

# 相位匹配下锥形光纤激发出的回廊模谐振\*

林国平<sup>a</sup>, 张磊<sup>a</sup>, 蔡志平<sup>b, \*\*</sup>

(厦门大学 a 物理系; b 电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 分别计算不同直径下锥形光纤基模和玻璃微球谐振腔内最低阶径向回廊模的传播常量, 利用相位匹配条件, 作出了锥形光纤与石英玻璃微球腔的直径对应关系曲线. 在此基础上, 选择锥腰直径 2.8 μm 左右的低损耗锥形光纤与直径 143.1 μm 球形度很好的玻璃微球腔进行近场耦合以激发球内的最低阶径向回廊模谐振, 在锥形光纤的两端进行通光测试, 在输出端获得了等间距分布的窄线宽滤波谱线, 其吸收峰位置与利用 Mie 理论计算的球内最低阶径向回廊模谐振峰位置相一致.

**关键词:** 锥形光纤; 玻璃微球; 回廊模; 谐振腔

中图分类号: O443; TN 248

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)10-1781-3

## 0 引言

近年来, 基于回廊模谐振的光学微腔的研究受到了日益广泛的关注. 其中, 利用熔烧光纤端面而成的玻璃微球谐振腔具有很高的品质因数(可达  $10^{10}$ )<sup>[1]</sup>和极小的模式体积, 其在腔量子电动力学、非线性光学、低阈值激光器、光通讯、光学传感等方面有很好的应用, 目前国外已有很多相关的应用报告, 例如, 折射率探测<sup>[2]</sup>、低阈值微球激光器<sup>[3]</sup>、新型的光开关技术<sup>[4]</sup>等, 国内也有相关的理论与实验的报告<sup>[5-7]</sup>. 所谓回廊模就是指耦合进入微球内的光波在微腔内表面不断进行全反射, 从而被约束在球内并绕子午线运行. 绕行的光波满足一定相位匹配条件时, 可以相互叠加增强. 而在球外的光场为近场, 即局限于球表面附近的倏逝波. 它是一种非传播波, 光场的振幅在矢径方向指数下降, 因此从球内透出到球外的平均能流为零. 这就使回廊模模式下的微球具有极高的品质因素和极小的模式体积. 通过近场耦合方式可以有效地激发腔内回廊模谐振, 目前使用的耦合器件主要有棱镜耦合器<sup>[8]</sup>、锥形光纤耦合器<sup>[9-10]</sup>、斜抛光纤耦合<sup>[11]</sup>, 在已通过实验证实有效的近场耦合器中, 锥形光纤耦合器具有较多的优点<sup>[9]</sup>.

本文采用了由标准通信光纤火焰法拉制的低损耗锥形光纤做耦合器件, 为有效激发微球腔内最低阶径向的回廊模谐振, 计算了不同直径锥形光纤与玻璃球微腔的匹配对应关系, 从而挑选了锥腰直径 2.8 μm 的锥形光纤与直径 143.1 μm 的微球腔进行耦合实验, 成功地激发了微球谐振腔内最低阶径向回廊模的谐振, 其耦合效率达到 67%, 线宽达到

24 pm, 相应球内回廊模的  $Q$  值为  $6 \times 10^4$ .

## 1 理论计算和分析

微球介质谐振腔内的回廊模谐振通常可以用  $n, l, m, p$  四个量子数来表示, 其中  $n, l, m$  分别代表径向量子数、传播方向上的角量子数、赤道面上的投影量子数, 而  $p$  则用来标志 TE 和 TM 偏振模. 理想的微球谐振腔中, 每个  $(n, l, m)$  模都是  $2l+1$  简并的, 即只需  $n, l$  两个量子数就可以标志各个回廊模. 由于  $(n=1, m=l)$  模式最贴近微球的表面和赤道面, 该模式具有极小的模式体积, 因此我们选择性地激发微球腔内最低阶  $(n=1, m=l)$  的 TE 模谐振, 这就需要锥形光纤基模的传播常量与微球腔内  $n=1$  的回廊模传播常量相匹配. 关于微球内  $(n=1, m=l)$  回廊模式的传播常量可用下式计算<sup>[10]</sup>

$$\beta_{\text{sphere}} = kl/x_{nl} \quad (1)$$

式中  $x_{nl}$  表示介质微球中的尺寸参量, 根据 MIE 散射理论, 尺寸参量满足下式<sup>[12]</sup>

$$mx_{n,l} = v + 2^{-1/3} \zeta_l v^{1/3} - \frac{p}{(m^2 - 1)^{1/2}} + \left[ \frac{3}{10} 2^{-2/3} \right] \cdot \zeta_l^2 v^{-1/3} - \frac{2^{-1/3} p (m^2 - 2p^2/3)}{(m^2 - 1)^{3/2}} \zeta_l v^{-2/3} + o(v^{-1}) \quad (2)$$

$$\text{其中 } p = \begin{cases} m & \text{TE modes} \\ \frac{1}{m} & \text{TM modes} \end{cases}$$

$\zeta_l$  为 Airy 函数  $Ai(-z)$  的第  $l$  个根,  $m$  为微球的折射率,  $v = l + \frac{1}{2}$ ,  $a$  为微球的半径. 本文中折射率  $m$  取 1.4629, 径向量  $n$  取 1, 计算了不同微球直径在 1550 nm 波长附近低阶径向回廊模的传播常量.

关于锥形光纤传播常量的计算, 早在 1997 年, J. C. Knight 等人在文献[10]中直接利用一个近似式计算了锥形光纤基模传播常量, 本文利用作图法直接求解弱波导近似后的光纤传输特征方程, 得到

\* 国家自然科学基金(69878023, 60277026)资助

\*\* Tel: 0592-2580141 Email: zpczai@xmu.edu.cn

收稿日期: 2006-06-28

了锥形光纤基模的传播常量. 弱导近似后光纤传输特征方程为

$$U \frac{J_1(U)}{J_0(U)} = W \frac{K_1(W)}{K_0(W)} \quad (3)$$

式中  $U = a \sqrt{k^2 n_d^2 - \beta_{taper}^2}$ 、 $W = a \sqrt{\beta_{taper}^2 - k^2}$ ,  $a$  为锥腰直径,  $\beta_{taper}$  为锥形光纤基模传播常量.

根据计算出的直径与传播常量的数据关系, 利用相位匹配条件  $\beta_{sphere} = \beta_{taper}$ , 做出了锥形光纤与玻璃微球的尺寸对应关系曲线, 如图 1.

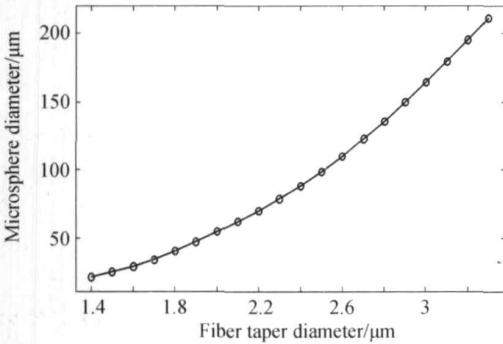


图 1 相位匹配下锥形光纤与玻璃微球腔的尺寸对应曲线图

Fig.1 Sphere diameter required to phase matched a fiber taper

### 2 实验结构

实验中的近场耦合器采用火焰法拉制而成的锥形光纤, 其具有很小的通光损耗(约为 0.16 dB), 而玻璃微球是通过高温熔融法制得的, 利用 CO<sub>2</sub> 激光器去熔融光纤的末端, 高温将细纤末端局部熔融, 在表面张力作用下形成一个带光纤柄的微球. 这种方法可以得到预期直径的、球形度较好的玻璃微球谐振腔. 我们根据计算得来的锥形光纤与微球腔直径的对应关系曲线, 挑选了直径 2.8 μm 的锥形光纤与直径 143.1 μm 的玻璃球微腔进行耦合, 其耦合系统如示意图 2 和实物图 3.

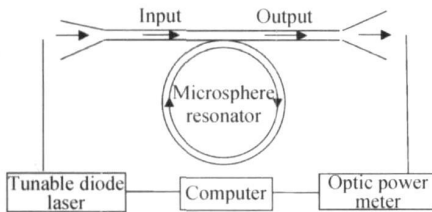


图 2 锥形光纤与微球腔耦合系统

Fig.2 The coupling system of a fiber taper with a microsphere resonator

图中光纤的输入端连接一个线宽为 150 kHz 的可调谐半导体激光器, 输出端连接高灵敏度光功率计. 而微球与锥形光纤的耦合, 则在 2 个相互垂直的图像监控器下, 通过高精度纳米调节架将小球的表面靠在锥形光纤上.

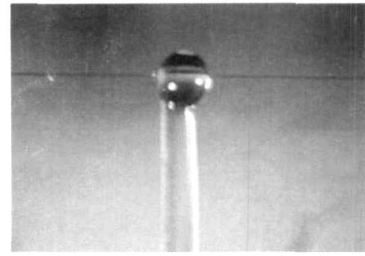


图 3 锥形光纤与玻璃微球耦合系统实物图

Fig.3 The coupling system image of a fiber taper with a microsphere resonator

### 3 实验结果分析

本文在输入端激光波长在 1 540~1 560 nm 波段, 以 1 pm 准确度进行扫描, 而在输出端光功率计上实时地进行信号采集. 通过 labview 程序采样作图, 得到输出端通光率随波长变化的等间距吸收峰曲线图, 如图 4.

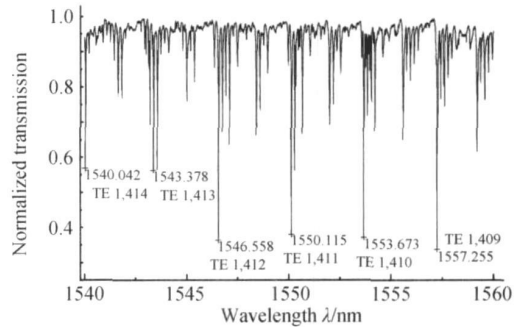


图 4 耦合系统通光率随波长变化曲线图

Fig.4 Normalized Transmission versus the wavelength in the coupling system

从图 4 中取出各个吸收峰峰值位置: 1540.042nm、1543.378nm、1546.558nm、1550.115nm、1553.673nm、1557.255nm, 通过公式(2)理论上计算了峰值在 1 540~1 560 nm 附近各个低阶径向回廊模谐振峰的位置: 1 539.924nm、1543.578nm、1547.250nm、1 550.939nm、1 554.646nm、1 558.371nm, 可以看出实验中测得的吸收峰位置与理论计算的微球腔内回廊模谐振峰位置基本一致, 将识别出来的回廊模吸收峰标志于图 4 中.

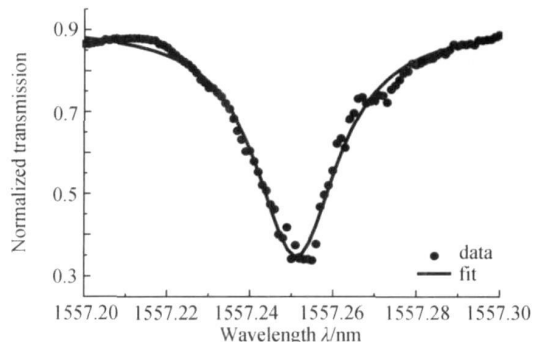


图 5 1 557.255 nm 吸收峰附近的数据拟合图

Fig.5 The fitting data near 1 557.255 nm

进而, 通过对 1 557. 255 nm 吸收峰位置的分析如图 5, 得到其光纤与玻璃微球腔的耦合效率达到 67%, 吸收峰的线宽达到 24  $\mu\text{m}$ , 相应球内回廊模的  $Q$  值为  $6 \times 10^4$ .

## 4 结论

利用弱波导近似后光纤传输的特征方程, 理论上计算了不同直径锥形光纤基模的传播常量, 同时与石英玻璃微球腔内最低阶径向回廊模谐振的传播常量进行相位匹配, 做出锥形光纤与微球直径大小的匹配关系曲线, 以此为基准, 挑选了满足相位匹配关系的直径在 2. 8  $\mu\text{m}$  的锥形光纤与直径为 143. 1  $\mu\text{m}$  的玻璃球微腔进行近场耦合分析, 成功激发了玻璃微球腔内低阶回廊模的谐振, 在耦合输出端观察到等间距的窄线宽吸收峰谱线, 这将有利于下一步开展的光通信方面窄带微球滤波器和低阈值微球激光器的研究工作。

### 参考文献

- [1] GORODETSKY M L, SAVCHENKOV A A, ILCHENKO V S, *et al.* Ultimate Q of optical microsphere resonators[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(7): 453-455.
- [2] HANUMEGOWDA N M, STICA C J, PATEL B C. Refractometric sensors based on microsphere resonators[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **87**(20): 6951-6953.
- [3] CAI M, PAINTER O, VAHALA K J. Fiber coupled Microsphere Laser[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(19): 1430-1432.
- [4] TAPALIAN H C, LAINE J P, LANE P A. Thermo-optical switches using coated microsphere resonators [J]. *Photon*

*Technol Lett*, 2002, **10**(8): 1118-1120.

- [5] LIU Lirsa, CAI Zhiping, WEN Guobin, *et al.* Theoretical simulation for a coupling system with taper fiber and silicon microsphere resonator[J]. *Opto Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 20-23.  
刘丽飒, 蔡志平, 温国斌, 等. 熔锥光纤与球微腔耦合系统的理论模拟[J]. *光电工程*, 2004, **31**(4): 20-23.
- [6] YAN Jun, WANG Zongbao, WANG Keyi, *et al.* The study of optical microsphere cavity with a stratified structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 197-200.  
严俊, 王宗宝, 王克逸, 等. 光学微球腔的壳层结构研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 197-200.
- [7] WU Jianneng, LIU Liying, HOU Zhanjia, *et al.* Whispering gallery modes from micro disks fabricated by soft gel technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 447-451.  
吴剑峰, 刘丽英, 侯占佳, 等. 溶胶凝胶光学微盘制作及微腔回廊耳语模式研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 447-451.
- [8] GORODETSKY M L, ILCHENKO V S. High-Q optical whispering gallery microresonators: precession approach for spherical mode analysis and emission patterns with prism couplers[J]. *Opt Commun*, 1994, **113**(2): 133-143.
- [9] CAI M, HUNZIKER G, VAHALA K. Fiber-optic add/drop device based on a silica microsphere whispering gallery mode system[J]. *Photon Technol Lett*, 1999, **11**(6): 686-687.
- [10] KNIGHT J C, CHEUNG J C, JACQUES F, *et al.* Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(15): 1129-1131.
- [11] ILCHENKO V S, YAO X S, MALEKI L. Pig-tailing the high-Q microsphere cavity: A simple fiber coupler for optical whispering-gallery-modes[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**(11): 723-725.
- [12] LAM C C, LEUNG P T, YOUNG K. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and strengths of resonances in Mie scattering[J]. *JOSA B*, 1992, **9**(9): 1585-1592.

## Excitation of Whispering Gallery Mode Resonances by a Phase-matched Fiber Taper

LIN Guoping<sup>a</sup>, ZHANG Lei<sup>a</sup>, CAI Zhiping<sup>b</sup>

(<sup>a</sup> Department of Physics, <sup>b</sup> Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Received date: 2006-06-28

**Abstract:** The values of propagation constants of the mode in a fiber taper and for the lowest radial mode of whispering gallery mode (WGM) resonance in silica microspheres with different sizes are theoretically calculated. Using phase-matching relation, silica microsphere diameter required to fiber tapers with different diameters is determined. Then to match the propagation constant of the mode in the fiber taper with low loss and waist diameter about 2. 8  $\mu\text{m}$ , a silica microsphere with diameter 143. 1  $\mu\text{m}$  and good shape is chosen, and the taper-microsphere coupling system is set up for excitation of the lowest radial mode of WGM resonance. By injecting the laser power into the fiber taper, a transmission spectrum with narrow absorption peak and equal peak gaps is observed, and the absorption peak position is consistent with the lowest radial mode of WGM resonance position in the microsphere calculated by using the Mie theory. Based on the transmission spectrum, a high value of quality factor  $Q$  as  $6 \times 10^4$  is measured in our taper-microsphere system.

**Key words:** Fiber taper; Silica microsphere; Whispering gallery mode; Resonator



**LIN Guoping** was born in Fujian, in 1982. He received the Bachelor's degree at Department of Physics of Xiamen University. At present, he is pursuing his Doctoral's degree at the same department. His main interest focuses on the field of optical fiber communication and integrated optics.