

文章编号: 0258-7025(2010)07-1789-05

# 锥形光纤倏逝场激发微球腔高 Q 模式

严英占<sup>1</sup> 吉 喆<sup>1</sup> 王宝花<sup>1</sup> 闫树斌<sup>1\*</sup> 熊继军<sup>1</sup> 马 骏<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

(<sup>2</sup>武警太原指挥学院训练部部队管理和后勤教研室, 山西 太原 030051)

**摘要** 介绍了高品质因子(Q)回音壁模式(WGM)SiO<sub>2</sub>光学微球腔和锥形光纤耦合器的制备方法。应用窄线宽(300 kHz)单模 NewFocus 可调谐激光器(1520~1570 nm)作为激发光源,使用直径 1.2 μm 锥形光纤激发直径 150 μm 的 SiO<sub>2</sub> 微球腔的光学模式,得到了其形貌共振谱线。从微球腔的温度分布出发,结合 SiO<sub>2</sub> 材料的热膨胀以及热光效应折射率变化机理,分析了微球腔在高功率光激发下热效应引起的共振谱平移(2.5 GHz/°C)。实验表明,控制 WGM 激发功率,可有效抑制微球腔的热效应,且易于实现稳定的高 Q 模式。调整锥形光纤耦合激发角度,可以较好地抑制微球腔高阶模式,测得其共振谱线宽为 22 MHz,对应的微球腔 Q 值为 10<sup>7</sup>。

**关键词** 激光技术;光学微腔;回音壁模式;品质因子;倏逝场激发;热效应

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1789

## Evanescent Wave Excitation of Microsphere High-Q Model Using Tapered Fiber

Yan Yingzhan<sup>1</sup> Ji Zhe<sup>1</sup> Wang Baohua<sup>1</sup> Yan Shubin<sup>1</sup> Xiong Jijun<sup>1</sup> Ma Jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>2</sup>Troops Management and Logistics Staffroom in Taiyuan Armed Police Command College, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** Fabrication methods of SiO<sub>2</sub> optical microsphere cavities and tapered fibers are introduced. Using a tunable single-mode NewFocus laser (short-term linewidth of 300 kHz) with an adjustable extent of 1520~1570 nm as the excitation optical source, whispering gallery modes (WGM) of microsphere with a diameter of 150 μm are achieved through coupling a tapered fiber with waist diameter of 1.2 μm. The microsphere and the tapered fiber are all fabricated by experimental laboratory setup. Based on the microsphere cavity's temperature distribution, binding the thermal expansion coefficient and the thermo-optical refractive index effects, resonant spectrum shift (2.5 GHz/°C) induced by the high pump power in the microcavity is analyzed. The experiments indicate that controlling the WGM pump power is an effective way to suppress microcavity thermal effects, and in this way it is easy to fulfill a stable high quality factor (Q) model. Through adjusting the tapered fiber pumping angle, higher-modes are suppressed effectively, and an ultra-narrow linewidth about 22 MHz is measured. The corresponding Q of this microsphere is 10<sup>7</sup>.

**Key words** laser technique; optic microcavity; whispering gallery modes; quality factor; evanescent wave exciting; thermal effect

收稿日期: 2009-11-17; 收到修改稿日期: 2009-12-10

基金项目: 国家 973 规划前期(2009CB326206)、国家自然科学基金(60707014 和 60778029)、重点实验室基金(9140C1204040909)、总装创新项目(7130907)、山西省自然科学基金(20091105916 和 2010011003)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助和山西省研究生优秀创新项目(20093076)资助课题。

作者简介: 严英占(1984—),男,博士研究生,主要从事光学微腔传感方面的研究。E-mail: yyz712@gmail.com

导师简介: 熊继军(1971—),男,博士,教授,主要从事 MEMS 传感器与微系统等方面的研究。

E-mail: xiongjijun@nuc.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: shubin\_yan@nuc.edu.cn

# 1 引 言

近年来,回音壁模式(WGM)高品质因子(Q)光学微腔<sup>[1~3]</sup>得到了广泛研究。在该模式中,激光沿着光学微腔大圆以全反射方式传播,因此微腔内光能量只有极小部分泄露到腔外,从而形成了沿界面传播的高Q值光学模式。超高Q值使得此类光学微腔可应用于低阈值激光发射<sup>[4~7]</sup>、高灵敏传感器<sup>[8,9]</sup>、光通信器件等领域。此外,微腔WGM易于形成小的有效模式体积(V),从而在微腔内部形成极高的能量密度,这对于研究基于WGM光学微腔量子电动力学<sup>[10,11]</sup>和量子信息通信<sup>[12]</sup>有重要科学意义。早在1946年Purcell<sup>[13]</sup>就指出:处于微腔中原子的自发辐射会被共振效应所增强 $[f = 3Q\lambda^2 / (4\pi^2V)]$ ,由此可见研究WGM微腔的光学特性、获得高Q低V的共振模式是探索研究新型器件的重要基础。为了开展相关研究,如何高效激发WGM特定光学模式,获得稳定的光学微腔共振谱图并测得高Q值成为关键。

理想微球腔是一个绝对对称腔体,其谐振发生在一系列离散的与微腔尺寸参数有关系的数值里。通常来讲,微球腔WGM可用 $n, m, l$ 三个变量表示,分别代表径向模数、角向模数以及方位角模数。在微球腔所有的模式中,基模( $m=1, n=1$ )是最重要的模式。此模式下,耦合进入到微球腔内的光能量被局限在与耦合锥形光纤相切的一个大圆内,实现了WGM下最高光子简并度,因此该模式可获得最低的模式体积,从而获得较高的能量密度( $Q/V$ ),使得该模式在低阈值激光发射、集成光学<sup>[14]</sup>以及非线性光学<sup>[15]</sup>等研究中备受关注。因此,研究以微球腔为代表的对称光学微腔时(球形微腔<sup>[16]</sup>、圆盘微腔<sup>[17]</sup>、环形微腔<sup>[18]</sup>、柱形腔<sup>[19]</sup>和跑道形微腔<sup>[20]</sup>

等),总是以上述光学模式为主要研究对象。

如何在较低的抽运激发功率下激发上述WGM基模是进行微球腔实验研究的关键。单一模式的激发不仅有利于有效光信号的耦合输入输出,提高整体系统品质因数,更重要的是,获得单一模式是进行微腔应用研究的出发点。本文应用锥形光纤作为微球腔的激发信号通道,实现了高效率( $\geq 95\%$ )耦合输入和输出,获得了微球腔在通信波段的共振谱图并测试其Q值( $10^7$ ),满足了下一步进行微球腔高灵敏传感实验的要求。此外,光纤耦合器与传统光通信器件兼容,为扩展基于微球腔的传感器、滤波器、参量振荡器等应用研究提供条件。

# 2 实 验

## 2.1 器件制备

锥形光纤制备采用熔融拉锥法,装置示意如图1(a)所示,单模光纤SFM 28通过光纤夹具固定在水平的拉锥位移台上,一端输入激光,另一端输出到光功率计或者光电探测器,用以监测拉锥过程中的光损耗。在氢火焰加热的同时,两个水平位移台以相同的速度拉伸光纤,从而在火焰部分形成锥形,如图1(b1)所示。拉锥中光损耗主要来源于火焰气流吹动和位移台不平行两个因素。实验中,精细调节光纤两端位移台的平行度可有效降低光损耗并提高制备成品率;为减小火焰影响,设计了倒置火焰头以减小气流对光纤锥的影响。图1(b2)是拉锥过程中典型功率监测图,说明通过调节光纤夹具和火焰头可以实现超低损耗(0.29 dB)的锥形光纤制备。同时,控制拉锥速度、拉锥距离以及氢火焰氢气流速可以制备出不同锥区、锥角以及不同锥区直径大小的耦合器。

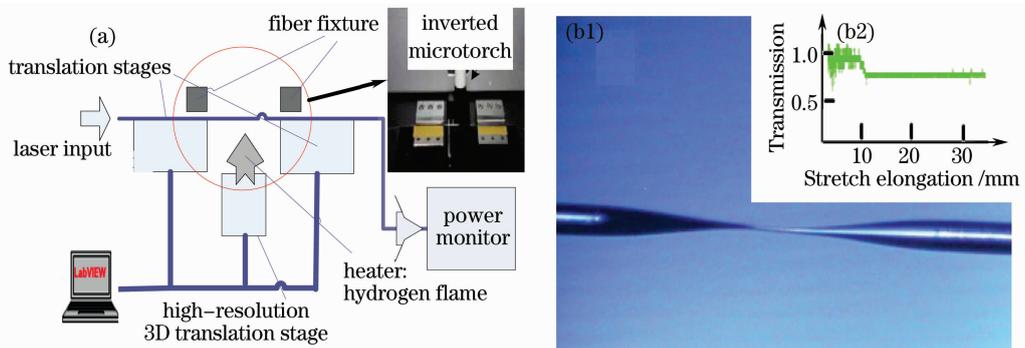


图1 (a)锥形光纤制备系统;(b1)制备的锥形光纤显微图;(b2)制备中功率监测图

Fig. 1 (a)System diagram of tapered fiber fabrication; (b1)micrograph of prepared tapered fiber; (b2)power monitoring during taper fabrication

微球腔制备是加热单模光纤(SMF)末端,依靠熔融状态下 SiO<sub>2</sub> 的表面张力形成的,如图 2(b)所示。首先应用图 1 介绍的方法制备单锥光纤,以获得极细光纤尖。然后用 CO<sub>2</sub> 激光器对光纤尖进行灼烧,依靠氧化硅表面张力形成微球腔。与传统氢火焰热源相比激光热源有功率可调、与微腔无接触的优势,最重要的是避免了氢火焰加热过程中氢氧根离子掺入<sup>[21]</sup>,从而减小了光传输的损耗,提高了微球腔的品质因子。整个调节和制备过程在 CCD 和放大镜组成的监测系统下完成。

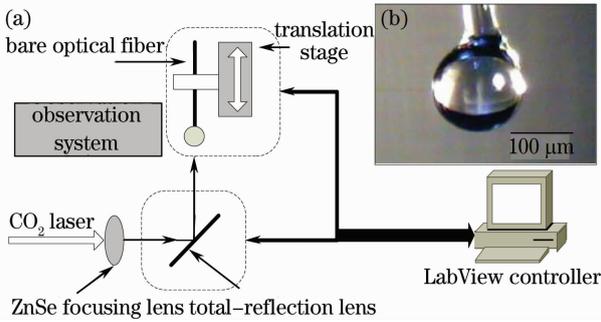


图 2 (a)微球腔制备系统;(b)制备的微球腔实例

Fig. 2 (a)Microsphere fabrication system diagram;

(b)a sample of prepared microsphere

## 2.2 耦合实验

实验装置如图 3 所示,用带有光纤输出的 NewFocus 窄线宽可调谐激光器作为微球腔的 WGM 激发光。偏振控制器用来研究激光的不同偏振态对微球腔共振作用的影响。锥形光纤和微球腔组成的耦合系统输入端连接偏振控制器,输出端光信号由光电探测器接收,示波器用以显示探测器输出的信号。信号发生器提供 150 Hz,峰-峰值小于 6 V 的三角波信号,用以调制激发光,调制宽度为 30 GHz。

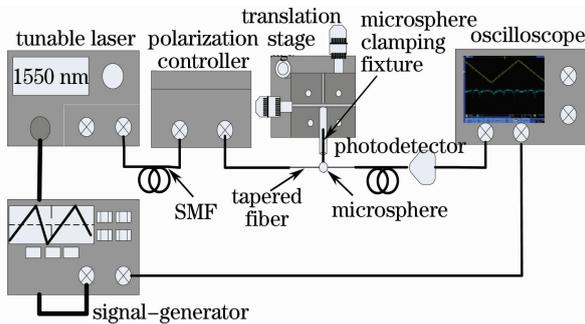


图 3 微球腔测试系统装置

Fig. 3 Setup of microsphere testing system

实验选用直径为 150 μm 的微球腔,由耦合理论相位匹配关系,制备了腰径直径为 1.2 μm 的耦合锥形光纤。微球腔通过光纤柄固定在 NewPort 高精度压电平移台上(20 nm 分辨率),通过精细调

节三个维度实现微球腔与锥形光纤的临界耦合与微球腔的模式选择。实验中应用水平和垂直的两套 CCD 和放大镜对实验进行监测。此外,实验环境应尽量避免噪声和振动等影响,使抽运激光在稳定状态下最大效率激发微球腔 WGM。

## 3 结果及分析

设置抽运激光激发功率较高时(>10 mW),在示波器上观测到不规则的激发谱线(图 4),逐渐降低激发功率,经过一段时间,输出谱线变得逐渐规则(图 5)。其原因主要有两个:1)较高的激发功率使得高 Q 微球腔内形成超高能量密度,从而激发了微球腔的某些非线性光学效应,如拉曼散射<sup>[22]</sup>、四波混频克尔非线性现象<sup>[23]</sup>等。2)高能量密度的驱使使得在微球腔内部发生热效应,从而引起微球腔本身的热变化。相比非线性作用,热效应占据主导地位。微球腔的温度分布决定于吸收激发光的吸热过程以及散热过程,可描述为

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{K}{\rho C} \Delta T = \frac{\alpha}{\rho C} |\mathbf{E}|^2, \quad (1)$$

式中  $K$  为微球腔材料(SiO<sub>2</sub>)的导热率, $\rho$  为材料的密度, $C$  为材料的比热容, $\alpha$  为材料的热吸收系数, $\mathbf{E}$  为耦合进入到微球腔的电场矢量。热消散系数  $K/\rho C$  描述了热量从微腔消散到周围环境的程度。一般来讲,热消散过程分为微腔内部热量的平均化以及微腔与周围环境的热量交换过程。微腔与周边环境的热交换过程,主要讨论外界环境对微腔 WGM 影响,通常用来研究温度传感器<sup>[24]</sup>。对微腔本身的影响来讲,微腔内部热量平均化是主要因素。

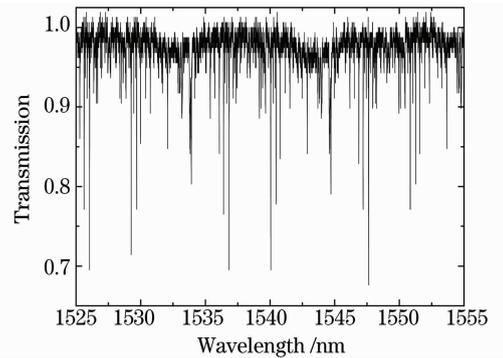


图 4 抽运激光功率为 10 mW 时微球腔的共振谱线

Fig. 4 Resonant spectrum when the pump power is 10 mW

微腔内部热量的平均化过程,会引起微球腔本身折射率(与折射率随温度变化率  $dn/dT$  有关, $n$  为微腔折射率)和尺寸的微小变化(与微腔热膨胀系数  $\epsilon$  相关),并最终使谐振位置发生偏移。用  $\Delta T(t)$  表

示微球腔受高功率激发后的温度变化量,则微球谐振频率的温度系数为

$$\epsilon + dn/(ndT). \quad (2)$$

对用熔光纤锥法制备的微球腔来说,其 $dn/dT$ 为 $1.28 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,微腔热膨胀系数为 $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ,可计算该微腔谐振频率的温度系数为 $1.2879 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。用 $\omega_0(t)$ 表示发生热效应后的谐振频率, $\omega_0$ 表示热效应以前的谐振频率,两者间关系为

$$\omega_0(t) - \omega_0 = \omega_0 \cdot [\epsilon + dn/(ndT)] \cdot \Delta T(t). \quad (3)$$

对于该实验研究来讲,应用通信波段可调谐激光激发微球腔 WGM,对于实验中直径为 $150 \mu\text{m}$ 的微球腔来说,可计算得到热效应产生 $2.5 \text{ GHz}/^{\circ}\text{C}$ 的谐振偏移。可见在高功率激发情况下,热效应使谐振位置发生变化,即高功率激发微球腔带来的热效应会导致共振谱线的不稳定。这些不稳定因素包括:谐振线宽展宽、谐振位置的变化以及不稳定谱的出现。所有这些因素对获得稳定的模式谱并测试微球腔的 $Q$ 值提出了挑战。

为了较为准确地研究微球腔的形貌共振特性,将激光器输出模式设置为恒功率模式,且激光输出恒定为 $0.1 \text{ mW}$ ,并且保持偏振控制器的偏振控制方向不变。研究微球腔共振谱特性的激光扫描通过粗扫和精扫两种方式实现。

在粗扫状态下,不应用信号发生器的外部调制功能,通过 LabView 控制程序,设置激光器的扫描范围为 $1530 \sim 1560 \text{ nm}$ ,步长为 $10 \text{ pm}$ 。获得的该微球腔的 WGM 共振谱图,如图 5 所示,并测得其自由频谱宽度(FSR)为 $3.55 \text{ nm}$ ,与理论计算基本相符[自由频谱宽度为 $\lambda^2/(n_0 \pi D)$ , $\lambda$ 为激发光波长, $n_0, D$ 分别为微球腔折射率和直径]。还可以看出,在微球腔共振谱中高阶共振模式是不可避免的,只有通过实验调节尽量抑制高阶模强度。关于 WGM 共振峰位置的识别与指认,参见文献[25~27]。

粗扫实验揭示了微球腔的总体共振特性,为精确测试微腔的品质因子,需要信号发生器提供调制信号对激光器实施精确扫描控制。首先由粗扫结果选定某一共振频率,设置信号发生器输出三角波(频率大于 $150 \text{ Hz}$ ,峰-峰值小于 $2.3 \text{ V}$ ),可测得此微球腔的共振峰线宽为 $22 \text{ MHz}$ ,如图 6 所示,计算得到其 $Q$ 值为 $10^7$ 。

在基于光学微腔的传感研究中,应用外部被测物对光学谐振的 WGM 进行微扰以实现高灵敏探测。传感中通常检测共振峰的移位,因此极窄的共振线宽

将直接决定传感器的灵敏度,即光学微腔的 $Q$ 值( $\nu/\Delta\nu$ , $\nu$ 为共振位置的光频率; $\Delta\nu$ 为共振峰的线宽)决定了此类传感器的探测极限。在生物医学病毒检测以及生化传感研究中,室温下分子荧光光谱或吸收光谱的线宽在 $10 \text{ nm}$ 左右,约 $10^3 \text{ GHz}$ 。与本文中 $Q$ 值为 $10^7$ 的 WGM 光学微腔共振线宽 $22 \text{ MHz}$ 相比,研究高 $Q$ 光学微腔传感器具有巨大潜力。

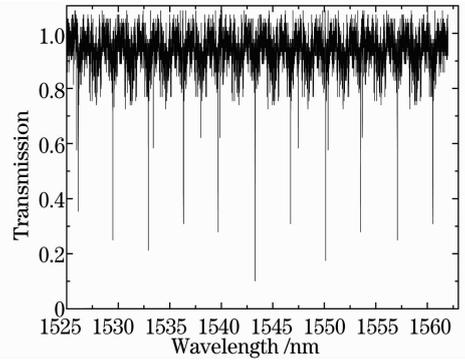


图 5 粗扫实验下获得的微球腔共振谱线

Fig. 5 Microsphere resonant spectrum when coarse scanning

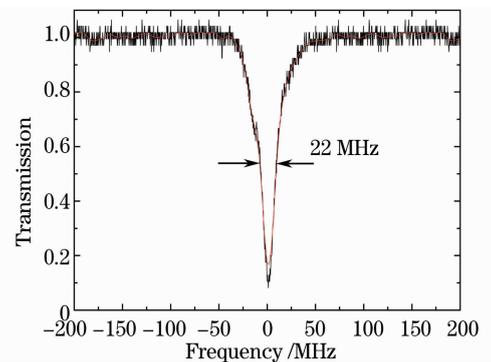


图 6 精扫下获得的微球腔的共振线宽约为 $22 \text{ MHz}$   
Fig. 6 Hump resonance linewidth about  $22 \text{ MHz}$  when precision sweeping

## 4 结 论

建立了微球腔热效应分析的模型,分析得到了微球腔在高功率光激发下热效应会引起共振谱平移( $2.5 \text{ GHz}/^{\circ}\text{C}$ )的结论。在此基础上,应用 NewFocus 可调谐激光器在 $0.1 \text{ mW}$ 较低抽运功率下分别通过粗扫和精扫两种激光扫描方法获得直径为 $150 \mu\text{m}$ 微球腔的共振谱图,并测得该微球腔的品质因子为 $10^7$ 。结果表明,低功率激发可获得稳定的共振谱图和高 $Q$ 值。分析了高 $Q$ 对高灵敏度传感的影响机制,表明该测试数据和实验装置满足了下一步进行微球腔生化传感等研究的需要,为进行基于高 $Q$ 微腔的传感研究提供了媒介。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Yuanxian, Han Deyu, Zhu Kun *et al.*. Wavelength shift of whispering-gallery-mode fiber laser caused by fiber cladding refractive index [J]. *Chinese J. 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
- 2 Shan Guangcun, Huang Wei. Theoretical study of single-pair fluorescence resonant energy transfer spectroscopy in microcavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1049~1053  
单光存, 黄 维. 微腔中单分子对荧光共振能量转移光谱学的理论研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1049~1053
- 3 Chen Libai, Guo Zhenning, Lin Jieben. Study on application of one-dimensional photonic crystal microcavity to luminescence of silicon-based material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1793~1797  
陈丽白, 郭震宇, 林介本. 一维光子晶体微腔在硅基材料发光中的应用研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1793~1797
- 4 T. Carmon, K. J. Vahala. Visible continuous emission from a silicamicro photonic device by third-harmonic generation [J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(6): 430~435
- 5 Jiang Nan, Du Fei, Bai Ran *et al.*. Factor of influencing pumping threshold energy of whispering-gallery-mode laser in a cylindrical micro-cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 660~663  
江 楠, 杜 飞, 白 然等. 影响柱形微腔回音壁激光抽运阈值能量的因素 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 660~663
- 6 Huang Yongzhen, Yang Yuede, Che Kaijun *et al.*. Semiconductor laser of directional output maded by plane technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(2): 46~48  
黄永箴, 杨跃德, 车凯军等. 平面工艺制作的定向输出半导体激光器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(2): 46~48
- 7 Zhang Chunyu, Xiao Liguang, Qin Li *et al.*. Blue color microcavity organic light emitting device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1967~1972  
张春玉, 肖力光, 秦 丽等. 蓝色微腔有机发光器件 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1967~1972
- 8 F. Vollmer, S. Arnold. Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules [J]. *Nature Methods*, 2008, **5**(7): 591~596
- 9 Jijun Xiong, Yingzhan Yan, Zhe Ji *et al.*. Micro sensors based on planar microtoroid cavities [C]. *SPIE*, 2009, **7157**: 71570R
- 10 Yan Shubin, Geng Tao, Zhang Tiancai *et al.*. Cesium double magneto-optical trap for cavity quantum electrodynamics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 190~194  
闫树斌, 耿 涛, 张天才等. 用于腔量子电动力学研究的铯原子双磁光阱 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 190~194
- 11 G. Anetsberger, R. Riviere, A. Schliesser *et al.*. Ultralow-dissipation optomechanical resonators on a chip [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(10): 627~633
- 12 J. C. F. Matthews, A. Politi, A. Stefanov *et al.*. Manipulation of multiphoton entanglement in waveguide quantum circuits [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(6): 346~350
- 13 E. M. Purcell. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies [J]. *Phys. Rev.*, 1946, **69**: 681
- 14 A. Serpengüzel, A. Kurt, U. K. Ayaz. Silicon microspheres for electronic and photonic integration [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2008, **6**(3,4): 179~182
- 15 Y. Xu, M. Han, A. Wang *et al.*. Second order parametric processes in nonlinear silica microspheres [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(16): 163905
- 16 K. J. Vahala. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, **424**(1939): 839~846
- 17 S. Koseki, B. Zhang, K. D. Greve. Monolithic integration of quantum dot containing microdisk microcavities coupled to air-suspended waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(9): 051110
- 18 D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillan *et al.*. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip [J]. *Nature*, 2003, **421**(1371): 925~928
- 19 V. Zamora, A. Diez, M. V. Andrés *et al.*. Interrogation of whispering-gallery modes resonances in cylindrical microcavities by backreflection detection [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 1039~1041
- 20 C. Pang, F. Gesuele, A. Bruyant *et al.*. Enhanced light coupling in sub-wavelength single-mode silicon on insulator waveguides [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 6939~6945
- 21 R. J. Bartula, J. B. Ghandhi, S. T. Sanders *et al.*. OH absorption spectroscopy in a flame using spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(36): 8635~8640
- 22 S. Blair, K. Zheng. Microresonator-enhanced Raman amplification [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(6): 1117~1123
- 23 I. H. Agha, Y. Okawachi, M. A. Foster *et al.*. Four-wave-mixing parametric oscillations in dispersion-compensated high-Q silica microspheres [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(4): 043837
- 24 G. Guan, S. Arnold, M. V. Otugen. Temperature measurements using a microoptical sensor based on whispering gallery modes [J]. *AIAA Journal*, 2006, **44**(10): 2385~2389
- 25 Ju Tao, Yang Xiaoli. Solving and analysis of eigenmodes of microsphere laser [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, **21**(1): 28~30  
鞠 涛, 杨小丽. 微球激光本征模的求解与分析 [J]. *光电技术应用*, 2006, **21**(1): 28~30
- 26 Huang Yantang, Chen Chao. Recognition and analysis of the morphology-dependent resonance spectra of silica optical microsphere [J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2008, **13**(2): 180~184  
黄衍堂, 陈 朝. SiO<sub>2</sub> 微球形腔形貌相关谱的识别指认与分析 [J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2008, **13**(2): 180~184
- 27 Zhang Lei, Lin Guoping, Cai Zhiping *et al.*. Structural resonances in absorption spectrum of quartz microsphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 94~97  
张 磊, 林国平, 蔡志平等. 石英玻璃微球吸收光谱上的结构共振 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 94~97