

扫描近场光学显微镜光纤锥中导波反射特性*

陈晓刚 明 海 张国平 许立新 朱 冰** 白 明 吴云霞 谢建平

(中国科学技术大学物理系, 合肥 230026)

摘 要 利用局部模耦合模型理论上分析了扫描近场光学显微镜光纤锥的光场性质, 给出光纤锥中存在的正、反向传播的基模场微分方程, 以及基模反向耦合系数的数值计算结果, 其最高反射系数达 1% 左右。这种反射光可起着光纤锥激光器谐振腔输出端镜的作用。另外, 抛物型光纤锥探针的反向耦合系数比截锥型的低。并给出光纤锥中光波逆向反射的实验结果。

关键词 扫描近场光学显微镜, 光纤锥, 反射波, 局部模。

1 引 言

扫描近场光学显微镜(SNOM)是 80 年代末发展起来的新型光学显微镜。光纤锥探针是扫描近场光学显微镜系统的关键技术之一。光纤锥的末端直径决定了扫描近场光学显微镜的分辨率, 通过光纤锥的光子流强度直接影响探测的信噪比。无源光纤锥探针主要起传输和收集光场的作用, 但由于一般光纤锥尖端仅为纳米量级, 锥尖对传输模的能量损耗达 10^{-7} , 故无源光纤锥的输出光子流强度很弱。有源光纤探针可以将通过锥尖的光子流强度提高 3~ 4 个数量级^[1], 从而大大提高探测的信号强度和扫描近场光学显微镜系统的灵敏度, 使扫描近场光学显微镜可以用来进行纳米级表面加工和超高密度光信息存储。

研究光纤锥中的反射场是发展有源光纤探针的基础。实验上已实现了利用锥反射特性制成的扫描近场光学显微镜光纤激光探针^[1]。利用光纤锥进行放大的自发辐射探针研究也已取得初步进展^[2]。但目前尚未见到从理论上分析光纤锥的反射导波场的报道。研究这一理论问题对进一步研制新型有源光纤锥激光器和有源扫描近场光学显微镜光纤探针具有指导意义。

2 光纤锥中局部模理论分析

在光纤锥中, 由于光纤芯径随 z 向变化, 因而不能直接利用具有平移不变性的光纤波导模式解来处理。当满足缓变条件时, 利用局部模耦合模型^[3, 4]来分析其中的光场性质是合适的。在本文的讨论中一般采用弱导近似(相对折射率差 $\Delta \approx 0.3\%$)来简化问题的数学表达形式。

* 国家自然科学基金资助项目(69577005)。

** 中国科学技术大学电子工程系。

收稿日期: 1997-09-30; 收到修改稿日期: 1998-04-27

对于不满足平移不变性的光纤波导, 如果其芯径变化满足缓变条件

$$1/C_{kl} \gg 2\pi/\delta\beta \quad (1)$$

局部模耦合模型是一种很好的近似。其中 $\delta\beta = \int_0^z [\beta_l(z) \mp \beta_k(z)] dz$, C_{kl} 是互耦合系数。

光纤中的电磁场可以精确地表示为正向和反向传播的模式场的叠加, 将电场 E 和磁场 H 的表达式代入麦克斯韦方程并利用各模之间的正交归一性, 可得到如下的局部模式耦合方程

$$\frac{db_j}{dz} = i\beta_j b_j + \sum_k (C_{jk} b_k + C_{j-k} b_{-k}), \quad \frac{db_{-j}}{dz} = i\beta_{-j} b_{-j} + \sum_k (C_{-jk} b_k + C_{-j-k} b_{-k}) \quad (2)$$

式中 b_j 和 b_{-j} 分别表示第 j 个正向和反向传播的局部模振幅, C_{jk} 是模式耦合系数。

严格的局部模耦合方程是关于光纤中各阶模式振幅的耦合微分方程组, 可以根据具体情况将其简化。在本文考察的问题中, 所用光纤锥是由单模阶跃光纤通过熔拉法制成的。芯层折射率 n_{co} 为 1.4544, 包层折射率 n_{cl} 为 1.4500。采用如下的坐标表示方法: 当 $z < 0$ 时, 光纤芯径满足平移不变性, 芯层直径为 $4 \mu\text{m}$, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$; 从 $z = 0$ 开始, 光纤芯层和包层同时成锥, 且保持包层和芯层直径之比不变。光纤锥中入射场为基模 HE_{11} , 在光纤芯径非常小时, 芯层内的模场会扩散到包层。在模场半径扩散前可认为仅有基模场能够传输, 这时, 仅需考虑正反向传输的基模间的耦合。局部模耦合方程简化为

$$db_0/dz = i\beta_0 b_0 + C_{0-0} b_{-0}, \quad db_{-0}/dz = i\beta_{-0} b_{-0} + C_{-00} b_0 \quad (3)$$

其中, b_0 和 b_{-0} 分别代表光纤局部基模场的振幅, 式中的负号表示反向传输的场。 $\beta_{-0} = -\beta_0$ 。 C_{0-0} 为局部基模的反向耦合系数, 在弱导近似下,

$$C_{0-0} = -C_{-00} = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2} \frac{k}{4} \frac{n_{co}^2 \Delta}{2\beta_0} \frac{d\rho^2}{dz} 2\pi |e_{10}(r = \rho)|^2 \quad (4)$$

其中 $\rho = \rho(z)$ 表示 z 点的光纤芯层半径。

光纤锥中场的基模传输常数 $\beta_0 \approx kn_{co} \approx kn_{cl}$, 它随 z 的变化可以利用高斯近似求得:

$$\beta_0 = [k^2 n_{cl}^2 - (2 \ln V + V^4)/\rho^2]^{1/2} \quad (5)$$

其中 $V = k\rho(n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2}$ 是光纤波导的归一化频率。图 1 是抛物型光纤锥的传输常数随 z 变化的曲线。由图 1 可以看出在模场扩散前, β_0 随 z 的变化很小。沿 z 方向一个波长内, β_0 的变化约为 0.01%。作为零级近似, 忽略 β_0 随 z 的变化时, 对于抛物型光纤探针, $d\rho^2/dz = c$ (常数), 方程组 (3) 可以进一步简化成两个简单的独立微分方程:

$$\left. \begin{aligned} d^2 b_0/dz^2 &= -(\beta_0^2 - C_{0-0} C_{-00}) b_0 \\ d^2 b_{-0}/dz^2 &= -(\beta_0^2 - C_{0-0} C_{-00}) b_{-0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

这是标准的波动方程。可以看出, 在光纤锥中存在正向和反向传播的基模场, 他们在 z 方向的传播常数相同, 均为 $\sqrt{\beta_0^2 - C_{0-0} C_{-00}}$, 这比平移不变的光纤基模场的传播常数略大。

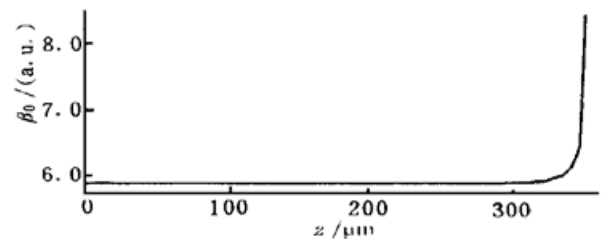


Fig. 1 Characteristic of β_0 versus z

3 光纤锥中的反向耦合场

熔拉法制成的光纤锥在其芯层半径小于 $1/(k \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2})$ 时, 基模场将扩散到包层, 从而形成“包层-外介质”模场^[4]。在模场扩散处, 光纤波导归一化频率 V 突然变大, 光纤中可以传

输的模式也骤然增加。原来的光纤芯层基模不仅耦合到“包层-外介质”模的基模，而且也耦合到其它高阶模上。这时的反向耦合模场将主要在光纤包层中传输，而且这些模式的传播常数与原光纤基模的传播常数差异较大，因此芯层反射的影响可以忽略。

对于抛物型和截锥型的光纤锥探针，在锥长同为 $354.5 \mu\text{m}$ 时，通过数值模拟得到其反向耦合系数 C_{0-0} 随 z 变化的曲线示于图 2。图中 z 越大，表示芯径越小，即离锥尖越近。

由上图可以看出，对于这两种形状的光纤锥，基模反向耦合系数在越接近锥尖时越大。截锥型光纤锥的反向耦合系数比抛物型光纤锥的反向耦合系数高出数倍。而且越接近锥尖时，两者的差异越大。这也从另一个角度证明了扫描近场光学显微镜系统中，抛物型锥的前向传输效率要比截锥型锥高^[5]。锥反射不仅存在，而且其反射系数已不可忽略。

实验上测试光纤锥逆向反射波的实验装置如图 3 所示，采用 $1.48 \mu\text{m}$ 的半导体激光器 LD 为光源，将光束耦合进一个 3 dB 的单模光纤耦合器(WDM)的 a 端，光纤耦合器的 b 端插入折射率匹配液(RL)中，在光纤耦合器的 c 端拉制不同锥长和不同形状的光纤锥(FT)，在光纤耦合器的 d 端通过 PIN 光电二极管探头和 AV 2491 型光纤功率计测量其反射功率。实验中光纤耦合器的插入损耗小于 0.2 dB。当 c 端、 b 端同时插入折射率匹配液时输出为零。

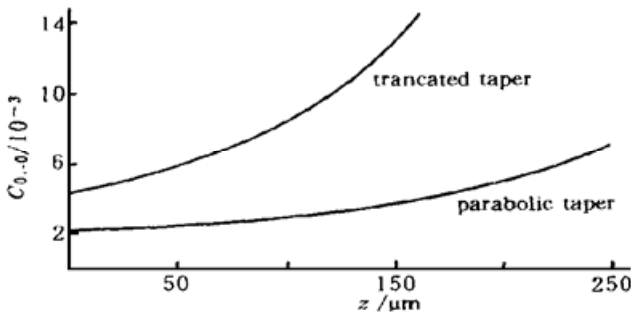


Fig. 2 Backward coupling coefficients of two kinds of fiber tapers versus z

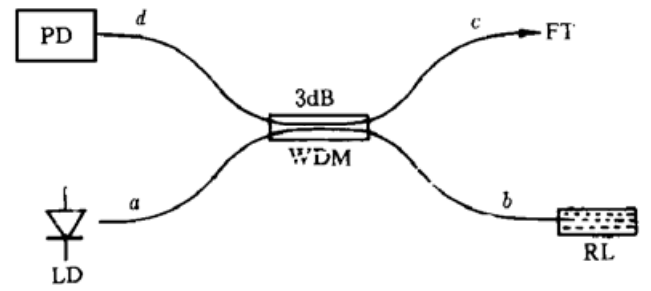


Fig. 3 Experiment configuration for the measurement of reflection wave of fiber probe

实验结果如图 4 所示，其中 a、b 为截锥型光纤锥，c 为抛物型光纤锥。光纤锥 a、b 的锥长分别为 0.5 mm、0.2 mm，c 为 0.2 mm。从图中可看出锥长不同反射率也不同，反射率随锥长增大而增大。

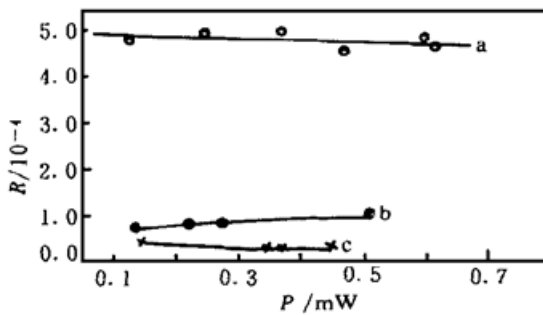


Fig. 4 The cover of back-reflectivity of different fiber probe lengths and shapes

锥长分别为 0.5 mm、0.2 mm，c 为 0.2 mm。从图中可看出锥长不同反射率也不同，反射率随锥长增大而增大。锥长相同锥形不同其反射率也不同，截锥型光纤锥的反射率比抛物型光纤锥的反射率高，这与理论分析相吻合。

反向耦合场对于扫描近场光学显微镜的检测信号来说是一种系统噪声。在使用无源光纤探针的扫描近场光学显微镜系统中，应该尽量减少这种噪声。然而，对于光纤锥激光器来说，这种反射则起着谐振腔输出端镜

的作用。

利用光纤锥的反射，可以将其作为光纤锥激光器的反射端。由于光纤锥的反射很弱，所以形成的是一种高损耗腔，其阈值较高。可以通过在光纤锥表面镀金属膜的方式来增加光纤锥的反射率，以提高光纤锥激光器的品质因子，降低光纤锥激光器的阈值。如果让光纤锥激光器工作在阈值附近，其输出光对于光纤锥的反射率变化将非常敏感。当光纤锥接近待测样品时，整体的反射场不仅有锥反射的场，也有样品反射后耦合进光纤锥内的耦合场。它们的

共同作用使得锥端反射率增加, 进而使得激光输出功率发生很大变化。考虑到样品的反射耦合与锥尖和样品的距离有关, 激光输出功率的变化也可以作为 z 方向距离控制的一个标度。光纤锥激光器的工作原理有别于普通的光纤激光器, 这方面更细致的理论分析将另文阐述。

光纤激光探针的输出光子流比无源光纤探针高出 3~4 个数量级, 同时其出射光斑非常小(与针尖大小量级相同), 所以其光场的能量密度很高。这使得它可以进行亚微米光刻、样品表面微加工和超高密度光存储。贝尔实验室的 Betzig 等人已利用光纤激光器探针实现了高达 45 Gbit/inch² 的存储密度^[1]。

结束语 利用局部模式耦合理论分析了光纤锥对于导波基模场的反射, 得出了基模反向耦合系数的表达式和数值计算结果。该结果有助于研制新型光纤锥激光器和有源扫描近场光学显微镜光纤探针, 大大提高扫描近场光学显微镜系统的输出光子流和其探测灵敏度。这在亚微米光学加工和超高密度光存储方面有着广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Bezig E, Grubb S G, Chichester R J *et al.*. Fiber laser probe for near-field scanning optical microscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(26): 3550~3552
- [2] Zhang Guoping, Ming Hai, Chen Xiaogang *et al.*. Experimental researches on active fiber probe for scanning near-field optical microscopy. *Chinese J. Lasers*, 1997, **B6**(6): 513~517
- [3] Snyder A W, Love J D. 光波导理论, 北京: 人民邮电出版社, 1991
- [4] Roderick W C, Love J D. Back-reflexion from fused biconic couplers. *J. Lightwave Tech.*, 1995, **13**(11): 2282~2289
- [5] 陈晓刚, 明海, 曹可等. PSTM 光纤探针几何形状研究. *中国激光*, 1997, **A24**(6): 605~609

Reflection Properties of Guided Wave in Fiber Taper Used for Scanning Near-Field Optical Microscopy

Chen Xiaogang Ming Hai Zhang Guoping Xu Lixin
Zhu Bing Bai Ming Wu Yunxia Xie Jianping

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

(Received 30 September 1997; revised 27 April 1998)

Abstract The local mode-coupled model is used to analyze theoretically the light field property of fiber taper in scanning near-field optical microscopy. Differential equations of the forward and backward fundamental mode fields in fiber taper are given. The backward coupling coefficient of fundamental mode is obtained numerically, and it can reach about 1% at most. The reflection makes the fiber taper act as an output mirror of tapered fiber laser resonator. It is also shown that the parabolic taper has a lower reflected coupling coefficient than the truncated taper. The experimental results of the reflection wave from fiber probe are given.

Key words scanning near-field optical microscopy, fiber taper, reflection wave, local mode.