

文章编号:1004-4213(2011)05-0803-4

外界环境对微球腔品质因数的影响

张宇光,李鹏,王丽,马培娇,严英占,刘俊,闫树斌

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室;电子测试技术重点实验室,太原 030051)

摘要:光学微腔由于其高品质因子(Q)特性具有广泛的应用前景.本文以光学微球腔为例分析了影响 Q 的各种因素,并通过实验研究分析了光学微球腔所处环境对 Q 的影响.选用直径约为 260 μm 的典型微球腔与锥形光纤进行耦合,通过透射谱的变化来反应 Q 的变化,结果表明,微球腔周围水蒸气的光吸收损耗和粉尘的散射损耗对微球腔的 Q 影响较大,能够导致 Q 降低 1~2 个数量级.

关键词:微球腔;品质因数;吸收;散射

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114005.0803

0 引言

光学微球腔^[1-3]是指半径从几微米到几百微米的球形光学谐振腔,通常使用的介电材料是二氧化硅等光学玻璃.近些年,光学微球腔由于具有极高的品质因数(Q)和较小的模式体积而受到日益广泛的关注.该谐振腔的特性主要来源于其独特的回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM),在这个模式下,光波会在微球内表面上不断进行全反射,从而被约束在球内并且沿着微球的大圆绕行,几乎没有能量损失,因而具有极高的品质因数(可达到 10^{10}).高 Q 特性使微球腔广泛应用在要求极细线宽、极高能量密度和亮度或极细微探测能力的领域中,例如非线性光学^[4-6]和腔量子电动力学^[7-8],以及窄带光学滤波^[9]、高灵敏度运动传感器^[10-11]和极低阈值激光器^[12-13]等.其中,作为表征微球腔的一个重要参量, Q 因子对于实现高性能微球腔器件至关重要.

本文介绍了影响 Q 的主要因素,通过实验分析了微球腔所处的周围环境对 Q 的影响,并指出周围环境的水蒸气和尘埃是其影响的关键因素.在此基础上提出在实际应用中,应该加入保护罩以避免周围环境对 Q 的影响.

1 微球腔 Q 的影响因素分析

微球腔 Q 表征了微球对光子能量的储存能力, Q

值越高,微腔存储光子能量的能力就越强.其定义为

$$Q = \omega \frac{\text{腔内贮存的能量}}{\text{单位时间损耗的能量}} = \omega \frac{W(t)}{-dW(t)/dt} = \omega\tau \quad (1)$$

式中, ω 为场的角频率; τ 为耦合进入到微腔的光子寿命.

微球腔的总体 Q 值^[14]决定于以下两个因素 Q_{co} 与 Q_{in} . Q_{co} 用来表征耦合过程中的光能量损失; Q_{in} 是用来描述在非耦合状态下腔体本身对光子能量存储的能力,它们与 Q_{co} 的关系为

$$Q_{\text{to}}^{-1} = Q_{\text{co}}^{-1} + Q_{\text{in}}^{-1} \quad (2)$$

应用锥形光纤耦合器,可实现接近理想的耦合效率($\geq 95\%$),保证了高 Q_{co} ($\geq 10^{10}$). Q_{in} 由以下几个因素决定

$$Q_{\text{in}}^{-1} = Q_{\text{rad}}^{-1} + Q_{\text{ss}}^{-1} + Q_{\text{mat}}^{-1} + Q_{\text{cont}}^{-1} \quad (3)$$

式中, Q_{rad} 表征的是有限的 D/λ (D 是微球腔的直径)比率而导致的光辐射损失,对于 $D \geq 25 \mu\text{m}$ 的微球腔,激发光波长为 1 550 nm 时, $Q_{\text{rad}} \geq 10^8$. Q_{ss} 表征微球腔表面光洁度导致的散射损耗,依靠热熔融方法的表面张力形成的微球腔的表面粗糙度为 1~3 nm,保证了微球腔的 $Q_{\text{ss}} \geq 10^9$. Q_{mat} 表征微球腔制备材料的吸收损耗,本文中讨论的微球腔用光纤制备,高纯度的硅材料保证了 $Q_{\text{mat}} \geq 10^{10}$. Q_{cont} 表征微腔表面不洁净引起的损耗.

基金项目:国家重点基础研究发展计划前期(No. 2009CB326206)、国家自然科学基金(No. 60707014, No. 60778029, No. 50975266)、重点实验室基金(No. 9140C1204040909)、总装创新项目(No. 7130907)、山西省自然科学基金(No. 200911059-16, No. 2010011003-2)和山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助以及研究生优秀创新项目(No. 20093076, No. 100115122)资助

第一作者:张宇光(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为微光学传感器. Email: xiaoguang9792@163.com

导师(通讯作者):闫树斌(1975-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为微光机电系统. Email: shubin_yan@nuc.edu.cn

收稿日期:2011-01-14; **修回日期:**2011-03-05

由此可见,对于表面张力形成的氧化硅光学微球腔($D \geq 25 \mu\text{m}$)来说, Q_{cont} 是影响 Q 的最为关键的因素. 本文针对满足上述条件的微球腔展开研究,主要讨论微球腔表面吸附的水蒸汽的光吸收损耗以及表面尘埃等微小颗粒的光散射损耗两个主要因素对 Q_{cont} 的影响.

2 实验

2.1 器件制备

微球腔采用锥形光纤耦合器实现其 WGM 模式的激发. 简单地讲,锥形光纤的制备采用熔拉法:单模光纤去除涂覆层后通过光纤夹具固定在水平的位移台上,在氢火焰给光纤加热的同时,两个水平位移台以相同的速度拉伸光纤,从而使光纤在火焰部分形成锥形,此方法能够实现超低损耗(0.29 dB)的锥形光纤制备,锥区束腰直径约为 $2 \sim 10 \mu\text{m}$.

微球腔的制备采用热熔融的办法:将单模光纤的涂覆层去除后,首先应用拉锥法把光纤的一段拉细,然后用 CO_2 激光器对其光纤尖端进行灼烧,使其成为熔融状态,然后在表面张力的作用下形成较为标准的球形,球的直径约为 $80 \sim 500 \mu\text{m}$.

2.2 微球腔耦合实验及 Q 的测定

为了测试微球腔的谐振特性和 Q ,我们搭建了耦合测试系统,如图 1. 应用 New Focus 窄线宽可调谐激光器 (TLB-6328) (1550 nm 波段,线宽 $\leq 300 \text{ kHz}$) 作为微球腔的 WGM 激光源,将锥形光纤与微球腔分别放置于两个 NewPort 三维位移台 (20 nm 分辨率)上,一端与激光器相连输入光信号,另一端由光电探测器接收输出的光信号,示波器用来显示光电探测器输出的信号. 信号发生器与激光器相连,实现对输出激光频率的连续调谐.

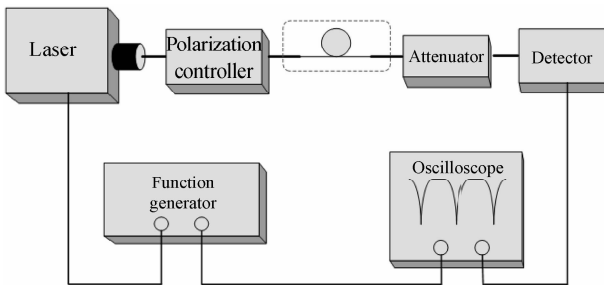


图 1 耦合测试系统
Fig. 1 Coupling system

实验中,通过位移台调整锥形光纤与微球腔两者之间的距离实现耦合效率的调节,用水平和垂直的两套 CCD 和放大镜对实验进行监测. 在整个实验中用到的锥形光纤耦合器锥区束腰直径约为 $4.5 \mu\text{m}$. 图 2 是一个典型的微球腔的耦合系统及其谐振谱.

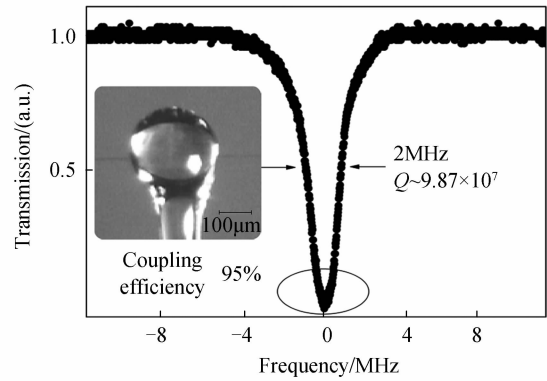


图 2 微球腔耦合系统及其谐振谱线
Fig. 2 Microsphere coupling system and the spectrum

2.3 微球腔外部环境的变化对 Q 值影响实验

为了研究微腔外界环境对其 Q 值的影响,设计了隔离罩在耦合系统周围,如图 1 虚线部分所示. 隔离罩的作用是保持微球腔周围稳定的环境.

首先通过加湿器,改变微球腔周围的空气湿度,并测试湿度变化后的 Q ,以此研究水蒸气对微球腔 Q 的影响.

其次,在洁净室的整体氛围下改变罩子内部的尘埃情况,以此研究微球腔周围灰尘对 Q 的影响.

3 实验结果分析

在洁净干燥的情况下,测试得到了不同直径大小微球腔的 Q ,测试用微球腔的直径为 $180 \mu\text{m} \leq D \leq 640 \mu\text{m}$. 如图 3 所示,在洁净室环境下,测试的

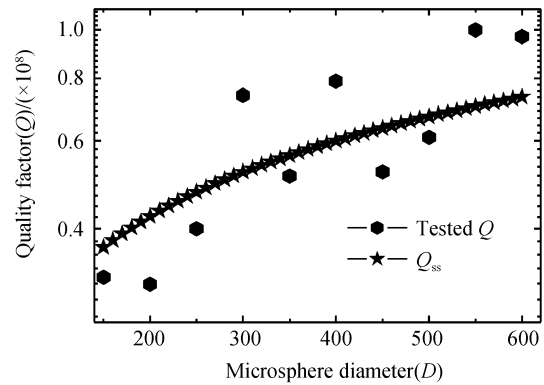


图 3 不同直径大小的微球腔的 Q 和 Q_{ss}
Fig. 3 Q and Q_{ss} values with different diameters of microsphere
微球腔的品质因子约为 10^8 附近,测试值与拟合结果 Q_{ss} 相吻合,证明在洁净且干燥的环境下,光学微球腔的 Q 主要受到表面不洁净度的限制. 拟合公式如下

$$Q_{\text{ss}} \approx \frac{3\lambda^2 l^{10/3}}{16\pi^5 \sigma^2 m^2 q^{5/2}} \quad (4)$$

式中, σ 为腔体表面的不平整度, q 为共振模级数, n 为模级数, $l = \pi D m / \lambda$.

图 4 是一个典型微球腔 ($D \approx 260 \mu\text{m}$) Q 在水蒸气环境下随时间的变化情况. 不难看出,在水蒸气环境下(空气湿度 $80\% \sim 90\%$),随着时间的推移 Q 急

剧的下降(约为 60%),这主要是由于当微球腔周围的空气湿度发生变化的时候,就会在微球腔表面形成一层水分子的凝结层.对于本实验研究所应用的 1 550 nm 波段来讲,水分子的吸收损耗比较大.因此,当微球腔所处环境的空气湿度较大时,水分子对光的吸收损耗成为限制 Q 的主导因素.

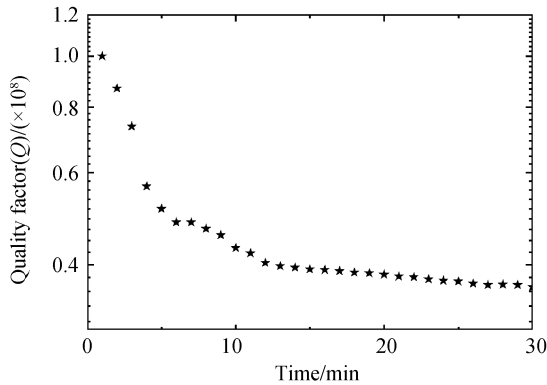


图 4 空气湿度对 Q 的影响

Fig. 4 The effect of atmosphere humidity on Q

当在微球腔防护罩内加入粉尘颗粒以改变微球腔周围的散射粒子的情况时,微球腔的 Q 显示出另一个急剧的下降,如图 5.这主要是由于周围的粉尘黏附到微球腔的表面,在 WGM 的传输中形成了散射体,并导致光散射损耗急剧增加.这些由于周围尘埃导致的额外的光散射损耗是随机的,而且与微球腔所处的应用环境有直接的关系.

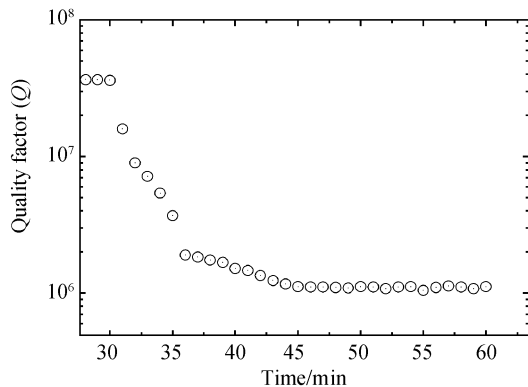


图 5 粉尘颗粒对 Q 的影响

Fig. 5 The effect of dust on the Q

可见,光学微球腔的周围环境对其 Q 有显著影响.为了保证 Q 的稳定性,更是为了促进光学微腔的应用进展,本文还提出了一种消除该影响的方法:通过应用防护罩对耦合系统进行保护.该方法不仅可以保护耦合系统不受破坏,而且还削弱了周围的水蒸气以及粉尘对微球腔 Q 的影响作用,如图 6.

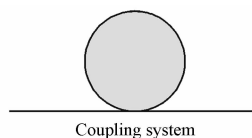


图 6 防护罩保护耦合系统

Fig. 6 The shield used to protect coupling system

4 结论

分析了微球腔 Q 的影响因素及外部环境对 Q 的影响.研究表明,周围环境的水蒸气和尘埃对 Q 有较大的影响,为进行微腔应用研究提供了改进思路,即:在应用中应该保持微腔周围环境的干燥以及洁净,以保证光学微腔的 Q 尽量少的受到干扰.此外,本文还提出了在耦合系统中加入防护罩的方法以消除周围环境对 Q 的干扰.

参考文献

- [1] YAN Jun, WANG Zong-bao, WANG Ke-yi, *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.
- [2] ZHANG Yuan-xian, HAN De-yu, ZHU Kun, *et al.* Wavelength shift of whispering-gallery-mode fiber laser caused by fiber cladding refractive index[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(3): 691-694.
张远宪,韩德昱,祝昆,等.包层介质折射率引起的回音壁模式光纤激光波长漂移[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 691-694.
- [3] YAN Ying-zhan, JI Zhe, WANG Bao-hua, *et al.* Evanescent wave excitation of microsphere high- Q model using tapered fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(7): 1789-1793.
严英占,吉喆,王宝花,等.锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1789-1793.
- [4] TAL CARMON, KERRY J. VAHALA, Visible continuous emission from a silica microphotonic device by third-harmonic generation[J]. *Nature Physics*, 2007, **3**: 430-435.
- [5] OSTBY E, YANG L, VAHALA K J. Ultralow threshold $\text{Yb}^{3+} : \text{SiO}_2$ glass laser fabricated by the solgel process[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(18): 2650-2652.
- [6] HOSSEIN-ZADEH M, VAHALA K J. Photonic RF down-converter based on optomechanical oscillation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(4): 234-236.
- [7] SCHLIESSER A, RIVIE RE R, ANETSBERGER G, *et al.* Resolved-sideband cooling of a micromechanical oscillator[J]. *Nature Physics*, 2008, **4**: 415-419.
- [8] WILSON-RAE, NOOSHI N, DOBRINDT J, *et al.* Cavity assisted backaction cooling of mechanical resonators [J]. *New Journal of Physics*, 2008, **10**: 095007.
- [9] IICHENKO V S, YAO X S, MALEKI L. Pigtailed high- Q microsphere cavity: A simple fiber coupler for optical whispering-gallery-mode[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(11): 723-725.
- [10] VOLLMER F, BRAUN D, LIBCHABER A. Protein detection by optical shift of a resonant microcavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(21): 4057-4059.
- [11] ANINE 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.
- [12] JIANG Nan, DU Fei, BAI Ran, *et al.* Factor of influencing pumping thresh old energy of whispering-gallery-mode laser in a cylindrical micro-cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(5): 660-663.
- [13] HUANG Yong-zhen, YANG Yue-de, CHE Kai-jun, *et al.* Semiconductor laser of directional output maded by plane technology[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2009,

- 46(2): 46-48.
[14] YAN Ying-zhan, YAN Shu-bin, WANG Shao-hui, *et al.*
Quality factor of planar micro-toroid cavities on chip[J].

Nanoscience and Nanotechnology, 2008, **10**(5): 27-30.
严英占, 闫树斌, 王少辉, 等. 芯片级平面环形微腔的品质因数
[J]. 纳米科技, 2008, **10**(5): 27-30.

Effect of the Environment on Microsphere Q -factor

ZHANG Yu-Guang, LI Peng, WANG Li, MA Pei-Jiao, YAN Ying-Zhan, LIU Jun, YAN Shu-Bin
(*Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement (Ministry of Education);
Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory North
University of China, Taiyuan 030051, China*)

Abstract: The Whispering Gallery Mode(WGM)optical microcavity has a wide range of applications for its high quality factor (Q). Various factors affecting the Q of optical microsphere cavities were analyzed theoretically and experimentally. WGM of microsphere with a diameter of 260 μm was achieved through coupling a tapered fiber. Experiments demonstrated that the water and dust around the microsphere cavity have great effects on the Q , which are mainly the optical absorption loss of water and scattering loss of dust, leading to 1~2 orders of magnitude lower of Q .

Key words: Microsphere; Q -factor; Absorption; Scatter