

## 毫米级氟化钙盘腔的加工与测试

卢晓云<sup>1</sup>, 薛晨阳<sup>1,2</sup>, 王永华<sup>1</sup>, 郑华<sup>1</sup>, 杜建功<sup>1</sup>, 张婷<sup>1</sup>, 闫树斌<sup>2</sup>, 唐军<sup>2</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 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)

**摘要:** 回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)的光学谐振腔作为光学研究的重要工具具有广泛的应用前景。以超纯单晶氟化钙为材料加工了直径为5 mm, 厚度为1 mm的CaF<sub>2</sub>盘型腔, 并用化学机械抛光法对其进行了光学抛光, 得到了粗糙度为纳米级别的CaF<sub>2</sub>盘型腔。搭建盘腔与锥形光纤的耦合测试平台测试所加工盘型腔的光学性能, 测得在波长为1 550 nm时所加工的盘型腔的品质因数为 $2.1 \times 10^6$ 。对CaF<sub>2</sub>盘型腔损耗机制进行了理论分析, 提出了提高CaF<sub>2</sub>盘型腔品质因数的方法。

**关键词:** 光学谐振腔; CaF<sub>2</sub>盘型腔; 光学抛光; 粗糙度; 品质因数

**中图分类号:** TN202 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3049-06

## Fabrication and test of millimeter-size CaF<sub>2</sub> disk resonator

Lu Xiaoyun<sup>1</sup>, Xue Chenyang<sup>1,2</sup>, Wang Yonghua<sup>1</sup>, Zheng Hua<sup>1</sup>, Du Jiangong<sup>1</sup>, Zhang Ting<sup>1</sup>,  
Yan Shubin<sup>2</sup>, Tang Jun<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education,  
North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Whispering gallery modes (WGM) optical resonators is an important tool for optical research with broad application prospects. A CaF<sub>2</sub> disk resonator was fabricated with ultra-pure single crystal of calcium fluoride characterized by the diameter of 5 mm and thickness of 1 mm. The CaF<sub>2</sub> disk resonator was polished with chemical mechanical polishing method and nanometer-scale roughness was achieved. The coupling test platform of disk resonator and tapered fiber was set up to test the optical properties of the resonator. The test results showed that CaF<sub>2</sub> optical resonator characterized by the quality factor  $Q = 2.1 \times 10^6$  at  $\lambda = 1\ 550$  nm. The loss mechanisms of the resonator was analyzed and the method to improve quality factor of the CaF<sub>2</sub> resonator was proposed.

**Key words:** optical resonator; CaF<sub>2</sub> disk resonator; optical polishing; roughness; quality factor

收稿日期: 2015-02-06; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(51225504); 国家自然科学基金(61275166)

作者简介: 卢晓云(1989-), 女, 硕士生, 主要从事微纳米光学方面的研究。Email: 15135166346@163.com

导师简介: 薛晨阳(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事传感器技术、微纳器件方面的研究。Email: xuechenyang@nuc.edu.cn

## 0 引言

近年来由于基于 WGM 模式的光学谐振腔具有极高的品质因素(Q)、极小的模式体积(V)、极窄的谱线宽度、工艺简单和可集成等特点而成为研究热点,被广泛地用于光的线性和非线性研究,例如光学滤波<sup>[1]</sup>、非线性光学<sup>[2]</sup>、腔量子电动力学<sup>[3]</sup>、高灵敏度的传感探测<sup>[4-6]</sup>、低阈值激光器<sup>[7]</sup>等领域。光在光学谐振腔的高折射率界面存在光学回音壁模式,光可以一直沿着腔体内部边界发生全内反射并以稳定的行波传输模式传播,此时 WGM 腔中的绝大部分能量分布在腔的表面附近。当满足一定的相位匹配条件时,在微腔内绕行的光波相互叠加增强,从而具有了超高 Q 值的特征。基于 WGM 模式的谐振腔只支持很少的放射模式、发散模式及方位角模式,可以实现实验的重复性以及腔模式的可控性,从而决定了 WGM 模式的谐振腔理论上具有单一的工作模式。随着微米纳米加工工艺的发展,光学谐振腔的材料有了更多的选择,光学谐振腔的形状和尺寸可以得到精确的控制,因而光学谐振腔得到越来越多的关注。

绝缘衬底上的硅(silicon on insulator)材料、氧化硅材料和半导体硅材料都是目前典型的高 Q 值微谐振腔制造材料。利用表面张力制作的球腔和利用化学刻蚀的方法制作盘型腔是最普遍的加工方法,但是存在加工工艺复杂、提高 Q 值难度大、光学微谐振腔耦合结构的 Q 值难以实现长时间保持和微谐振腔表面易受环境中灰尘等的破坏等问题。近年来由于光学晶体材料具有优越的光学特性,加工形状可控性高、其几何特征可以精确设计等特点而备受瞩目。以铌酸锂、氟化钙、氟化镁、氟化钡、蓝宝石等晶体为材料制作光学谐振腔已经成为光学谐振腔的研究热点<sup>[8-12]</sup>。由于氟化钙具有优良光学性能、机械性能和化学稳定性,理论上 CaF<sub>2</sub> 光学谐振腔极限 Q 值能达到 10<sup>13</sup>,远大于传统材料光学谐振腔,因此选用 CaF<sub>2</sub> 晶体加工光学谐振腔。但是由于 CaF<sub>2</sub> 晶体硬度低、易破碎、各向异性、高的热膨胀系数等特性,对超精密加工提出了巨大挑战。由于加工技术水平有限,国内对氟化钙等晶体谐振腔的研究相对较少。

文中主要介绍利用光学抛光工艺制作毫米级别氟化钙盘型腔的方法,并通过搭建耦合测试系统对

所加工的氟化钙盘型腔进行光学性能测试,得到了 CaF<sub>2</sub> 盘型腔的测试结果。通过理论分析 CaF<sub>2</sub> 盘型腔的损耗机制提出了提高 CaF<sub>2</sub> 盘型腔光学性能的方法,为进一步优化 CaF<sub>2</sub> 盘型腔指明了方向。

## 1 CaF<sub>2</sub> 盘型腔的 Q 值分析

光学谐振腔的特征参数主要有品质因数,模式体积,自由光谱范围,耦合效率等,其中品质因数是衡量谐振腔性能的最基本的参数。品质因数反应的是谐振腔对光的存储能力。Q 值的普遍定义为:

$$Q = \omega \frac{W}{-dW/dt} = 2\pi\nu \frac{W}{-dW/dt} = \omega\tau \quad (1)$$

式中:W 为谐振腔的总的能量强度;-dW/dt 为单位时间内的能量损耗; $\omega$  为谐振腔的谐振角频率; $\omega = 2\pi\nu$ , $\nu$  为谐振腔内电磁场的振荡频率; $\tau$  为光子在谐振腔内的存储时间即光子寿命。Q 值越高说明微腔对能量的存储能力越强。高 Q 值的特征使得光学谐振腔高成为良好的光存储器件。

在某一特定波长下的回音壁模式光学谐振腔的光能量损耗来源主要有辐射损耗、表面散射损耗、材料吸收损耗和耦合损耗。光学谐振腔的 Q 值可以表示为:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{吸收}}} + \frac{1}{Q_{\text{散射}}} + \frac{1}{Q_{\text{辐射}}} + \frac{1}{Q_{\text{耦合}}} \quad (2)$$

吸收损耗来源于材料本征吸收,是由于材料中的原子杂质和三种散射(拉曼散射,布里渊散射,瑞利散射)引起的。晶体材料的谐振腔的本征吸收损耗的可以表示为:

$$Q_{\text{吸收}} = \frac{2\pi n}{\lambda\alpha} \quad (3)$$

式中:n 为谐振腔的折射率; $\alpha$  为谐振波长处的材料吸收系数; $\lambda$  为真空中的光波长。CaF<sub>2</sub> 谐振腔在  $\lambda = 1550\text{nm}$  时,折射率  $n = 1.43$ ,材料吸收损  $\sigma = 5 \times 10^{-6}\text{cm}^{-1}$ ,此时得到被吸收损耗所限制的 Q 值为 10<sup>10</sup>。由上式可知,特定波长下回音壁模式谐振腔的吸收损耗是由该波长下的光吸收损耗系数决定的。由于晶体材料吸收率远低于传统的光学材料,因而能够达到更高的极限 Q 值。因此选择氟化钙晶体加工光学谐振腔理论上可以达到更高的 Q 值。

散射损耗是由表面缺陷(加工引起的微小的破裂)和嵌入表面的微小粒子引起的表面不均匀引起的。晶体材料有近乎完美的晶格,内部缺陷引起的损

耗可以忽略,因此晶体谐振腔的散射损耗主要来源于表面散射损耗。在一定的表面粗糙度下晶体谐振腔的最高  $Q$  值的表达式为<sup>[13]</sup>:

$$Q_{\text{散射}} \approx \frac{3\lambda^3 D}{16n\pi^2 B^2 \sigma^2} \quad (4)$$

式中: $D$  为光学谐振腔的直径; $B$  为光学谐振腔与锥形光纤的相关长度; $\sigma$  为光学谐振腔的表面粗糙度; $n$  为在一定波长下材料的折射率。 $\text{CaF}_2$  谐振腔在  $\lambda=1550\text{ nm}$  时,折射率  $n=1.43$ ,直径  $D=5\text{ mm}$ ,令  $B=\sigma=40\text{ nm}$  时,被光学谐振腔的表面粗糙度所限制的  $Q$  值为  $10^7$ ,这与氟化钙盘型腔的极限  $Q$  值  $10^{13}$  相差甚远,因此腔体的表面粗糙度是制约腔体  $Q$  值的最终因素。而腔体的表面粗糙度  $\sigma$  是由抛光质量决定,因此提高腔体的抛光质量是提高氟化钙谐振腔的  $Q$  值的关键所在。

辐射损耗为光学谐振腔表面弯曲损耗引起的光能量损耗,是由有限的  $D/\lambda$  比率而导致的,只有在很小的微腔才计入(小于几微米),加工的氟化钙谐振腔直径在毫米级别,所以辐射损耗可以忽略不计。

耦合损耗是由测试过程中引入的耦合器件带来的额外的光能量损耗。由于耦合测试时的耦合状态可以分为欠耦合,临界耦合,过耦合,而在临界耦合时腔体和器件达到有效耦合(耦合效率 95%),此时耦合损耗很小,可以忽略。

综合以上分析,辐射损耗、表面散射损耗、材料吸收损耗和耦合损耗都能影响氟化钙盘型腔的  $Q$  值,但是对于直径为毫米级别的回音壁模式的氟化钙盘型腔,在特定的测试波长下,材料损耗是一定的,辐射损耗和耦合损耗均可以忽略,表面散射损耗最终影响氟化钙盘型腔的  $Q$  值。因此可以得出结论:表面粗糙度是制约光学微腔品质因子的最重要因素,所以要得到高  $Q$  值的氟化钙盘型腔必须提高抛光质量。

## 2 $\text{CaF}_2$ 盘型腔的加工和测试

### 2.1 $\text{CaF}_2$ 盘型腔的加工

选择真空紫外波段的高纯度单晶氟化钙为底料,加工氟化钙盘型腔。由于氟化钙质地相对较软,内部存在残余的生长应力,具有非常高的热膨胀系数,机械性能方向性和对抛光剂的选择性,所以加工过程对温度,湿度和振动的影响都很敏感,要得到高

完整性的纳米级粗糙度的氟化钙晶体表面非常困难。氟化钙盘型腔的加工可以分为研磨和抛光两部分,加工过程的工艺流程如图 1 所示。

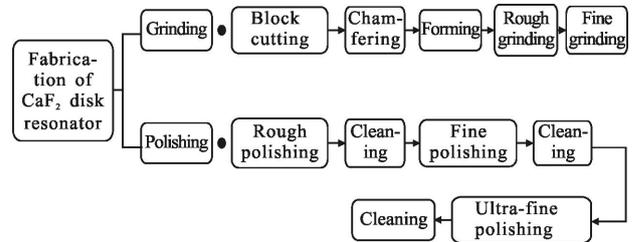


图 1  $\text{CaF}_2$  盘型腔加工流程图

Fig.1 Procedures of the fabrication of  $\text{CaF}_2$  disk resonator

首先对氟化钙块料做切割,切割完成后倒角成棱角比较圆滑的氟化钙块料。用合适的夹具将加工好的块料固定在研磨机上进行成型加工,初步加工成侧壁为类球形的盘型结构。研磨完成之后对基本成型的盘型腔进行抛光,抛光是晶体加工过程中影响加工效率和表面质量的最重要工序。由于氟化钙本身硬度低、质地脆的特性,所以单纯的化学抛光和机械抛光都不能达到超光滑表面的要求。因此笔者等探索采用化学抛光和机械抛光相结合的方法对氟化钙盘型腔进行抛光,利用抛光盘的机械作用和抛光液的化学作用共同进行抛光,既能避免单纯机械抛光造成的机械损伤又能解决单纯化学抛光表面平整度低等问题,最终使氟化钙块料达到较高的表面粗糙度。将工件固定在软硬适中的抛光盘,调整抛光机的压力、转速和抛光液流量等参数,以免材料在研磨抛光过程中出现爆裂、崩边现象。将金刚石、氧化铈、氧化铝和硅胶按一定比例均匀混合后再和专用的抛光液按照一定比例混合配置成抛光液。为了达到所需的抛光精度,需要分几次减小抛光粉粒子尺寸进行抛光,以提高氟化钙盘型腔的表面精度。对盘腔进行粗抛光时粒子直径约为  $50\text{ nm}$ ,精抛光粒子直径约为  $10\text{ nm}$ ,超精密抛光时粒子直径约为  $1\text{ nm}$ 。抛光完成以后材料表面粘附很多微小粒子,所以每次抛光后都要在洁净室环境中用有机溶剂进行清洗。将加工完成的氟化钙盘型腔用紫外胶固定在直径为  $3\text{ mm}$ ,长度为  $3\text{ cm}$  的铜棒上,完成后的  $\text{CaF}_2$  盘型腔如图 2 所示。

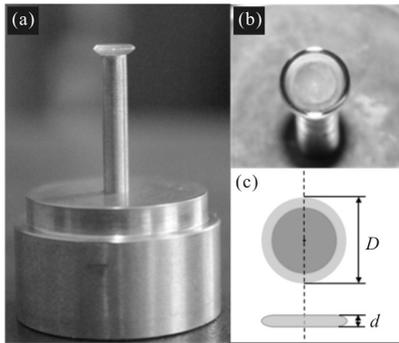


图 2 (a) CaF<sub>2</sub> 盘型腔;(b) CaF<sub>2</sub> 盘型腔俯视图;(c) CaF<sub>2</sub> 盘型腔尺寸图( $D=5\text{ mm}, d=1\text{ mm}$ )

Fig.2 (a) CaF<sub>2</sub> disk resonator;(b) Top view of CaF<sub>2</sub> disk resonator;(c) Dimension figure of CaF<sub>2</sub> disk resonator( $D=5\text{ mm}, d=1\text{ mm}$ )

在共聚焦显微镜 LEXT OLS4100 下观察盘腔的边缘, 由于该显微镜可以实现表面粗糙度的非接触式测量, 在不损伤样品表面形态的状态下快速成像, 生成高品质的影像, 实现测量样品表面粗糙度的准确测量。在 LEXT OLS4100 的 10 倍镜下得到的测试结果表明盘腔侧表面粗糙度为 53 nm, 因此该加工方法的加工精度可达到纳米级别, 达到了精密加工的加工精度, 如图 3 所示。

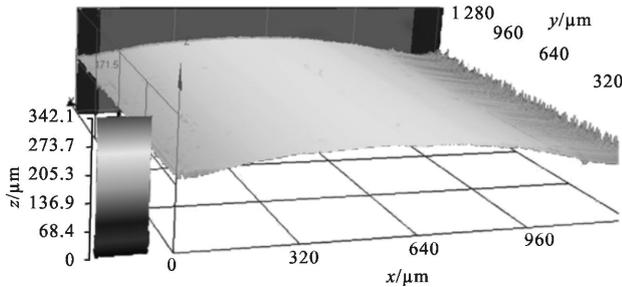


图 3 CaF<sub>2</sub> 盘型腔的粗糙度测试图

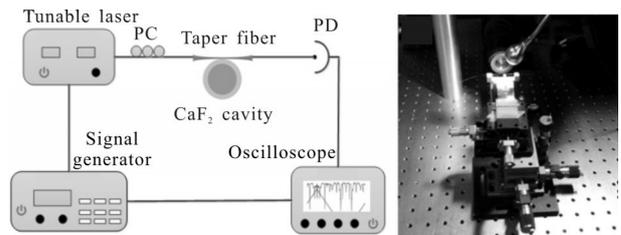
Fig.3 Roughness test chart of CaF<sub>2</sub> disk resonator

### 2.2 搭建耦合测试系统

光学谐振腔与锥形光纤耦合比较容易实现而且耦合效率可以达到 95% 以上, 所以选择光学谐振腔与锥形光纤近场耦合的方法进行耦合测试。采用熔融拉锥法<sup>[14]</sup>制备锥形光纤耦合器。将 Corning SMF-28 单模光纤, 用光纤剥线钳剥去涂覆层并用浸透无水酒精的棉球擦拭剥离部位, 然后将该光纤放置在光纤拉锥机 FBT-200 的光纤平台支架上, 光纤将会被真空吸附固定。设置光纤拉锥机的工作参数, 设置

完成后点燃氢气火焰, 光纤将会被均匀拉伸, 在火焰附近就会形成锥状, 得到锥区细而且均匀, 拉锥长度为 26 mm, 光纤锥区直径约 1.5 μm 的锥形光纤。

在室温下搭建如图 4 所示的耦合测试实验系统测试所加工的氟化钙盘型腔的谐振性能。激光光源选用 New Focus TLB-6300-LN 可调谐激光器(波长可调谐范围为 1 520~1 570 nm, 线宽为 300 kHz); 信号发生器选用 SRS Model DS345, 可产生最大 30 MHz 任意波形函数, 最小频率分辨率 1 μHz, 此处用信号发生器来实现对激光器输出频率的连续调制; 光电探测器为 New Focus Model 1811, 带宽为 125 MHz, 最大输入光功率为 7 mW, 此处光电探测器用来探测盘腔与锥形光纤的耦合输出信号; 示波器选用 Tektronix DP04104, 带宽 500 MHz, 此处用示波器来显示光电探测器的输出的透射谱; 将拉制好的锥形光纤固定在光纤架上, 然后将其两端分别与激光器的输出端和光电探测器输入端连接, 将 CaF<sub>2</sub> 盘腔固定在高精度三维调节架上。测试实验系统搭建完成后, 中心波长设置为 1 550 nm, 信号发生器提供调制电压为 1.5 V, 调制频率为 50 Hz 的三角波调制。通过红外 CCD 实时观察并手动调节高精度三维调节架来调节 CaF<sub>2</sub> 盘型腔和锥形光纤的相对位置, 观察示波器的谐振谱线。



(a) 系统框图

(b) 实验装置图

(a) System diagram

(b) Experimental installation

图 4 耦合测试系统

Fig.4 Coupling test system

### 2.3 实验结果分析

测试透射谱如图 5 所示。激光波长为 1 550 nm (对应中心频率为 193 THz) 通过数据分析, 利用公式计算盘腔 Q 值。由公式  $FSR=c/nL$ , 其中  $n$  为盘型腔的折射率,  $L$  为盘腔的周长, 可以得到当谐振波长为 1 550 nm 时对应的自由光谱范围为 13.4 GHz。将测试实验得到的谐振谱线进行洛伦兹拟合, 可以得到

盘型腔的 FWHM (Full Width at Half Maximum) 为 92 MHz。

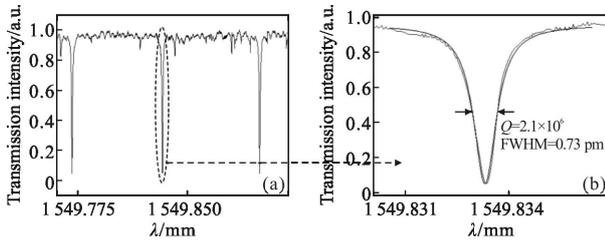


图 5 (a) CaF<sub>2</sub> 盘腔谐振谱线; (b) 谐振谱线洛伦兹拟合曲线

Fig.5 (a) Transmission spectrum of CaF<sub>2</sub> disk resonator;

(b) Lorentzian fits to the transmission spectrum

用公式  $Q=f_0/\Delta f$  计算所加工盘型腔的 Q 值,  $f_0$  为发生谐振时对应的谐振波长,  $\Delta f$  为谐振谱线的线宽。由透射谱可知,  $\Delta f=92$  MHz, 所以谐振腔的品质因子  $Q=2.1\times 10^6$ 。精细度为 15.1, 此时的谐振深度为 95%。谐振腔相邻两个谐振模式的间隔之前的波长差或频率差被称为自由频谱宽度 (Free Spectral Range, FSR), 谐振腔的自由频谱宽度越大谐振模式的单一性越好。自由频谱范围的计算公式如下:

$$FSR \approx \frac{\lambda^2}{n\pi D} \quad (5)$$

式中:  $D$  为光学微腔的直径, 所加工的 CaF<sub>2</sub> 盘腔在波长  $\lambda=1550$  nm 时的自由频谱范围为  $FSR=11$  pm。

谐振腔的精细度 (Fineness,  $F$ ) 表征了谐振腔耦合结构得到的谐振谱线的质量, 谐振谱线中杂乱且微弱的各种谐振模式会严重影响基于谐振腔的各种传感应用, 因此, 提高谐振腔的精细度是实现光学谐振腔应用的前提。精细度是由谐振腔的自由频谱宽度和谐振谱线的半高全宽 (Full Width Half Maximum, FWHM) 的比值决定的, 它的表达式为:

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad (6)$$

由谐振谱线曲线可以得到 CaF<sub>2</sub> 盘腔的半高全宽为  $FWHM=0.73$  pm, 计算得到 CaF<sub>2</sub> 盘腔的精细度为  $F=15.1$ 。

该 CaF<sub>2</sub> 盘腔具有超窄的谱线宽度可以用来制作滤波器; 具备高 Q 值可以作为光延迟器件; 同时具备大尺寸和高 Q 值, 可以作为谐振式光学陀螺的核心敏感元件; 该晶体腔可以做成直径几微米到几毫米的腔, 模式体积小, 易于集成, 机械制造更简便, 热稳定性更好。

### 3 结 论

随着对回音壁模式光学谐振腔的深入研究, 人们不断探索新的材料和新的结构, 来推进相关应用的发展。文中介绍了以超纯单晶 CaF<sub>2</sub> 制作回音壁模式盘型腔的加工方法和抛光方法, 并通过与锥形光纤的耦合测试实验得到了 CaF<sub>2</sub> 盘型腔的  $Q=2.1\times 10^6$ 。该实验结果表明可以通过对光学晶体进行研磨和光学抛光得到高性能、可集成、毫米级别的回音壁模式的光学谐振腔, 该光学谐振腔可以用在光学滤波、全光开光和低阈值非线性光学等方面。对 CaF<sub>2</sub> 盘型腔光学损耗机制理论分析表明: 通过提高腔体的抛光质量改善腔体的表面粗糙度可以提高盘型腔的 Q 值, 使得所加工的 CaF<sub>2</sub> 盘腔的 Q 值接近  $10^6$  的极限。所介绍的 CaF<sub>2</sub> 盘型腔的加工过程相比于传统的光学谐振腔的加工更加简洁, 结构更加稳定, 具有较高的品质因数。因此文中的研究对于晶体材料光学谐振腔的设计和加工具有一定的指导意义, 可以进一步推进晶体材料光学谐振腔在光学滤波, 线性与非线性光学, 高灵敏度生物传感器, 谐振式光学陀螺, 光电振荡器等方面的研究。

### 参 考 文 献:

- [1] Yilmaz Y Q, Demir A, Kurt A, et al. Optical Channel Dropping with a Silicon Microsphere [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17: 1662-1664.
- [2] Carmon T, Vahala K J. Visible continuous emission from a silica microphotonic device by third-harmonic generation [J]. *Nature*, 2007, 3(1): 430-435.
- [3] Yilmaz Y O, Demir A, Kurt A, et al. Optical channel dropping with a silicon microsphere [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17: 1662-1664.
- [4] Krioukov E, Klunder D J W, Driessen A, et al. Sensor based on an integrated optical microcavity [J]. *Opt Lett*, 2002, 27: 512-514.
- [5] Armani A M, Vahala K J. Heavy water detection using ultra-high-Q microcavities [J]. *Opt Lett*, 2006, 31: 1896-1898.
- [6] Armani A M, Kulkarni R P, Fraser S E, et al. Label-free, single-molecule detection with optical microcavities [J]. *Science*, 2008, 317: 783-787.
- [7] Spillane S M, Kippenberg T J, Vahala K J. Ultralow-

- threshold raman laser using a spherical dielectric microcavity [J]. *Nature*, 2002, 415(1): 621–623.
- [8] Ilchenko V S, Savchenkov A A, Byrd J, et al. Crystal quartz optical whispering-gallery resonators [J]. *Opt Lett*, 2008, 33: 1569–71.
- [9] Grudinin I S, Yu N, Maleki L. Generation of optical frequency combs with a CaF<sub>2</sub> resonator [J]. *Opt Lett*, 2009, 34: 878–80.
- [10] Tavernier H, Salzenstein P, Volyanskiy K, et al. Magnesium fluoride whispering gallery mode disk-resonators for microwave photonics applications[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 2010, 22: 1629–31.
- [11] Armani D K, Kippenberg T J, Spillane S M, et al. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip[J]. *Nature*, 2003, 421: 925–928.
- [12] Del’Haye P, Schlieier A, Arcizet O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. *Nature*, 2007, 450: 1214–1217.
- [13] Gorodetsky M L, Pryamikov A D, Ilchenko V S. Rayleigh scattering in high-Q microspheres [J]. *J Opt Soc Am B*, 2000, 17: 1051–1057.
- [14] Yan Y Z, Ji Z, Wang B H, et al. Evanescent wave excitation of microsphere high-Q model using tapered fiber [J]. *Chin J Laser*, 2010, 37(7): 1789–1793. (in Chinese)  
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.