

PSTM 光纤探针几何形状研究*

陈晓刚 明海 曹可 张国平 谢建平

(中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

提要 系统地分析了各种常见的不同形状探针,综合考虑其纳米区的能量耦合和模式耦合,并给出数值模拟结果。

关键词 光子扫描隧道显微镜,倏逝波,受抑全反射,光纤锥

1 引言

扫描近场光学显微镜(SNOM)通过探测样品表面倏逝场的超高频信息,可以获得超越经典瑞利分辨极限的分辨率。目前SNOM的空间分辨率已达纳米量级^[1,2]。

光子扫描隧道显微镜(PSTM)是SNOM家族中一个比较成熟的分支。在PSTM中,倏逝场由全反射产生,通过光纤探针耦合到探测器中。探针在样品表面扫描以获取表面形貌信息。探测的横向分辨率决定于光纤探针最尖端的直径。为了获得更高的分辨率,我们必须尽量减小探针最尖端的直径。但这样会影响检测到的光强,降低信噪比。鉴于光纤通信技术中,半导体激光器与光纤耦合时改变耦合区光纤锥的形状可以大大提高耦合效率的思想^[3],我们力图通过寻找一种最佳的探针几何形状,提高耦合效率,同时获得较高的分辨率和较高的探测信噪比。这一思想已得到实验上的有力支持。在利用不同形状的探针进行耦合比较的实验中,发现抛物面型光纤探针的耦合效率比截锥型光纤探针高出近一个量级^[4]。本文就此思想给出了理论分析和数值模拟结果。

2 倏逝场和受抑全反射

当光从光密媒质(折射率为 n_1)入射到光疏媒质(折射率为 n_2)时,若发生全反射,则在界面附近光疏媒质一侧,光场的强度随与界面距离的增加而指数衰减^[5]:

$$I \propto \exp\left[-\frac{4\pi n_2 z}{\lambda} \sqrt{n_{12}^2 \sin^2 \theta_1 - 1}\right] \quad (1)$$

其中 λ 是光的波长, θ_1 是入射角, $n_{12} = n_1/n_2$, z 是距界面的高度。

当发生全反射时,若光纤探针(折射率为 $n_3 > n_2$)从光疏媒质一侧接近全反射界面至 $z < \lambda$ 时,倏逝场将耦合到探针中并转化成为行波场。这即是受抑全反射。由于耦合到探针中的行

* 国家自然科学基金资助项目。

波场携带了近场信息,通过对它的检测,我们可以非常精确地了解探针与表面的距离。让探针在样品表面进行二维扫描,我们便可以得到有关样品表面的三维形貌。

发生受抑全反射时,光强透射率由下式给出^[5,6]

$$\Sigma(z) = \frac{\cos(\alpha' - \alpha) - \cos(\alpha' + \alpha)}{\cosh(\gamma z) - \cos(\alpha' + \alpha)} \tag{2}$$

其中

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \left[\frac{-2p_{j1}q_{m2}}{p_{j1}^2 - q_{m2}^2} \right] \\ \alpha' = \arctan \left[\frac{-2p_{j'3}q_{m'2}}{p_{j'3}^2 - q_{m'2}^2} \right] \end{cases} \tag{3}$$

$p_{jm} = n_j \cos \theta_m, q_{j2} = n_j (n_{i2}^2 \sin^2 \theta_1 - 1)^{1/2}$, 而 j, j', m, m' 由下式给出

$$(j, m) = \begin{cases} (1, 2) & s \text{ 偏振} \\ (2, 1) & p \text{ 偏振} \end{cases}$$

$$(j', m') = \begin{cases} (3, 2) & s \text{ 偏振} \\ (2, 3) & p \text{ 偏振} \end{cases}$$

s 代表垂直于入射面的偏振方向, p 代表平行于入射面的偏振方向。

3 光纤探针

探针技术是 PSTM 的关键技术之一。在简化的模型中,我们将光纤锥看成是由三个不同的区域组成的^[4],如图 1 所示。传导区和普通单模光纤一样;纳米区是光纤锥最尖端的部分,主要起集光作用;微米区是一个过渡区域,主要作用是将收集到的光场耦合成光纤的基模。各种光纤探针的主要差异来自微米区的锥角变化和纳米区的几何形状不同。本文将系统地讨论纳米区几何形状不同引起的耦合效率差异。

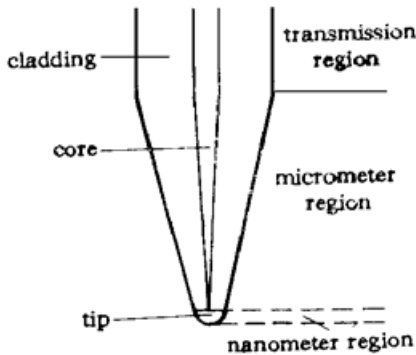


图 1 锥形光纤探针(光纤维)分区示意图
Fig. 1 The sketch of the three-region optical fiber taper

目前,纳米区常见的几何形状有抛物面型、半球型和截锥型等,这些形状上的差异与制作工艺有关。制作光纤锥的常用方法有腐蚀法和熔拉法。腐蚀法是利用 HF 腐蚀液直接腐蚀光纤一端,通过控制腐蚀液的浓度及腐蚀时间来获得所需的光纤锥。在具体制作过程中,我们发现

腐蚀出的光纤锥,锥面不够光滑,常有腐蚀坑和毛刺等,它们将形成分散的散射中心,对探测不利。熔拉法是利用 CO₂ 激光使光纤熔融,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,断面自然形成曲面。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,也是国际上目前最常用的方法。

4 能量耦合

公式(2)是在两种光密媒质的表面完全平行的条件下推导的,为了研究光纤探针的能量耦合效率,我们采用了一种国际上常用的近似方法^[6],假定该式对于光纤锥纳米区逐点成立,即 $I^{(i)}(x, y) = I^{(i)}(x, y) \Sigma[z(x, y)]$,若入射波为单色平面波,总的光强透射率则是 $\Sigma(z)$ 在光纤

锥纳米区上的积分:

$$T = \int \Sigma(z) dA \tag{4}$$

我们以旋转对称的二次曲面作为主要的研究对象。取垂直于样品表面的轴(z 轴) 为旋转对称轴。探针表面与入射面相交的交线为二次曲线, 记其偏心率为 e 。改变 e 的值就相当于改变光纤探针的几何形状。

作为比较的标准, 我们要求曲面与样品表面的最近距离 z_0 为一定值, 并规定纳米区与微米区相接处探针直径 a 也为一定值。在计算中我们采用了如下参数: 扫描高度 $z_0 = 5 \text{ nm}$, 纳米区根部直径 $a = 50 \text{ nm}$, 入射光波长为 632.8 nm , 光纤探针包层折射率为 1.45 , 芯层折射率为 1.4544 , 空气折射率 $n_2 = 1.00$, 样品折射率 $n_1 = 1.45$ 。对于不同的偏心率 e , 我们得到如图 2 所示的透射率变化规律。

由图 2 我们可以看出, 透射率 T 随着偏心率的增大而增大, 并逐渐趋于一个常数。仅从能量耦合(透射) 来看, 应是双曲面型光纤探针最佳。不过各种形状的探针透射率变化不大。这是因为在非常接近样品表面($z_0 \ll \lambda$) 时, 透射场本身衰减很小, 当 $\Delta z \ll \lambda$ 时, 透射率变化不大。随着 z_0 增加, 各种形状光纤探针的透射率之间的差异也有所增加。

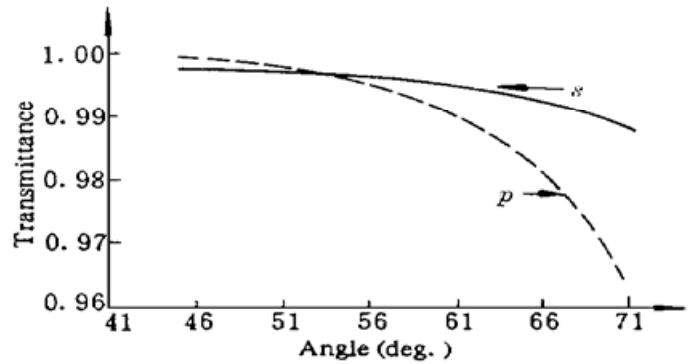
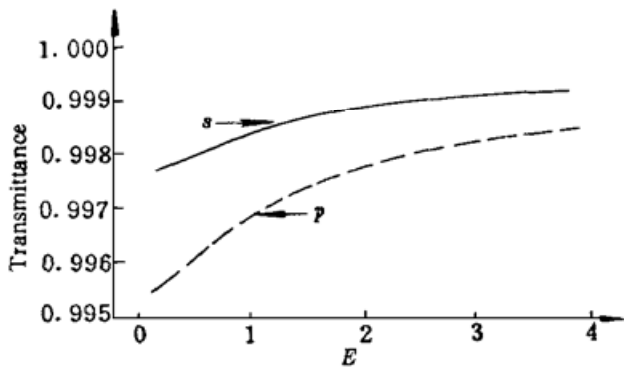


图 2 光纤探针的能量透射率随偏心率 e 的变化曲线。 s 代表垂直于入射面的偏振方向, p 代表平行于入射面的偏振方向。入射角为 60°

图 3 抛物面型光纤探针的透射率随入射角的变化曲线。 s 偏振的光和 p 偏振的光透射率的相对大小随入射角改变而有所不同。偏振方向的定义与图 2 相同

Fig. 2 The transmittance of energy versus the eccentricity of the tip. p and s are the different polarizations of transmission, p is the polarization which is parallel to the incidence plane, s is the polarization which is perpendicular to the incidence plane. The incidence angle is 60°

Fig. 3 The transmittance of the parabolic tip versus incidence angle. The variety of transmittance of the s -polarization light and that of the p -polarization light are different

从图 2 中我们还可以看到, 不同偏振的光, 能量透射率之间也有差异。 p 偏振的光在入射角较小时比 s 偏振的光透射率大, 反之则 s 偏振的光透射率较大。这主要是由于倏逝场中 s 波和 p 波的性质不同造成的。由于后面我们得到抛物面型光纤探针的综合效率最高, 所以在此我们以抛物面型光纤探针的透射率为例, 给出不同偏振的光的透射率随入射角变化的曲线, 见图 3。

5 模式耦合

考虑到具体的探测过程, 仅仅知道能量耦合尚不能完全说明哪种形状的探针最佳。这里还有一个透射光场与光纤锥可传导光场之间的模式耦合问题。

严格地描述光纤锥的场分布是一个极为复杂的问题。我们在此采用局部模近似, 当探针微米区锥角不是太大时, 这个近似是比较合理的。由于我们研究的各种形状探针仅纳米区不同, 而以后的各部分均相同, 所以我们认为模式耦合间的差异产生于微米区与纳米区的衔接处。该处光纤半径很小, 可传导的仅有 HE_{11} 模。利用 Bessel 函数的正交性, 我们用由 Bessel 函数集构成的希尔伯特空间来展开透射场。相应的投影系数就是光场与该模的耦合系数。为了具体求出透射场, 我们首先需要给出探针中光场振幅的透射率。在 $n_1 = n_3$ 的情况下, 可以得到光场的振幅透射率为^[7]

$$\begin{cases} t_s = \frac{1}{\cosh b - i \text{ctg} 2\phi \sinh b} = |t_s| e^{i\Delta_1} \\ t_p = \frac{1}{\cosh b - i \text{ctg} 2\delta \sinh b} = |t_p| e^{i\Delta_2} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $b = 2\pi z_0 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2} / \lambda$, $\phi = \arctg \left[\frac{\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{n_1 \cos \theta_1} \right]$, $\delta = \arctg \left[\frac{n_1 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_1 - n_2^2}}{n_2^2 \cos \theta_1} \right]$ 。

利用(5)式可知, 透射场除强度衰减外还引入一相移。这样, 在纳米区根部, 透射场可以表示成

$$\begin{cases} E_s^{(t)} = E_s^{(i)} |t_s| e^{i(\Delta_1 + \Delta')} \\ E_p^{(t)} = E_p^{(i)} |t_p| e^{i(\Delta_2 + \Delta')} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Delta' = n_3 k_0 d$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是波矢, Δ' 是光在纳米区传输一小段距离 d 时引入的相移。

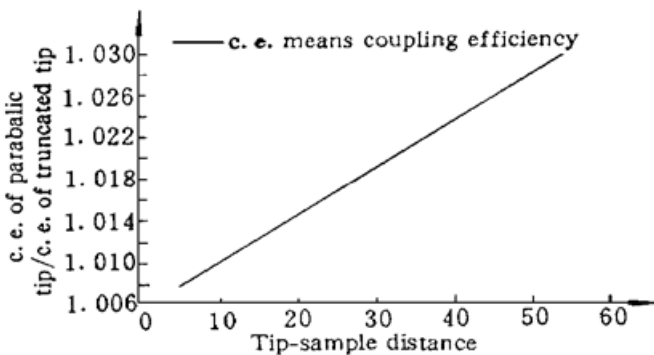


图4 抛物面型光纤探针的模式耦合效率(c. e.)与截锥型光纤探针模式耦合效率之比随样品与针尖距离变化的曲线

Fig. 4 The coupling efficiency of the parabolic tip divided by the coupling efficiency of the truncated tip versus the tip-sample distance

抛物面型探针优势更明显。

目前, 在实验上已发现, 抛物面型光纤探针的探测光强比截锥型探针的高出一个量级^[4], 如何从理论上定量解释这一结果, 尚需进一步研究。

致谢 作者衷心感谢法国 CNRS 微结构及微电子实验室所提供的 SNOM 光纤探针形状研究

将所得的光场变换到极坐标下, 然后将其投影到 HE_{11} 模上。通过数值模拟, 我们发现抛物面型光纤探针的模式耦合效率比截锥型光纤探针的效率要高, 各种探针模式耦合效率之间的差异比能量耦合效率之间的差异要大一到两个量级。这说明模式耦合在 PSTM 中的地位更重要。

当样品与针尖距离变化时, 抛物面型光纤探针的模式耦合效率与截锥型探针的模式耦合效率之比示于图4。

由图4可以看出, 当样品与针尖距离一定时, 抛物面型探针的耦合效率较高(两者的比值大于1)。当样品与针尖的距离增加时, 两者的耦合效率之比也增大。这说明工作距离较长时

的最新实验结果。

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** : 189~ 195
- 2 N. F. van Hulst, F. B. Segerink, B. Bolger. High resolution imaging of dielectric surfaces with an evanescent field optical microscope. *Opt. Commun.*, 1992, **87** : 212~ 218
- 3 H. M. Preby, C. A. Edwards. Near 100% efficient fibre microlenses. *Electro. Lett.*, 1992, **28**(6) : 582 ~ 584
- 4 M. G. Parajo, T. Tate, Y. Chen. Gold coated parabolic tapers for scanning near-field optical microscopy: fabrication and optimisation (to be published)
- 5 M. Born, E. Wolf. 光学原理, 北京: 科学出版社, 1981, 89~ 95
- 6 R. C. Reddick, R. J. Warmack, D. W. Chilcott *et al.*. Photon scanning tunneling microscopy. *Rev. Sci. Instrum.*. 1990, **61**(112) : 3669~ 3677
- 7 L. Saloman, F. de Fornel, J. P. Goudonnet. Sample-tip coupling efficiencies of the photon-scanning tunneling microscope. *J. Opt. Soc. of Am.*. 1991, **8**(12) : 2009~ 2015

Study of the Geometry of the Fiber Tip in PSTM

Chen Xiaogang Ming Hai Cao Ke Zhang Guoping Xie Jianping

(*Department of Physics, USTC, Hefei, 230026*)

Abstract PSTM is an optical microscopy which can produce superior resolution. The lateral resolution is determined by the diameter of the probe tip. But the tip figure also contributes to the resolution. In experiment, it has been found that the coupling efficiency of the parabolic tip is much higher than that of the truncated tip. In order to optimize the tip fabrication, we systematically analyzed several kinds of tip figures by considering their energy coupling and model coupling. The numerical result is given.

Key words photon scanning tunneling microscopy, evanescent wave, frustrated total reflection, tapered-fiber