

文章编号: 1672-3392(2008)03-0026-04

掺铒磷酸盐玻璃微球吸收光谱上的形貌共振*

马乐¹ 林国平¹ 张磊¹ 蔡志平²

(¹ 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005; ² 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要 利用高温熔融冷却法制备了直径为 82.4 μm 的掺铒磷酸盐玻璃微球, 并利用熔融拉丝法制备了锥腰直径为 2.3 μm 的熔锥光纤与其进行耦合, 发现了掺铒玻璃微球吸收光谱中出现的等间距分布的滤波谱线。利用光学微球腔理论讨论了玻璃微球吸收光谱中的形貌共振现象, 计算出该耦合系统的品质因数为 1.31×10^4 。利用 Mie 散射理论计算了谱线的吸收峰位置和峰间间距, 计算结果与实验结果相符合。最后比较了两种峰间间距算法的优劣。

关键词 回廊模; 微球; 磷酸盐玻璃; 掺铒; 结构共振

中图分类号 O443, TN248 **文献标识码** A

1 引言

直径约在 5 ~ 500 μm 之间的光学介质微球谐振器称为光学微球腔, 通常使用的介质材料是硅酸盐、磷酸盐等光学玻璃。光学微球腔具有极高的品质因数 ($Q > 10^9$)^[1]、极小的模式体积、较宽的频段覆盖能力以及对温度压力等非常敏感的特性。近年来, 在非线性光学、腔体量子电动力学^[2], 以及窄带光学滤波、高灵敏度运动传感器^[3]和极低阈值激光器^[4]等领域受到广泛关注。国外在以上应用方面已经有了很多报道, 例如, 折射率探测^[5]、新型的光开关技术^[6]等; 国内也已经在回廊模计算理论和微球腔光耦合实验方面开展了相关工作^[7-8]。

光学微球腔的特性来源于其独特的回廊模 (Whispering Gallery Mode, WGM), 即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沿球的赤道面上的大圆绕行。而球外的光场为局限于球表面附近的倏逝波 (Evanescent Wave), 因此从球内透出到球外的平均能流为零, 这就使回廊模下的微球具有极高的品质因数和极小的模式体积。因此, 具有较高效率的耦合方式是通过其他电介质物体产生的倏逝波耦合, 即近场耦合。目前使用的耦合器件有棱镜耦合器^[9]、锥形光纤耦合器^[10]、斜抛光纤耦合^[11], 其中由标准

通信光纤火焰法拉制的熔锥光纤在通光后对耦合体系的附加损耗很低, 通光效率可达 99%^[12]。

本文所采用的微球腔材料中掺杂了一定浓度 (摩尔分数为 1.5%) 的稀土元素 Er。Er³⁺ 是目前研究最为广泛的稀土发光离子之一, 因其激光波长为 1530 ~ 1560 nm, 具有荧光寿命长等特性, 在军事、医疗、光通讯等领域具有极大的应用前景。用 974 nm 激光抽运掺铒玻璃, 期望产生波长为 1550 nm 附近的激光发射, 同时由于本文中采用的微球腔有极高的 Q 值和极小的模式体积, 因此对低阈值 1550 nm 激光发射的研究具有参考意义。

2 基本理论

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。 $(n=1, m=l)$ 模式最贴近微球表面和赤道面, 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数与微球腔内 $n=1$ 的回廊模传播常数相匹配。微球内

收稿日期 2007-07-02; 收到修改稿日期 2007-09-17

作者简介 马乐 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为信息光电子技术。通讯作者 蔡志平 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为稀土掺杂光纤线性与非线性光学性质研究。E-mail: zpcai@xmu.edu.cn

*国家自然科学基金 (69878023, 60277026) 资助项目

($n = 1, m = l$) 回廊模的传播常数:

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

其中, x_{nl} 表示介质微球中的尺寸参量, k 为波数 ($k = 2\pi / \lambda$)。根据 Mie 散射理论, 尺寸参量满足^[13]:

$$n_0 x_{n,l} = v + 2^{-1/3} i v^{1/3} - \frac{p}{(n_0^2 - 1)^{1/2}} + \left[\frac{3}{10} \times 2^{-2/3} \right] \frac{2 i v^{-1/3} - \frac{2^{-1/3} p (n_0^2 - 2p^2/3)}{(n_0^2 - 1)^{3/2}}}{i v^{-2/3} + o(v^{-1})} \quad (2)$$

其中, m_0 为微球的折射率, TE 模时, $p = m_0$, TM 模时, $p = 1/m_0$, i 为 Airy 函数 $Ai(-z)$ 的第 l 个根, l 为传播方向上的角量子数, $v = l + \frac{1}{2}$, a 为微球的半径。

由式(2)出发, 可以推导出相同偏振模式、同级数 n 下、模数相邻的两个共振峰之间的间隔:

$$\Delta x_{n,l} = \frac{2}{2 n_0 a} \left[1 - \frac{2^{-1/3} i v^{-2/3}}{3} - \left(\frac{1}{10} \times 2^{-2/3} \right) \cdot \frac{2 i v^{-4/3} + \frac{2^{2/3} p (n_0^2 - 2p^2/3)}{3(n_0^2 - 1)^{3/2}}}{i v^{-5/3} + o(v^{-1})} \right] \quad (3)$$

同时, 根据 Mie 散射理论^[14] 推导出了当微球的尺寸参量 ($x = 2\pi a / \lambda$) 比较大 (一般大于 50) 时, 相同偏振模式、同级数 n 下、模数相邻的两个共振峰之间的间隔:

$$\Delta x_{n,l} = \frac{x_{n,l+1} - x_{n,l}}{2\pi a} = \frac{2 \tan^{-1} \left\{ \frac{f(n_2/m_2)^2 - 1}{f(n_1/m_1)^2 - 1} \right\}^{1/2}}{m_1 [(n_2/m_1)^2 - 1]^{1/2}} \quad (4)$$

其中, $x_{n,l}$ 表示模数为 l 、级数为 n 的共振模对应的波长, a 为微球的半径, m_1 为微球周围介质材料的折射率, n_2 为微球材料的折射率, λ 为荧光的发射波长。

3 实验

3.1 玻璃微球的制备

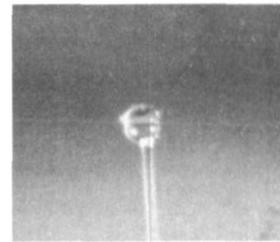
选用了中科院上海光机所高功率激光玻璃研究中心提供的磷酸盐玻璃棒为制作玻璃微球的基本材料, 其底面直径 1 cm, 长度 12 cm。将玻璃棒截断成 10 cm 和 2 cm 的两部分。2 cm 的部分放置在固定架上, 用 CO₂ 激光器波长为 10.6 μm 的红外激光照射其上端, 达到熔融状态时将 10 cm 的玻璃棒贴上, 把熔融的部分抽出拉出丝, 冷却成玻璃光纤。然后用激光会聚产生的高温将光纤内芯一端局部熔融, 在表面张力作用下形成较标准的球形, 冷却后便是一个带光纤柄的微球。虽然已不再

是完整的球形, 但对于能量集中于赤道部分的基本 WG 模式影响很小, 而且由于有光纤柄, 使得对微球的操纵方便很多。值得注意的是, 在这种非标准球中, 不同的 m 对应的模式已不可简并, 其对应的模式谐振频率有细微差异。

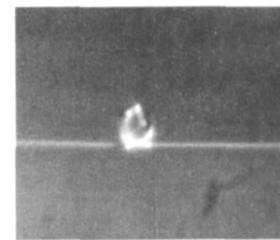
3.2 耦合结构

熔锥光纤耦合器被相切放置于微球的赤道面上。光纤耦合器的一端作为光的输入端, 另外一端作为光的输出端。当入射光频率等于微球近表面赤道上某回廊模的共振频率时, 锥光纤空气中的消逝模将耦合进这个回廊模中, 此时, 球内电场主要为共振模电场, 其他非共振模电场的贡献相比之下可以互略不计。光进入微球后, 沿着球内表面不断进行全反射, 最终将光从输出端口输出。

如图 1 所示是用显微镜数码相机拍得的实验系统实物图。熔锥光纤的锥腰直径约为 2.3 μm, 是利用氢氧火焰熔融拉锥法制得的。



(a) 俯视图



(b) 平视图

图 1 熔锥光纤与球微腔耦合系统实物图

Fig. 1 Magnified photograph of the actual system

4 计算结果分析

利用一个型号为 QSDM-1550-15 的宽谱光源 (Super Luminescent Diode, SLD) 发射 11.2 mW 的宽谱光作为输入光, 并利用 Advantest 公司的 Q8384 光谱分析仪在 1 540 ~ 1 610 nm 范围以 0.01 nm 的精度进行分析。如图 2 所示是微球与熔锥光纤耦合的归一化吸收光谱图, 它显示出分立的有规律的吸收峰结构, 其间隔约为 6.58 nm, 所有的信号都很强, 最高吸收可以达到 77%。在每

个分立的峰中,最高的峰值所对应的模就是 $n = 1$ 的 TE 模(即图中所标识的峰值)。图 2 中没有观察到明显的模式分裂,说明制备的掺铒玻璃微球的离心率低、球体化程度高。为了测得该耦合系统的 Q 值,对图 2 中 1 574.68 nm 所对应的谱线进行计算,利用公式 $Q = \nu / \nu \text{ 半高宽}$,可以得到该耦合系统的 $Q = 1.31 \times 10^4$ 。但实际上由于仪器的分辨率不够,微球腔的 Q 值很高 ($> 10^9$)^[1],该峰值所对应的谱线中有一些吸收谱线并没有被扫描出来,因此该耦合系统的实际 Q 值大于我们的测量值。

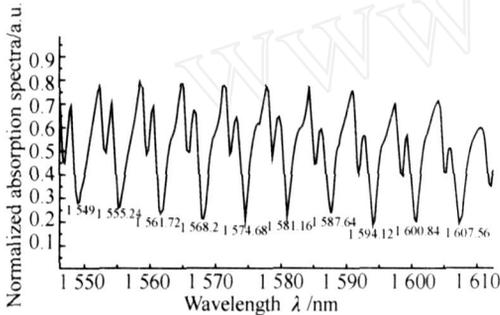


图 2 掺铒磷酸盐玻璃微球的吸收光谱

Fig. 2 Normalized absorption spectra of a phosphate glass microsphere

微球折射率 $n_0 = 1.536$, 直径 $2a = 82.4 \mu\text{m}$ 。将利用式(2)算出的共振峰的波长和实验所得的结果(图 2)进行比较,如表 1 所示。可以看出,实验结果与式(2)所算出的共振峰的波长基本相符,相对误差最大仅为 0.052%。在图 2 中,取满足相同偏振模式、相同级数 n 、模数相邻的形貌共振峰 1 574.98 nm 和 1 581.16 nm 为研究对象(这些峰具有几乎相同的半高宽,即品质因数相近),这两个峰的间隔为 $\Delta\lambda = 6.48 \text{ nm}$ 。

表 1 $n = 1$ 时 TE 模的波长 λ 和 l 的关系

Table 1 Wavelength λ for a TE mode with mode number l and mode order $n = 1$

l	Wavelength λ / nm		
	理论值	实验值	误差
245	1 549.47	1 549.00	0.030 %
246	1 555.62	1 555.24	0.024 %
247	1 561.83	1 561.72	0.007 %
248	1 568.08	1 568.2	0.008 %
249	1 574.39	1 574.68	0.018 %
250	1 580.75	1 581.16	0.026 %
251	1 587.15	1 587.64	0.031 %
252	1 593.61	1 594.12	0.032 %
253	1 600.13	1 600.84	0.044 %
254	1 606.71	1 607.56	0.052 %

利用式(3)进行计算,取 1 577.92 nm(图 2 中两个典型峰 1 574.98 nm 和 1 581.16 nm 的平均值), $2a = 82.4 \mu\text{m}$, $n_0 = 1.536$, 级数 $n = 1$, $l = 245$, 取 $\nu = 249.5$, 结果为 $\Delta\lambda = 6.36 \text{ nm}$; 利用式(4)进行计算, $m_1 = 1$, $m_2 = 1.536$, 取 1 577.92 nm, $2a = 82.4 \mu\text{m}$, 计算得 $\Delta\lambda = 6.97 \text{ nm}$ 。将图 2 中实验数据 $\Delta\lambda = 6.48 \text{ nm}$ 与式(3)和(4)的计算结果进行比较,明显可以看出与式(3)所计算的结果比较符合。

5 结 论

用高温熔融冷却法制备了直径为 $82.4 \mu\text{m}$ 的掺铒磷酸盐玻璃微球,利用锥腰直径为 $2.3 \mu\text{m}$ 的熔锥光纤与其进行耦合,发现微球的吸收光谱中出现分立的结构共振峰,计算出该耦合系统的 Q 值为 1.31×10^4 。结合这个实验,用 Mie 散射理论公式对共振峰的波长进行了计算,并与实验进行了比较。实验中采用的磷酸盐玻璃中掺杂了稀土元素 Er^{3+} 离子,由于微球的极高 Q 值、极小模式体积和 Er^{3+} 离子的受激发射特性,使本文的结果对于今后低阈值激光发射的研究奠定了良好的基础。实验中,我们用 974 nm 的可调谐激光器对整个耦合系统进行了抽运,依然得到了清晰的共振峰,但是并未产生希望中的荧光光谱乃至激光输出。因此,在今后的工作中,我们将继续对耦合系统进行不同方式的抽运,期望得到 Er^{3+} 离子产生的 1 550 nm 通信窗口的激光输出。

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] V L Seguin, S Haroche. Towards cavity-QED experiments with silica microsphere[J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 1997, 48(3): 53-58.
- [3] Lanine J P, Charles Tapalian, Brent Little, *et al.* Acceleration sensor based on high-Q optical microsphere resonator and pedestal antiresonant reflecting waveguide coupler [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, 93(1): 1-7.
- [4] Cai M, Painter O, Vahala KJ. Fiber-coupled microsphere laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(19): 1430-1432.
- [5] Hanumegowda N M, Stica CJ, Patel B C. Refractometric sensors based on microsphere resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(20): 6951-6953.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 张磊, 蔡志平. 球微腔介质的回廊模近似解[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 483-486.
- [9] 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.
- [10] Ming Cai, Oskar Painter, Kerry J Vahala. Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(1): 74-77.
- [11] Ilchenko V S, Yao X S, Maleki L. Pigtailling the high-Q microsphere cavity: a simple fiber coupler for optical whispering-gallery-modes [J]. Opt. Lett., 1999, 24(11): 723-725.
- [12] Ming Cai, Kerry Vahala. Highly efficient optical power transfer to whispering-gallery modes by use of a symmetrical dual-coupling configuration [J]. Optics Letters, 2000, 25(4): 260-262.
- [13] Lam C C, Leung P T, Young K. Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and strengths of resonance in Mie scattering [J]. J Opt. Soc. Am. B, 1992, 9(9): 1585-1592.
- [14] R K Chang, P W Barber. Optical Effects Associated with Small Particles [M]. Singapore: World Scientific, 1988.

Morphology-Dependent Resonances in the Absorption Spectrum of Phosphate Microsphere

MA Le¹ LIN Guo-ping¹ ZHANG Lei¹ CAI Zhi-ping²

(¹ Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

² Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, 361005, China)

Abstract Using the coupling system of a fiber taper with the waist diameter of 2.3 μm and an Er-doped phosphate microsphere with the refractive index of 1.536 and diameter of 82.4 μm , the absorption spectra of phosphate microsphere is measured. The structural resonance in the absorption spectra of phosphate microsphere is found. According to the microcavity theory, the structural resonance is analyzed, and the Mie scattering theory is used to calculate the position of the resonance modes and their spacing distance. The calculated result is in accordance with the observed resonance result.

Key words whispering gallery modes; microsphere; phosphate glass; Er-doped; structural resonance