067) : 189~ 195
- [2] H. Heinzelmann, D. W. Pohl. Scanning near-field optical microscopy. *Appl. Phys. (A)*, 1994, **59**(1) : 89~ 101
- [3] J. Radojewski, N. Sotnik, H. Pagnia. Tip technology for optical scanning tunneling microscopy and its influence on image quality. *Int. J. Electron.*, 1994, **76**(5) : 973~ 980
- [4] D. Marcuse. Loss analysis of single-mode fiber splices. *Bell Syst. Tech. J.*, 1977, **56**(5) : 703~ 718
- [5] A. W. Snyder, J. Love. 光波导理论(中译本). 北京: 人民邮电出版社, 1991, 第 19 章
- [6] C. W. Barnard, J. W. Y. Lit. Mode transforming properties of tapered single-mode fiber microlenses. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(12) : 2090~ 2094

## Transmission Properties of Two Kinds of Fiber Probes in Scanning Near-Field Optical Microscopy

Zhang Guoping Ming Hai Chen Xiaogang Wu Yunxia Xie Jianping

(Department of Physics, University of Science & Technology of China, Hefei 230026)

(Received 26 May 1997)

**Abstract** By the local mode-coupled theory, transmission properties of two kinds of fiber probes, the etched taper and the pulled taper, which are used for scanning near-field optical microscopy, have been analyzed and compared. The coupling efficiency distribution along the probe taper and the transmission efficiencies versus the taper length, the tip diameter and the wavelength are given.

**Key words** scanning near-field optical microscopy, fiber probe, transmission property.