

# 高 $Q$ 值光学微球腔的温度系数研究

商成龙<sup>1</sup> 唐 军<sup>1</sup> 皮海龙<sup>2</sup> 张 伟<sup>1</sup> 谢成峰<sup>1</sup> 张天恩<sup>1</sup> 雷龙海<sup>1</sup> 王明焕<sup>1</sup> 郭泽彬<sup>1</sup>  
张斌珍<sup>1</sup> 刘 俊<sup>1</sup> 薛晨阳<sup>1</sup> 张文栋<sup>1</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, 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051

<sup>2</sup>中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室, 北京 100190

**摘要** 光学微球谐振腔由于其具有超高的 $Q$ 值及极小的模式体积等优点, 在高灵敏度传感和光通信等方面得到了广泛的研究。测试了未封装和封装后微球腔谐振波长随温度的变化, 实验结果表明随温度增大, 谐振波长线性红移, 且线性度高。二者温度系数不同, 未封装时为 $25.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 封装后为 $4.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 主要因为紫外胶的负热光系数所致。理论分析了紫外胶的热光效应, 通过控制紫外胶厚度可以改变光在紫外胶中的比例, 从而调节温度系数。当光在紫外胶中比例为 $0.1135$ 时, 温度系数变为 $0$ , 可以抑制温度漂移, 实现了温度补偿; 该比例继续增大, 温度灵敏度提高。低温漂、高灵敏度、微型化拓宽了回音壁模式(WGM)传感器的应用潜力。

**关键词** 光学器件; 微球谐振腔; 回音壁模式; 温度系数; 热光系数

中图分类号 TN815; S951.4+1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0302005

## Temperature Coefficient of High- $Q$ Microsphere Cavity

Shang Chenglong<sup>1</sup> Tang Jun<sup>1</sup> Pi Hailong<sup>2</sup> Zhang Wei<sup>1</sup> Xie Chengfeng<sup>1</sup>  
Zhang Tian'en<sup>1</sup> Lei Longhai<sup>1</sup> Wang Minghuan<sup>1</sup> Guo Zebin<sup>1</sup> Zhang Binzhen<sup>1</sup>  
Liu Jun<sup>1</sup> Xue Chenyang<sup>1</sup> Zhang Wendong<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** Optical microsphere resonant cavity has been widely researched in the field of high sensitivity sensor and optical communication because of its high  $Q$  value and minimal model volume. Optical resonance wavelength shifts are measured with temperature changes for unpackaged and encapsulated microsphere. Linear dependence of red shift against temperature rise with high linearity is observed. The temperature coefficient is  $25.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  for unpackaged microsphere, whereas is  $4.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  for encapsulated one, which mostly results from ultraviolet (UV) glue's negative thermo-optic coefficient. The thermo-optic effect is analyzed based on UV glue. The fraction of light in UV glue can be changed by the thickness of glue, and then, temperature coefficient is also changed. The temperature coefficient decreases to zero when the fraction is  $0.1135$ , which means the depression of temperature drift as well as the realization of thermal compensation. Sensitivity of temperature is improved as fraction increases.

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91123036)、国家杰出青年科学基金(51225504)、国家自然科学基金(91123016)、国家973计划前期研究专项项目子课题(2012CB723404)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划

作者简介: 商成龙(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感、光学谐振腔等方面的研究。E-mail: bit\_long@icloud.com

导师简介: 刘 俊(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事微米纳米技术、惯性技术、仿生导航等方面的研究。

E-mail: liuj@nuc.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

Suppressed temperature drift, improved sensitivity, and miniaturization enables broad application potentials of whispering-gallery mode (WGM)-based sensors.

**Key words** optical devices; microsphere resonant cavity; whispering-gallery modes; temperature coefficient; thermo-optic coefficient

**OCIS codes** 140.4780; 130.3990; 130.6010; 140.6810

## 1 引 言

光学微谐振腔是指尺寸在几微米至几百微米之间的光学微型谐振器,形状有微球<sup>[1]</sup>、微管<sup>[2]</sup>、微柱<sup>[3]</sup>、微环以及光子晶体薄板微腔等<sup>[4-5]</sup>。光学微腔内的“回音壁模式”(WGM)由于其具有超高的品质因数和较小的模式体积被广泛应用在全光开关<sup>[6]</sup>、光滤波器<sup>[7]</sup>、超低阈值激光器<sup>[8]</sup>、光学陀螺仪<sup>[9]</sup>和纳米颗粒尺寸检测仪<sup>[10]</sup>等领域。

WGM模式的谐振频率主要由谐振腔的尺寸和折射率决定。谐振腔尺寸和折射率的微小变化就可导致明显的谐振频率变化。这个特征被广泛应用在基于WGM模式传感器,如生物传感器<sup>[11]</sup>。但是谐振腔材料属性很容易受到热膨胀的影响,而外界温度变化或激光能量吸收都会造成材料发生热膨胀。材料的热膨胀和热光效应分别导致谐振腔尺寸和折射率的变化,最终造成谐振频率变化<sup>[12]</sup>。

在谐振式光学陀螺中主要是通过检测谐振腔转动时两路的频差实现角速度测量<sup>[13]</sup>。但是外界温度的波动会影响着谐振式光学陀螺的检测精度,外界温度变化会导致谐振腔谐振频率漂移,从而导致两路频差变化,最终影响实测角速度。因此需要提出一种抑制谐振腔温度漂移的方案,减少温度对谐振腔的影响,从而保证谐振式光学陀螺的检测精度。

本文研究了光学微球腔谐振波长和温度的关系,实验结果表明该光学微球谐振腔具有很好的温度敏感性;通过紫外(UV)胶封装提高了微球腔耦合系统的稳健性,最后研究了封装后的光学微球腔谐振波长和温度的关系,结果表明通过封装其温度系数会发生变化。控制紫外胶的厚度,可以实现温度系数的调控。若降低温度系数,可以实现温度补偿,抑制温度漂移,从而减少外界温度波动对陀螺精度的影响;若增大温度系数,则会提高温度传感灵敏度。

## 2 实验研究

图1为实验系统装置图。实验中所使用光纤为美国康宁公司SMF-28单模光纤(SMF),其在1550 nm波段拥有最低的传输损耗。锥形光纤是由普通的单模光纤经过热拉伸工艺制作而成的,光学微球腔则是由简单的熔融法制备的<sup>[14]</sup>。实验采用的微球腔直径为600 μm,半峰全宽为13.8 MHz,  $Q$ 值为 $1.4 \times 10^7$ 。

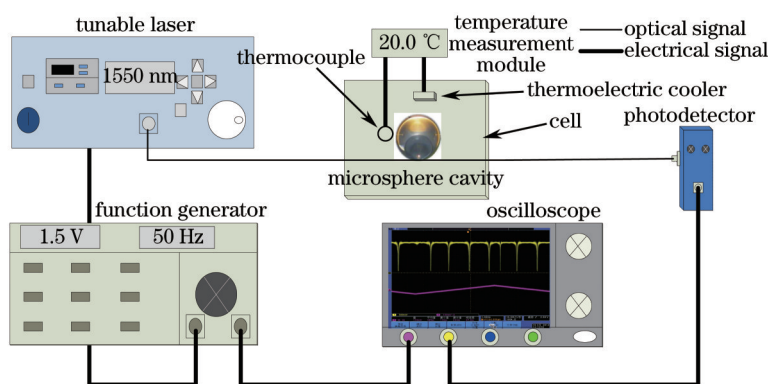


图1 实验系统示意图

Fig.1 Diagram of the experimental setup

激光光源是New Focus公司的Velocity 6328半导体可调谐激光器,其线宽为300 kHz,波段为1520~1570 nm,该光源用来激发微球腔的WGM模式。信号发生器产生频率为50 Hz,幅值为1.5 V的三角波对半导体激光器进行调制,从而实现激光器的精细扫描。输出信号通过光电探测器收集,把光信号转换为电信号,然后直接显示在数字示波器上。

微球腔置于温控壳体内部,热电偶距离微球腔 0.2 mm 测量球腔附近的温度变化。温控壳体内部的半导体制冷片(TEC)可以降低微球腔的温度,温控模块可以精确控制半导体制冷片。热电偶测得的温度可以实时显示,其精度为 0.01 °C。通过温控系统改变微球腔的温度,记录热电偶测得的温度和数字示波器上的谐振谱线。其中每个温度记录 5 次以避免误差。

### 3 结果与讨论

测试微球腔在空气中和温控壳体内 20 min 内某一特定 WGM 模式的动态漂移结果如图 2 所示,其中黑色柱状图为微球腔在空气中时其 WGM 模式的谐振波长变化,红色柱状图为微球腔在温控壳体内时其 WGM 模式的谐振波长变化。从图 2 可以看出,当微球腔在空气中时,其谐振波长发生了最大幅度为 5 μm 的波动,然而在温控壳体内时,波动幅度仅为 0.5 μm。

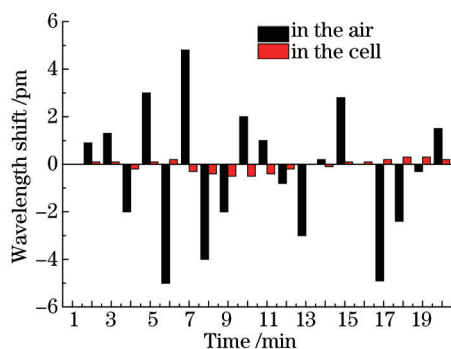


图2 微球腔在空气中和温控壳体内测得的谐振波长变化对比

Fig.2 Measured wavelength shifts of a WGM resonance of the microsphere placed in free air and in the working cell at 20 °C, respectively

为保证微球腔、热电偶和壳体内空气温度的一致性,热电偶位于微球腔附近 0.2 mm 的位置,并且缓慢改变壳体内的温度。温控系统使壳体内温度达到设定温度大约需要 5 min,而 600 μm 微球的热响应时间为 6 s<sup>[15]</sup>,故可以认为微球腔和热电偶的温度是相同的,为研究微球腔的温度系数提供了可能。

通过温控系统精确控制微球腔温度,示波器记录各个温度对应的透射谱线。选取各个温度下都存在的某 WGM 谐振谷随谐振波长的变化,研究了谐振波长变化和温度变化的关系,即温度系数。图 3 为微球腔在未进行封装时 10 个不同温度下的透射谱线,为了便于跟踪某 WGM 谐振波长的变化,对 Y 方向施加了偏移。显而易见,随着温度的降低,谐振谷都向短波长方向移动,即蓝移。选取 160 pm 范围内各个温度都存在的 WGM 模式 a,在 18.85 °C~14.0 °C 内,a 谐振谷发生了 105 pm 的蓝移。而各谐振谷之间的间隔几乎不随温度的变化而变化。在 13.06 °C 谱线中,a 谐振谷已经“超越”了 160 pm 的监测范围,选择跟踪 b 谐振谷,用 b 谐振谷的波长变化代换 a 谐振谷的波长变化。通过数据处理得到未封装微球腔谐振波长变化随温度变化的关系,如图 4 所示。图中不同颜色的圆点代表了两个不同的 WGM 谐振谷 a、b,其都是连续温度变化造成的谐振谷

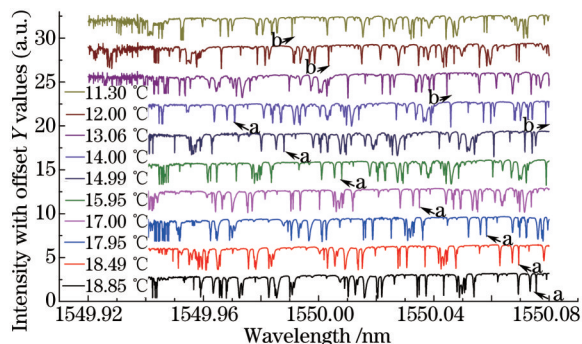


图3 未封装微球腔不同温度下的透射谱线

Fig.3 Transmission spectra at different temperatures for unpackaged microsphere

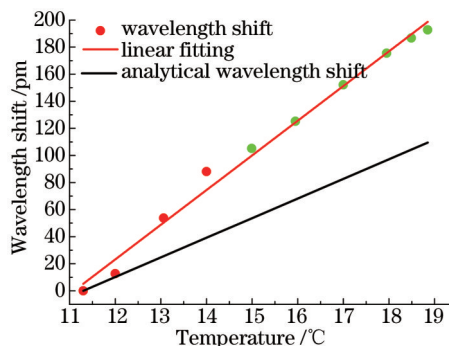


图4 未封装微球腔谐振波长变化和温度的关系

Fig.4 Linear fitting curves of the measured data and analytical data of WGM resonance wavelength shifts against temperature variation for the unpackaged microsphere

位置的变化。对其进行线性拟合,线性度高达0.99,斜率为25.6 pm/℃。

谐振波长的变化主要是由于谐振腔材料的热膨胀和热光效应导致的。其满足<sup>[16]</sup>:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \left( \frac{1}{D} \times \frac{dD}{dT} + \frac{1}{n} \times \frac{dn}{dT} \right) \lambda_0 = (\alpha + \beta) \lambda_0 = k \lambda_0, \quad (1)$$

式中  $\alpha = \frac{1}{D} \times \frac{dD}{dT}$  为热膨胀系数,  $\beta = \frac{1}{n} \times \frac{dn}{dT}$  为热光系数,  $\lambda_0$  为初始温度时对应的谐振谷波长, 系数  $k = \alpha + \beta$ 。

实验中所使用的微球腔是用热熔法烧制成的,其材料为 Corning SMF-28 单模光纤,但是目前该材料的热膨胀系数和热光系数未知,为了便于理论分析,选择材料属性相近的 Corning 7980 silica 代替单模光纤,该材料在 1500 nm、300 K 时其热膨胀系数  $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} (\text{℃})^{-1}$ , 热光系数  $\beta = 8.57 \times 10^{-6} (\text{℃})^{-1}$ 。经过计算得  $\frac{d\lambda}{dT} = 14.5 \text{ pm/℃}$ 。图 4 中黑色实线即为理论计算的谐振位置随温度变化曲线。实验结果和理论计算的温度系数并不相同,其中实验结果为 25.6 pm/℃,约为理论计算值的 1.8 倍。实验和理论结果不同的原因之一主要是由于使用了其他材料的热光系数和热膨胀系数进行计算所致,原因之二是热光系数会随着波段和温度发生变化。因此,微球腔材料的热光系数是急需测得的。对照图 1 可以看出,谐振波长变化 0.1 pm 对应温度变化为 0.004 ℃。在空气中 5 pm 的 WGM 模式的波动就会造成 0.2 ℃ 的误差。因此,我们的温控系统杜绝了外界温度波动对微球腔的影响,明显地提高了温度稳定性。

外界环境(如空气流动、杂质分子、温度变化)严重影响着微球腔的各项性能,如  $Q$  值等<sup>[17-18]</sup>。中北大学的 Yan 等<sup>[19]</sup>提出了全封装的方案,从而提高了微球腔系统稳健性,减少了外界环境的干扰。按照文献[19]的方法,选择低折射率紫外胶 DF-0016 进行了封装,并研究了谐振位置随温度的变化。图 5 为封装后不同温度下的透射谱,为了便于对比谐振位置的变化,在  $Y$  方向添加了偏移。从图 5 可以明显发现封装后谱线发生了如下变化:半峰全宽变大, $Q$  值降低,谐振模式变得更规则。但是这些变化都不影响对温度系数的研究。此次选择了 3 个不同 WGM 谐振模式进行了跟踪,分别统计了 3 个谐振谷在不同温度下的谐振波长,如图 6 所示。其中黑色拟合曲线为 A 谐振谷,红色拟合曲线为 B 谐振谷,蓝色拟合曲线为 C 谐振谷。显而易见,随着温度的增加,3 个谐振谷的波长都发生了几乎等量的红移。其中图 6 中实线为线性拟合曲线,线性度高达 0.97,3 条实线几乎平行,斜率均为 4.4 pm/℃。

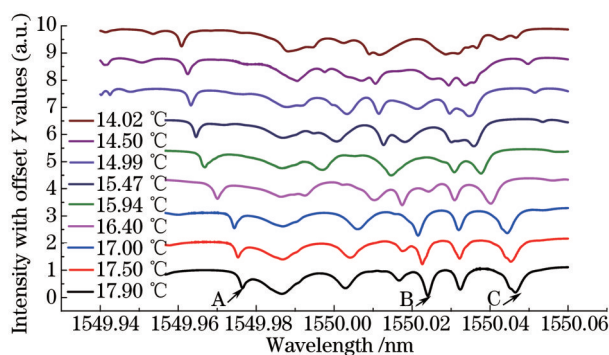


图 5 封装后腔不同温度下的透射谱线

Fig.5 Transmission spectra at different temperatures for encapsulated microsphere

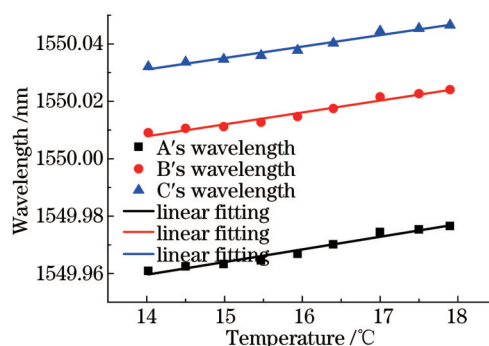


图 6 封装后微球腔谐振波长变化和温度的关系

Fig.6 Measured data and linear fitting curves of WGM resonance wavelength against temperature variation for the encapsulated microsphere with three different WGMs

与封装前的实验结果对比,封装后的温度系数明显降低。此时谐振波长变化主要是由谐振腔和紫外胶的热膨胀、热光效应造成的。此时有效折射率可表示为<sup>[20]</sup>

$$n_{\text{eff}} = \eta_1 n_1 + \eta_2 n_2. \quad (2)$$

由于热膨胀系数远远小于热光系数,忽略热膨胀系数的影响,则(1)式变为

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{1}{n} \times \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \times \lambda_0, \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式可得

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{1}{n} \times \left( \eta_1 \times \frac{dn_1}{dT} + \eta_2 \times \frac{dn_2}{dT} \right) \times \lambda_0, \quad (4)$$

式中  $\frac{dn_1}{dT}$ 、 $\frac{dn_2}{dT}$  分别为微球腔、紫外胶的热光系数； $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别为光在微球腔、紫外胶中的分布比，并且  $\eta_1 + \eta_2 = 1$ 。

由于选用的紫外胶热光系数未知，采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)进行分析，PDMS的热光系数为  $-10^{-4} (\text{C})^{-1}$ 。图7为温度系数和分布比  $\eta_2$  的关系，由图6中实验结果可计算得到的温度系数  $\eta_2 = 0.077$ ，此分布比对应了特定的紫外胶厚度。调节分布比  $\eta_2$  可以改变温度系数，当  $\eta_2 = 0.1135$  时，温度系数为0，即减少了微球腔对外界温度的敏感，从而抑制了温度漂移，达到了温度补偿的效果。另外随着分布比  $\eta_2$  的继续增大，微球腔的温度系数变为负数，但是其绝对值明显地增大，因而可以提高微球腔的温度灵敏度<sup>[21]</sup>。而分布比  $\eta_2$  可以通过改变封装紫外胶的厚度来改变，厚度变化会导致耦合间距的变化，从而造成耦合系数变化，但这不影响微球腔的谐振波长<sup>[22]</sup>，不会影响检测的波长变化量，仍然能够进行温度测量。当封装紫外胶厚度固定时，分布比  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  可以通过仿真分析得出<sup>[23]</sup>，如文献[23]中当PDMS厚度为  $0.55 \mu\text{m}$  时， $\eta_2 = 0.106$ 。若  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  已经确定，则根据(4)式可以进行紫外胶热光系数的测试<sup>[24]</sup>。

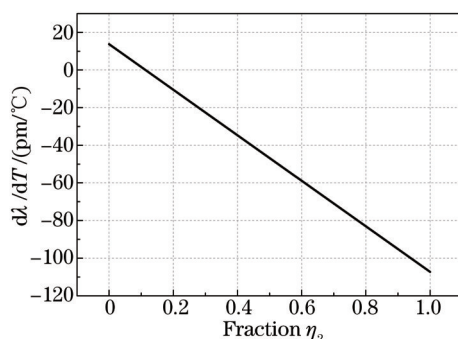


图7 温度系数和光在紫外胶中比例的关系

Fig.7 Temperature coefficient versus fraction of light in polymer

## 4 结 论

研制了微球腔温控系统，可以在  $9 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内精确控制壳体内温度，避免了外界温度变化对微球腔的影响。实验上通过改变微球腔的温度，记录各温度时刻的透射谱线。在未封装前，谐振波长随温度增大发生红移，温度系数为  $25.6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ；封装后，谐振波长仍然随温度增大红移，但是温度系数明显变小，为  $4.4 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ，这主要是由于紫外胶的负热光系数造成的。通过调节紫外胶厚度，可以改变分布比  $\eta_2$ ，从而实现温度系数的调控。当  $\eta_2 = 0.1135$  时，温度系数变为0，从而抑制了温度漂移，该方法可作为谐振式光学陀螺中温漂抑制的可行方案，减少外界温度波动对陀螺精度的影响。 $\eta_2$  继续增大，温度系数就会变成负值，但其绝对值增加，从而提高了温度的灵敏度。这为聚合物热光系数的测量提供了一种思路，并拓宽了微球腔在WGM传感器的应用。

## 参 考 文 献

- 1 Sun Xianming, Liu Wanqiang, Wang Haihua, *et al.*. Study on resonant models in two-layers micro-sphere cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0529001.  
孙贤明, 刘万强, 王海华, 等. 双层微球腔谐振模式研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0529001.
- 2 Jiang Junfeng, Zhang Jing, Liu Tiegen, *et al.*. Effect of radial modes of whispering gallery mode in microtube[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1228003.  
江俊峰, 张 晶, 刘铁根, 等. 微管回音壁谐振模径向模式的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1228003.
- 3 Yang Rui, Yu Wenhua, Bao Yang, *et al.*. Whispering-gallery modes based on evanescent field in cylindrical micro-cavity[J]. Acta

- Physica Sinica, 2008, 57(10): 6412–6418.
- 杨睿, 於文华, 鲍洋, 等. 消逝场耦合圆柱形微腔中回音壁模式结构的实验研究[J]. 物理学报, 2008, 57(10): 6412–6418.
- 4 Lü Sheqin, Li Chaoran, Wu Yuehao, *et al.*. Research progress of micro/nano-optical device based on chalcogenide glass[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050001.
- 吕社钦, 李超然, 吴越豪, 等. 硫系玻璃微纳光器件研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050001.
- 5 Jiang Bin, Liu Anjin, Chen Wei, *et al.*. The characteristic of the stereo-coupling high- $Q$  photonic crystal slab cavity[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(12): 8548–8553.
- 江斌, 刘安金, 陈微, 等. 立体耦合光子晶体薄板微腔的高 $Q$ 值特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8548–8553.
- 6 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.
- 刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 7 Monifi F, Ozdemir S. Tunable add-drop filter using an active whispering gallery mode[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(18): 181103.
- 8 He L, Ozdemir S K, Yang L. Whispering gallery microcavity lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(1): 60–82.
- 9 Vahala K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424(6950): 839–846.
- 10 Zhu J, Ozdemir S K, Xiao Y F, *et al.*. On-chip single nanoparticle detection and sizing by mode splitting in an ultrahigh- $Q$  microresonator[J]. Nature Photonics, 2010, 4(1): 46–49.
- 11 H Ahmadi, H Heidarzadeh, A Taghipour, *et al.*. Evaluation of single virus detection through optical biosensor based on microsphere resonator[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(14): 3599–3602.
- 12 Wang Pengfei, Senthil Murugan, Ganapathy Lee T, *et al.*. High- $Q$  bismuth-silicate nonlinear glass microsphere resonators[J]. Photonics Journal IEEE, 2012, 4(3): 1013–1020.
- 13 Feng Xiang, Ma Yingjian, Yu Huaiyong, *et al.*. Investigation on the modulation of the optimized sensitivity for the resonator optic gyroscope[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1064–1067.
- 冯翔, 马迎建, 于怀勇, 等. 谐振式微光学陀螺最佳灵敏度调节的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 1064–1067.
- 14 Yan Yingzhan, Yan Shubin, Ji Zhe, *et al.*. Humidity and particulate testing of a high- $Q$  microcavity packaging comprising a UV-curable polymer and tapered fiber coupler[J]. Opt Commun, 2012, 285(8): 2189–2194.
- 15 Carmon Tal, Yang Lan, Vahala Kerry. Dynamical thermal behavior and thermal self-stability of microcavities[J]. Opt Express, 2004, 12(20): 4742–4750.
- 16 Fujiwara M, Noda T, Tanaka A, *et al.*. Coupling of ultrathin tapered fibers with high- $Q$  microsphere resonators at cryogenic temperatures and observation of phase-shift transition from undercoupling to overcoupling[J]. Opt Express, 2012, 20(17): 19545–19553.
- 17 Wang Li, Yan Yingzhan, Zhang Yuguang, *et al.*. Effect of vibration noise on the high- $Q$  optical microcavity coupling system and its suppression methods[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2011, 32(9): 950–955.
- 王丽, 严英占, 张宇光, 等. 振动噪声对高 $Q$ 光学微腔耦合系统的影响及抑制方法[J]. 发光学报, 2011, 32(9): 950–955.
- 18 Zhang Yuguang, Li Peng, Wang Li, *et al.*. Effect of the environment on microsphere  $Q$ -factor[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(5): 803–806.
- 张宇光, 李鹏, 王丽, 等. 外界环境对微球腔品质因数的影响[J]. 光子学报, 2011, 40(5): 803–806.
- 19 Yan Y Z, Zou C L, Yan S B, *et al.*. Robust spot-packaged microsphere-taper coupling structure for in-line optical sensors[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(22): 1736–1738.
- 20 Hong Seok Choi, Andrea M Armani. Thermal nonlinear effects in hybrid optical microresonators[J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(22): 223306.
- 21 Li Beibei, Wang Qingyan, Xiao Yunfeng, *et al.*. On chip, high-sensitivity thermal sensor based on high- $Q$  polydimethylsiloxane-coated microresonator[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(25): 251109.
- 22 Li Minghui, Ma Kezhen, Luo Liang, *et al.*. Influence of coupling gap on the performance of silicon-on-insulator microring resonator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0610001.
- 李明慧, 马可贞, 骆亮, 等. 耦合间距对绝缘体上硅微环谐振腔的性能影响[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0610001.
- 23 He L, Xiao Y F, Dong C, *et al.*. Compensation of thermal refraction effect in high- $Q$  toroidal microresonator by polydimethylsiloxane coating[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(20): 201102.
- 24 Rose Brian A, Maker Ashley J, Armani Andrea M. Characterization of thermo-optic coefficient and material loss of high refractive index silica sol-gel films in the visible and near-IR[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(5): 671–681.