

# 光学微球腔的壳层结构研究\*

严俊 王宗宝 王克逸\*\* 周绍详

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系,合肥 230027)

**摘要** 使用时域有限差分法,对带表面壳层的光学微球腔进行模拟计算,分析了微腔内回音壁模式的能量密度分布,总结了壳层厚度对微球腔谐振性能的影响,并由此探讨对微球腔进行调谐和模式控制的方法.采用这种壳层结构,微球腔的谐振性能得到了有效提高(Q值提高了30%以上,模式体积减小了60%),为光学微球腔后续的结构设计和实际应用提供了一个新的优化思路.

**关键词** 微球腔;模式控制;时域有限差分;回音壁模式

**中图分类号** O436;O451;TN012

**文献标识码** A

## 0 引言

光学微腔是具有极高品质因数( $Q_0 > 10^9$ )<sup>[1]</sup>和极低模式体积的光学介电谐振器,形式有圆柱、圆盘、圆环、球等多种,线度约  $5 \mu\text{m} \sim 500 \mu\text{m}$ . 由于制备方法不同,所用的介电材料也有所不同,目前应用较多的是使用二氧化硅等光学玻璃制备的球形微腔. 光学微腔的特性来源于其独特的回音壁模式<sup>[2,3]</sup>(Whispering-Gallery Mode, 简称 WGM, 光波在微腔内表面上不断进行全反射,从而被约束在腔内并沿腔的周边绕行,几乎没有能量损失),可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场合,例如腔体量子电动力学(Cavity Quantum Electrodynamics, 简称 CQED)、窄带光学滤波、非线性光学、极低阈值激光器、单光子光学双稳态以及辐射场 QND 测量. 近年来,随着纳米制造技术的发展以及近场耦合技术的提高,光学微腔更是得到日益广泛的研究和应用<sup>[4~7]</sup>.

微腔量子电动力学计算说明,在微腔中自发辐射增强程度与 Q 值成正比,与模式体积成反比. 在回音壁模式谐振器中有多种模式存在,不同的模式对应的能量分布不同. 而对应于量子数  $l = l_{\text{max}}$ ,  $|m| = \pm l, n = 1$  的谐振模式具有最小的模式体积和最高的品质因数. 因此,寻求一种技术使耦合到微球谐振腔的能量只激发基模,而其他高阶模式则不被激发或能量很小,可以进一步提高微腔性能. 目前国内外对微腔的研究较多集中在微腔的高 Q 特性、耦合和发射特性方面,而对微腔内的模式分布和能量分布的研究仍显不足,尤其是在微腔内实现选模激发的方法研究很少. 近年来,时域有限差分方法<sup>[8,9]</sup>(Finite-Difference Time-Domain Method,

简称 FDTD)在微光学电磁场传播计算领域获得了广泛的认可,成功地应用于微透镜<sup>[10]</sup>、微孔<sup>[11]</sup>和微波导<sup>[12]</sup>等的模拟计算,获得了很好的效果. 本文使用 FDTD 方法,对棱镜耦合条件下带表面壳层的光学微球腔进行模拟,分析了微球腔内回音壁模式的能量密度分布,总结了表面壳层的折射率以及壳层的厚度对微球腔谐振性能的影响,并由此探讨对微球腔进行调谐和模式控制的方法. 采用这种壳层结构,微球腔的谐振性能得到了有效提高(Q值提高了30%以上,模式体积减小了60%),这为光学微球腔后续的结构设计和实际应用提供了有益的指导.

## 1 微球腔谐振特性分析

研究对象为棱镜耦合状态下的光学微球. 图 1 为微球腔耦合原理示意图,入射光波在棱镜与空气界面发生全反射,在棱镜外表面附近产生的倏逝波(Evanescent Wave)耦合到微球腔内激发起回音壁模式. 主要计算参量:微球半径为  $3.5 \mu\text{m}$ ,基本折射率为 1.46,与棱镜间距为 100 nm,棱镜折射率为 1.82,入射高斯脉冲波中心波长为 780 nm,频率范围为 330 THz~440 THz 至. 在计算不同微球腔壳层结构时,以上参量值基本不变,仅改变表面壳层的厚度或折射率,壳层的折射率应取较大值,约为 2.38,

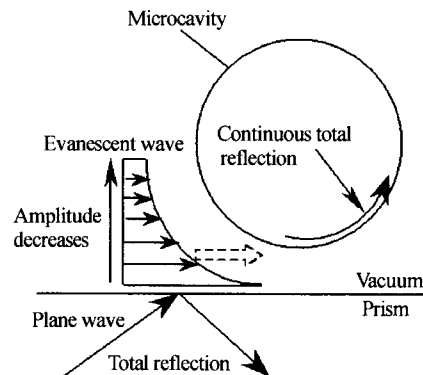


图 1 微球腔的棱镜耦合  
Fig. 1 Microsphere coupled with prism

\*国家自然科学基金(6037704, 50335050)资助项目

\*\* Tel: 0551-3601472 Email: kywang@ustc.edu.cn

收稿日期: 2004-12-21

壳层厚度从 100 nm~300 nm,大致包含了一阶模式的主峰,而又没有包含高阶模式主峰。

本文使用 FDTD 算法模拟计算微球腔的时域响应. 图 2 为 FDTD 网格空间中的微球腔及耦合棱镜. 计算网格长度为 20 nm,约为所分析频段范

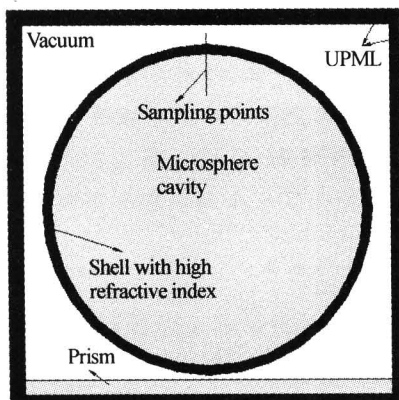


图 2 时域有限差分法的计算空间  
Fig. 2 The FDTD calculation space

表 1 表面壳层结构微球腔计算结果性能参量比较

壳层厚度/nm	谐振频率 $f_0$ /THz	谐振波长 $\lambda_0$ /nm	相对能量值	Q 值	$V_{\text{eff}}$	一阶模式峰值数 $m$
80	445.78	672.51	1.369	822.67	3094.35	45
120	416.51	719.78	1.175	1000.75	2585.63	45
160	385.17	778.34	1.119	849.31	2819.00	45
200	360.24	832.20	0.424	822.89	3699.29	45
均匀结构	387.46	773.74	0.919	611.88	9729.73	45

同时,平面波经棱镜全反射后,倏逝波耦合进微球腔,由于球腔壳层的折射率( $n=2.38$ )比球内折射率( $n=1.46$ )以及球外折射率( $n=1.0$ )都高,倏逝波在壳层的内外界面均发生全反射,电磁场能量绝大部分被约束在高折射率的表面壳层内,壳层内能量密度极高,微球表面的壳层结构起到了一个封闭波导的作用。

所以,根据模式体积公式<sup>[13]</sup>

$$V_{\text{eff}} = \frac{\int \epsilon(r) E^2(r) d^3 r}{(\epsilon(r) E^2(r))_{\text{max}}}$$

壳层厚度越小,壳层内的相对能量值将越大,模式体积  $V_{\text{eff}}$  越小,均匀结构微球腔由于对耦合进去的电磁场只有一侧有反射作用,因此模式体积大增. 但壳层厚度也不能无限减小,如果壳层太薄,能量密度值虽然会有所增加,但模式体积也增加,品质因数下降,这可能是由于壳层太薄时,壳层内能量密度太大,使得从壳层两边界透射出去的能量增加,而透射出去的能量缺少约束,所以反而导致模式体积的增加以及 Q 值的下降。

如图 3 为使用 FDTD 方法计算得到的微球腔时谐场,(a)为表面壳层结构,壳层厚度 120 nm,(b)为均匀结构. 图 4 是其相应的能量分布坐标图,图

围内最短波长的 1/20. 网格的吸收边界采用的是单轴完美匹配层(Uniaxial Perfectly Matched Layer, 简称 UPML),厚度为 10 层网格. 场值采样选取了如图示位置处的 42 个采样点,记录其场强变化. 采样点之间间隔 40 nm. 采样范围覆盖了各谐振模式沿径向能量分布的有效范围. 而且采样点远离微球腔与棱镜耦合的区域,避免了入射波的非耦合部分的串扰. 在得到微腔的时域响应后可通过快速傅里叶变换得到频谱。

表格 1 为表面壳层结构微球腔与均匀结构微球腔计算结果的一些性能参量比较,表中数据均是在平面波激励下,取一阶谐振峰峰数  $m$  为 45 的条件下得到的,使数据更加具有可比性. 由表 1 看出,当壳层厚度在某一范围( $< \lambda/2$ , 其中  $\lambda$  为真空中的光波波长)内单调变化时,谐振频率随着厚度的变化也在单调变化,这使得对微球腔调谐的可行性具有理论基础。

中横坐标零点表示在壳层外表面的采样点,横坐标正坐标值代表球体内的采样点位置,而负坐标值对应球体外的采样点. 微球腔的壳层参量同表格 1 计算所用参量. 根据脉冲激励频谱,可以得到微球腔的一阶或高阶谐振频率,然后使用平面波激励微球腔,激励平面波的频率取微球腔的一阶谐振频率,于是可以得到相对应的微球腔一阶谐振模式. 由图 3、图 4 可明显看出,壳层结构微球腔内谐振模式被约束在很小的范围内(大致为壳层的厚度). 因此壳层结构微球腔一阶模式下的模式体积相对于均匀介微球腔有效减小。

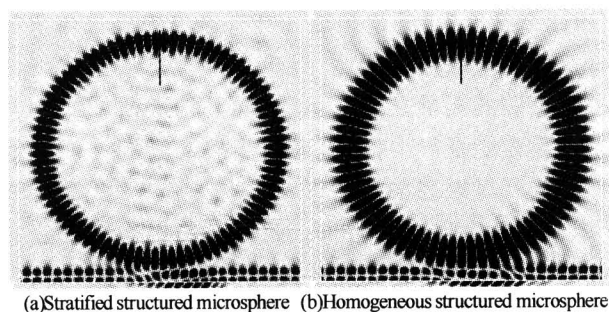


图 3 平面波激励下微球腔的一阶谐振场  
Fig. 3 Visualizations of the first-order radial WG mode excited by plane wave

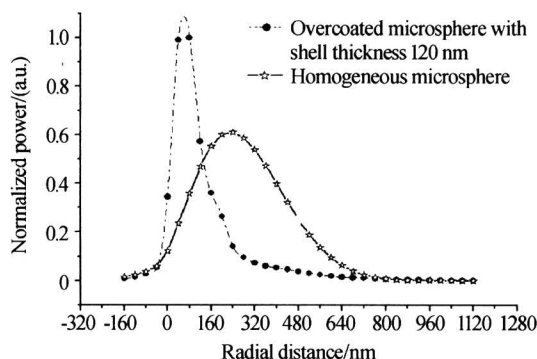


图4 平面波激励下微球腔一阶谐振场的能量分布图  
Fig. 4 Energy distribution of the FDTD-computed first-order radial WG mode, excited by plane wave  
对于品质因数  $Q_0$ , 由如下公式决定<sup>[1]</sup>

$$Q_0^{-1} = Q_{\text{rad}}^{-1} + Q_{\text{s,s}}^{-1} + Q_{\text{mat}}^{-1}$$

式中  $Q_{\text{rad}}$  为本征品质因数, 指由微球表面曲率导致的本征辐射损失, 也称为 WG 损失.  $Q_{\text{s,s}}$  指散射损失, 包括由介质的不均匀性和污物引起的损失以及微球表面附近空气中的水汽导致的损失.  $Q_{\text{mat}}$  指材料吸收导致的损失. 受 FDTD 方法本身的限制, 在计算中只能用网格来模拟球形结构的曲线界面, 因此增大了壳层内的反射面积, 从而使材料的吸收损失增加, 同时也使得边界处的散射损失增加很快, 这大大降低了微球腔的  $Q$  值. 只能通过不断减小计算网格长度来减小误差, 但即使是网格长度的少量减小, 对计算机性能要求就急剧增加, 所以网格长度不可能降到很低, 计算得到的  $Q$  值比预期中的  $Q$  值低很多. 但从表格 1 中仍可看出, 壳层结构的  $Q$  值相比均匀结构的  $Q$  值有 30% 以上的提高, 并且模式体积降低了 60%~70%.

## 2 微球腔的制作

光学微球腔的制备主要有两种方式: 1) 高温熔融冷却法<sup>[14]</sup>; 2) 溶胶-凝胶法<sup>[15]</sup>. 本文采用高温熔融冷却法. 这种方法主要用于二氧化硅微球的制备, 得到的微球均匀性更好, 而且微球带有光纤柄使得操作简便.

如图 5, 使用本实验室自制装置, 腐蚀去除光纤保护层, 加热拉丝, 形成锥尖, 然后用激光会聚产生的高温将锥尖局部熔融, 在表面张力作用下形成较标准的球形, 冷却后便是一个带有光纤柄的微球, 图 6 为试验中制作的带光纤柄的微球, 尺度在  $40 \mu\text{m}$ . 虽然已不再是完整的球形, 但对于能量集中在赤道部分的基本 WG 模式影响很小, 而且由于有光纤柄, 使得对微球腔的操作方便很多. 紧接着在微球表面镀一层高折射率膜 ( $\text{TiO}_2$ ), 壳层厚度及壳层折射率均取理论计算所获得的指导值, 这样就形成阶梯型折射率径向分布. 在这种结构的微球腔中, 通

过控制镀膜工艺过程, 可以实现对荧光分子的掺杂和掺杂量的控制.

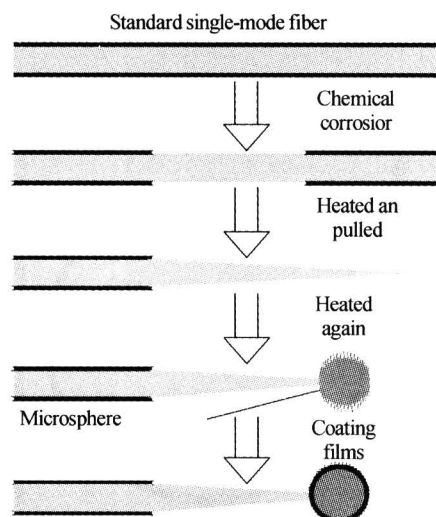


图5 壳层结构微球腔制作流程  
Fig. 5 Illustration of stratified structured microsphere fabrication

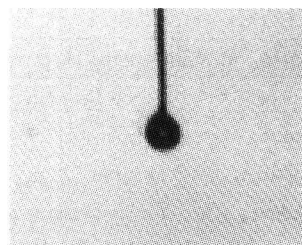


图6 试验制作的微球  $D \approx 40 \mu\text{m}$   
Fig. 6 Microsphere made in experiments when  $D \approx 40 \mu\text{m}$

## 3 结论

由以上计算分析可知, 在微球腔表面镀一层高折射率膜, 通过对壳层折射率值和壳层厚度的适当选取, 可以有效抑制微球腔谐振模式中的高阶谐振模式, 选择性激发基本模式, 从而显著提高微球腔的品质因数, 减小模式体积, 获得高性能的微球腔. 并且理论上我们可以通过选择不同的壳层厚度实现对微球腔的调谐, 但由于微球腔的谐振状态受很多因素的影响, 如耦合间距、光波入射角、壳层折射率等等, 所以要对微球腔的精确调谐或模式控制, 尚有很多工作要继续深入研究.

### 参考文献

- Gorodetsky M L, Savchenkov A A, Ilchenko V S, *et al.* Ultimate  $Q$  of optical microsphere resonators. *Optics Letters*, 1996, **21**(7): 453~455
- Gorodetsky M L, Ilchenko V S. High- $Q$  optical whispering-gallery microresonators: precession approach for spherical mode analysis and emission patterns with prism couplers. *Optics Communications*, 1994, **113**(1-3): 133~143
- Little B E, Laine J P, Haus H A, *et al.* Analytic theory

- of coupling from tapered fibers and half-blocks into microsphere resonators. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(4):704~715
- 4 Laine J P, Tapalian C, Little B E, *et al.* Acceleration sensor based on high-Q optical microsphere resonator and pedestal antiresonant reflecting waveguide coupler. *Sensors and Actuators A*, 2001, **93**(1):1~7
  - 5 Lu Y, Wang J Y, Xu X X, *et al.* Optical bistability and differential amplification in a tapered fiber coupler-microsphere resonator with nonlinear medium. *Optics & Laser Tech*, 2000, **32**(4): 245~249
  - 6 Lu Q Y, Chen X H, Guo W H, *et al.* Mode characteristics of semiconductor equilateral triangle microcavities with side length of 5-20  $\mu\text{m}$ . *IEEE Photonics Tech Lett*, 2004, **16**(2): 359~361
  - 7 Guo W H, Huang Y Z, Wang Q M, *et al.* Resonant frequencies and quality factors for optical equilateral triangle resonators calculated by FDTD technique and the Pade approximation. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2000, **12**(7): 813~815
  - 8 Taflove, Allen. *Computational Electrodynamics; The Finite-Difference Time-Domain Method*. Boston&London: Artech House, 1995. 51~105
  - 9 Taflove, Allen. *Advances in Computational Electrodynamics; The Finite-Difference Time-Domain Method*. Boston&London: Artech House, 1998. 263~296
  - 10 张东玲,白永林,冯晓强,等. FDTD方法对固体浸没透镜的光场分析. *光子学报*, 2004, **33**(7):884~888  
Zhang D L, Bai Y L, Feng X Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):884~888
  - 11 王晓秋,吴世法,简国树,等. 光子扫描隧道显微镜球星样品二维近场强度分析. *光学学报*, 2003, **23**(12):1409~1412  
Wang X Q, Wu S F, Jian G S, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1409~1412
  - 12 林青春,肖悦娱,何赛灵. 基于广角FD-BPM的PML边界处理方法. *光子学报*, 2002, **31**(3):349~353  
Lin Q C, Xiao Y Y, He S L. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3):349~353
  - 13 Coccioli R, Boroditsky M, Kim K W, *et al.* What is the smallest possible electromagnetic mode volume in a dielectric cavity. *IEE Proceedings, J (Optoelectronics)*, 1998, **145**(6): 391~397
  - 14 Klitzing W V, Long R, Ilchenko V S, *et al.* Tunable whispering gallery modes for spectroscopy and CQED experiments. *New Journal of Physics*, 2001, **3**(14):1~14
  - 15 Shibata S, Yano T, Yamane M. Preparation of homogeneous microspheres for optical cavity. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999, **259**(1-3):87~92

## The Study of Optical Microsphere Cavity with a Stratified Structure

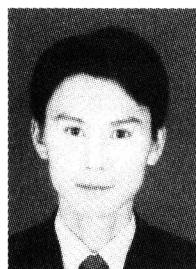
Yan Jun, Wang Zongbao, Wang Keyi, Zhou Shaoxiang

*Department of Precision Machinery & Precision Instrumentation, University of Science & Technology of China, Hefei 230027*

Received date:2004-12-21

**Abstract** The stratified structured microsphere cavity with high refractive index shell outer its surface was simulated using the finite-difference time-domain method (FDTD). The energy density distributions of whispering-gallery modes (WGM) in the microsphere cavity have been analyzed, and resonance performance of stratified structured microsphere cavities with different shell thickness were compared too. Then the methods to tune the microsphere cavity or to control the resonant modes of microsphere cavity were presented and discussed. With this stratified structure, an effective enhance was achieved for the resonant performance of microsphere cavity (with Q value 30% larger and mode volume 60% smaller than the homogeneous structured microsphere cavity). These studies and results provide new optimizing methods for the subsequent structure design and practical application of microsphere cavity.

**Keywords** Microsphere cavity; Mode control; FDTD; Whispering-gallery mode



**Yan Jun** was born in 1981. Now he is a graduate student in the Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation in University of Science and Technology of China. His current interest is analyzing optical microsphere resonators using finite difference time domain (FDTD) method.