

引用格式: LIN Xiao-jun, LIN De-quan, LIAO Ting-di, *et al.* Thermo-optic Effect of Optical Microsphere Cavity for Temperature Sensor Research[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3):0314004

林晓鋆, 林德泉, 廖廷笛, 等. 光学微球腔的热光效应用于温度传感器研究[J]. 光子学报, 2020, 49(3):0314004

# 光学微球腔的热光效应用于温度传感器研究

林晓鋆<sup>1</sup>, 林德泉<sup>1</sup>, 廖廷笛<sup>2</sup>, 段亚凡<sup>2</sup>, 黄衍堂<sup>1,2</sup>

(1 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108)

(2 泉州师范学院 光子技术研究中心, 福建 泉州 362000)

**摘 要:**为研究光学微球腔的热光效应,采用 1 550 nm 波段可调谐激光器和宽带光源两种泵浦源,分别测量了二氧化硅、碲酸盐玻璃微球及其掺杂了稀土离子的微球在激励光功率、环境温度变化时其谐振峰波长的变化量,得到了二氧化硅微球激励功率灵敏度为 32.4 pm/mW,温度灵敏度为 13.4 pm/°C;铥离子的掺杂使激励功率灵敏度达到 48.7 pm/mW,温度灵敏度达到 15.2 pm/°C.相应的碲酸盐微球激励功率灵敏度为 71.1 pm/mW,温度灵敏度为 0.019 1 nm/°C,比光纤光栅温度传感器的灵敏度 10 pm/°C 大了将近 1 倍,若掺杂了稀土离子,则高 1.1 倍.本文研究对微腔在温度传感器方面的应用具有参考意义.

**关键词:**热光效应;温度传感;微腔;稀土掺杂;回音壁模式

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204903.0314004

## Thermo-optic Effect of Optical Microsphere Cavity for Temperature Sensor Research

LIN Xiao-jun<sup>1</sup>, LIN De-quan<sup>1</sup>, LIAO Ting-di<sup>2</sup>, DUAN Ya-fan<sup>2</sup>, HUANG Yan-tang<sup>1,2</sup>

(1 College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

(2 Research Center for Photonic Technology, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China)

**Abstract:** In order to study the thermo-optic effect of the optical microsphere cavity, two kinds of pump sources, 1 550 nm band tunable laser and broadband light source, were used to measure the change of the resonance peak wavelength of silica, tellurite glass microsphere and rare earth ion doped microsphere when the excitation light power and environment temperature change. The excitation power sensitivity of the silica microspheres was 32.4 pm/mW and the temperature sensitivity was 13.4 pm/°C. For the thulium ions doped silica microsphere, the sensitivity of excitation power was 48.7 pm/mw and the sensitivity of the environment temperature was 15.2 pm/°C. The excitation power sensitivity of the tellurite microsphere was 71.1 pm/mw, and the temperature sensitivity was 0.019 1 nm/°C, which was nearly one times higher than that of the FBG temperature sensor (10 pm/°C). If the rare earth ions were doped, the sensitivity was 1.1 times higher. The results have reference significance for the microcavity applications of the temperature sensor.

**Key words:** Thermo-optic effect; Temperature sensing; Microcavity; Rare earth ions doping; Whispering gallery modes

**OCIS Codes:** 140.6810; 280.6780; 140.3945; 160.5690

基金项目: 国家自然科学基金(No.61405059)

第一作者: 林晓鋆(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为回廊微球腔中的热效应. Email: 925513711@qq.com

导师(通讯作者): 黄衍堂(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感器及其应用, 光学微腔原理及其应用. Email: huangyantang@fzu.edu.cn

收稿日期: 2019-11-18; 录用日期: 2020-02-03

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

光学介质微球腔具有很高的品质因子( $\sim 10^9$ )<sup>[1]</sup>,近年来引起广泛的兴趣.从物理学基础到应用研究,光学介质微球腔的应用涉及腔量子电动力学<sup>[2]</sup>、非线性光学、参量振荡<sup>[3]</sup>、低阈值激光器<sup>[4]</sup>和光子生物传感<sup>[5]</sup>等多个领域.通过锥光纤将泵浦光低损耗地耦合入微球,其连续的全内反射将光子约束在很小的空间中( $\sim 100\lambda^3$ ),形成稳定谐振模式的光场分布,称为光学回音壁模(Whispering Gallery Mode, WGM).微腔可以用不同材料制备,有二氧化硅、铌酸锂晶体、碲酸盐玻璃、硫化物玻璃和氟化物玻璃等;其结构也有不同种类,有微球腔、微盘腔、微环腔,微瓶腔以及微芯环腔等.

光学微球腔超高的品质因子和极小的模式体积,使得微腔 WGM 的能量密度很高,微腔受非线性效应的影响非常明显.由于微球腔材料的热光效应和热胀冷缩效应,激励功率和外界环境温度的改变都会使微腔的温度变化,并分别导致折射率改变和球腔半径变化,进一步的改变其谐振波长.光学微腔用于温度传感器主要是依据其谐振波长随温度而改变.光学微腔的重要特征参数是品质因子(Q 值),高 Q 值表明谐振波长线宽很精细,这样谐振峰值波长的偏移对环境变化非常敏感,包括温度、振动等, Q 值高分辨率会更高.通过检测谐振波长的改变可以感知外界物理量变化.用于温度传感器的主要有法布里-珀罗腔(F-P)、WGM 光学微腔.通常 WGM 微腔的 Q 值在  $10^6$  以上,比 F-P 腔高约 2 个数量级,有潜在的更高灵敏度,说明 WGM 微腔可应用于制作敏感的温度传感器.

利用 WGM 微腔作为温度传感器是当前研究热点之一,热光系数和热膨胀系数较大的材料被用于微腔温度传感.2011 年熊继军课题组将紫外固化胶涂覆在 WGM 微腔实现了灵敏度为  $13.37 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  的温度传感<sup>[6]</sup>,2010 年北京大学人工微结构和介观物理国家重点实验室的龚旗煌、肖云峰课题组通过在二氧化硅环形微谐振器的表面上涂覆一层聚二甲基硅氧烷 PDMS<sup>[7]</sup>,测得的灵敏度可达到  $0.151 \text{ nm}/\text{K}$ ,2016 年热膨胀系数较大的丝蛋白微环腔<sup>[8]</sup>的灵敏度为  $-1.17 \text{ nm}/\text{K}$ .

本文研究了光学微球腔在温度传感器中的应用,分别探讨了可调谐激光器和宽带光源两种激励光源,测量微腔谐振波长随温度与输入功率的变化.研究了不同材料的光学微球腔的谐振波长的偏移与输入功率及环境温度的依赖关系,为探索不同材料微腔基质的稳定性及微腔温度传感器材料的选取提供参考.

## 1 理论

### 1.1 微球腔的形貌特征谱公式

微球的形貌共振特征谱解释为:通过锥光纤等耦合器耦合入微球内表面的光受到全内反射的限制在微腔内传播,当整数个光波长等于微球圆周长度时,就会发生共振将光耦合入微球.形貌共振谱用径向模式数  $n$ ,角向模式数  $l$  和  $m$  以及 TE 或 TM 极化描述,其中径向模式数较小且角向模式数较大的谐振就是所谓的 WGM. WGM 微腔的谐振频率可以描述为<sup>[9-10]</sup>

$$f_{nlm}^i = \delta \left[ l + 1/2 - A_n \left( \frac{l+1/2}{2} \right)^{1/3} - \Delta^i + (l - |m|) \frac{R_c - R_a}{R_s} \right] \quad (1)$$

式中,  $i$  表示 TE 或 TM 模式;  $\delta = c/2\pi R_s N_s$  为自由光谱范围(Free Spectrum Range, FSR);  $A_n$  是 Airy 函数  $A_i(A_n) = 0$  的第  $n$  个零点;  $N_s$  为微球的折射率,  $R_s$  为微球的半径( $R_c$ , 赤道;  $R_a$ , 轴向);  $\Delta^i \cong \frac{\sqrt{q^2 - 1}}{q}$  是 TM 和 TE 频谱之间的频移,其中  $q = N_s/N_0$ ,  $N_0$  为空气的折射率.在微球形成时,会产生少量的变形偏心,因此  $R_c$  和  $R_a$  通常相差约 1%. 从式(1)可以看出, FSR( $\delta$ )和频移( $\Delta^i$ )受  $N_s$ ,  $R_s$  和  $q$  影响.由式(1)可知,当环境温度和泵浦功率的变化,由于热光效应将导致  $N_s$  和  $R_s$  发生变化,球腔的形貌共振谱也将改变.

### 1.2 介质微球的热光效应

当泵浦光耦合进微球腔,微腔中的部分光功率被模式体积内的介质吸收并转化成热量,使得模式体积内的介质温度升高和体积改变,由热光效应导致的微腔折射率变化( $\Delta n = dn/dT \times \Delta T$ )和热膨胀效应引起的微腔直径变化( $\Delta D = dD/dT \times \Delta T$ )共同作用使微腔的谐振峰波长移动,因此谐振波长  $\lambda_r$  与温度变化之间的关系<sup>[11]</sup>为

$$\lambda_r(\Delta T) \cong \lambda_0 \left[ 1 + \left( \frac{dD}{dT}/D + \frac{dn}{dT}/n \right) \Delta T \right] = \lambda_0 [1 + (\alpha + \beta) \Delta T] = \lambda_0 (1 + k \Delta T) \quad (2)$$

式中,  $\lambda_0$  是冷腔谐振波长,  $\alpha = 1/D \times dD/dT$  为热膨胀系数,  $\beta = 1/n \times dn/dT$  为热光系数, 系数  $k = \alpha + \beta$ ,  $\Delta T$  是模式体积内介质与周围环境之间的温度差. 由式(2)可得谐振波长的变化与环境温度的变化之间的关系为

$$\Delta \lambda = \lambda_0 k \Delta T_s \quad (3)$$

式中,  $\Delta T_s$  是环境温度的变化. 利用高  $Q$  微球谐振波长随温度的变化, 可以实现高灵敏度的温度传感<sup>[9]</sup>.

进一步的深入分析微球 WGM 模式体积内及微球其余部分材料受激励光热效应的影响, 与流入微腔模式体积内的热量与输入泵浦光功率( $P$ )、耦合效率( $\eta$ )、材料吸收损耗、谐振峰的热移动有关. 因此流入微腔模式体积内的热流表示为<sup>[12]</sup>

$$\dot{q}_{in} = P \eta \frac{Q}{Q_{abs}} \frac{1}{\left( \frac{\lambda_p - \lambda_r}{\Delta \lambda / 2} \right)^2 + 1} = P_h \frac{1}{\left( \frac{\lambda_p - \lambda_r}{\Delta \lambda / 2} \right)^2 + 1} \quad (4)$$

式中,  $\dot{q}_{in}$  表示热流,  $\Delta \lambda$  是谐振线宽,  $\lambda_p$  是泵浦光波长,  $\lambda_r$  是谐振波长,  $P_h = P \eta \frac{Q}{Q_{abs}}$  定义为实际加热腔的功率. 根据能量守恒定律, 微腔模式体积内的净热量为

$$C_{P_1} \Delta \dot{T}_1 = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} = P_h \frac{1}{\left( \frac{\lambda_p - \lambda_r}{\Delta \lambda / 2} \right)^2 + 1} - K_1 \Delta T_1 \quad (5)$$

而微腔模式体积外的剩余腔体净热量表示为

$$C_{P_2} \Delta \dot{T}_2 = K_1 \Delta T_1 - K_2 \Delta T_2 \quad (6)$$

式中,  $C_{P_1}$  为模式体积的热容,  $C_{P_1} = C \rho V_{mode}$  ( $C$  为材料的比热容,  $\rho$  为材料的密度,  $V_{mode}$  为 WGM 模式体积);  $C_{P_2}$  是整个腔体结构的热容,  $C_{P_2} = C \rho V_{sphere}$ ;  $K_1$  是模式体积与腔体其余部分之间的热导率,  $K_2$  是腔体与周围环境之间的热导率;  $\Delta T_1$  是模式体积与腔体其余部分之间的温差, 而  $\Delta T_2$  是腔体与周围环境之间的温差. 通过联立上述方程组求解, 可以得到微腔的温度随失谐量、耦合效率、 $Q$  值、泵浦功率、谐振扫描速率的变化关系.

### 1.3 锥光纤与微球腔间的耦合效率

锥光纤与微球腔的耦合效率与二者传播常数之间的匹配程度有关. 微球腔的传播常数为:  $\beta_s = kl/x_n^{(l)}$ ,  $k$  为自由空间波矢, 与波长有关 ( $k = 2\pi/\lambda$ );  $l$  为轨道量子数, 当  $n \leq 2$  时,  $l = 2\pi r n_s / \lambda$ ,  $n_s$  为介质微球的折射率,  $r$  为微球半径;  $x_n^{(l)}$  是与模式数相关的尺寸参数. 锥光纤的传播常数为:  $\beta_t^2 = k^2 n_t^2 - 2.405^2 / \rho^2$ ,  $n_t$  是介质锥光纤的折射率;  $\rho$  是锥腰半径. 微球腔的传播常数与锥光纤的传播常数的匹配值越高, 则耦合系数越高, 耦合效率越好, 因此, 波长、介质微球和介质锥光纤的折射率、微球半径和锥腰半径等都会影响耦合效率, 从而影响灵敏度. 2011 年闰树斌课题组实验测试了不同微球腔直径的  $Q$  值<sup>[13]</sup>, 并给出了拟合公式, 同样表明微球腔的  $Q$  值与微球腔直径  $D$  成正比, 但  $Q$  值并不会随着直径的增大而一直增大, 当直径过大时, 微腔增大的损耗也会阻止  $Q$  值的增大.

由文献[14]可知, 锥光纤到微球的耦合系数可以表示为:  $\kappa = \kappa_0 e^{-\gamma_l d}$ , 其中  $d$  为耦合间距,  $\kappa_0$  为  $d = 0$  时的耦合参数,  $\gamma_l$  为锥光纤外电场的衰减系数, 与锥腰半径相关, 同理, 微球到锥光纤的耦合系数  $\kappa = \kappa_0 e^{-\gamma_s d}$ ,  $\gamma_s$  为微球外电场的衰减系数, 与微球半径相关, 由此可得, 耦合间距也会影响耦合效率. 2017 年, 杨超麟对耦合间距对 WGM 透射谱的影响进行了仿真<sup>[15]</sup>, 发现在临界耦合时, 增大耦合间距会进入欠耦合状态, 锥形光纤和微球腔倏逝场的重叠区域越来越少, 会使耦合效率降低, 而减小小耦合间距将进入过耦合状态, 耦合效率很高, 但会导致谐振线展宽和谐振峰的偏移. 同样地, 微球腔耦合的位置也会影响耦合效率, 赤道位置可以更高效地激发出 WGM, 耦合效率相对而言更高. 耦合效率越高,  $Q$  值越高, 微腔内的能量密度越大, 因此热效应对谐振波长的影响越大, 灵敏度越高.

## 2 实验装置

### 2.1 实验装置

测量微球腔谐振波长的泵浦源采用可调谐激光器 (Tunable Laser Source, TLS, 型号: photonics

3642HE15)和宽带光源(型号:AS3213-BP2).采用 1 550 nm TLS 来测量微球腔的谐振波长的实验装置图如图 1 所示.通过锥形光纤(Tapered Optical Fiber, TOF)将光耦合进、出微球腔.使用三维微手动控制平台将微球腔精确地相切耦合到 TOF,并通过 CCD 显微镜在电脑上观察耦合过程.经过微球腔输出的光分成两路,一路进入光电探测器(Photodetector,PD,型号: C6386-01),光电探测器与示波器(Oscilloscope,OSC,型号: UTD8304B)相连,以监视输出功率;另一路进入光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer,OSA,型号: YOKOGAWA AQ6370)以测量谐振波长.使用不同比例的分光器(Optical Splitter,OS)以防进入探测器的功率过大.通过氢氧火焰拉锥法获得了损耗为 0.1~0.5 dB,锥腰直径约为 1~2  $\mu\text{m}$  的 TOF<sup>[16]</sup>,通过熔接机的电极多次放电熔融锥形光纤的尖端来获得不同直径的微球腔<sup>[17]</sup>.使用 1 550 nm 波段的 TLS 来激发二氧化硅微球腔中的回音壁模式,使用来自函数发生器(Function Generator,FG,型号:MOTTECH FG-506)的三角波驱动 TLS 的压电换能器(Piezoelectric Transducer,PZT),以在谐振波长附近进行小范围的扫描.

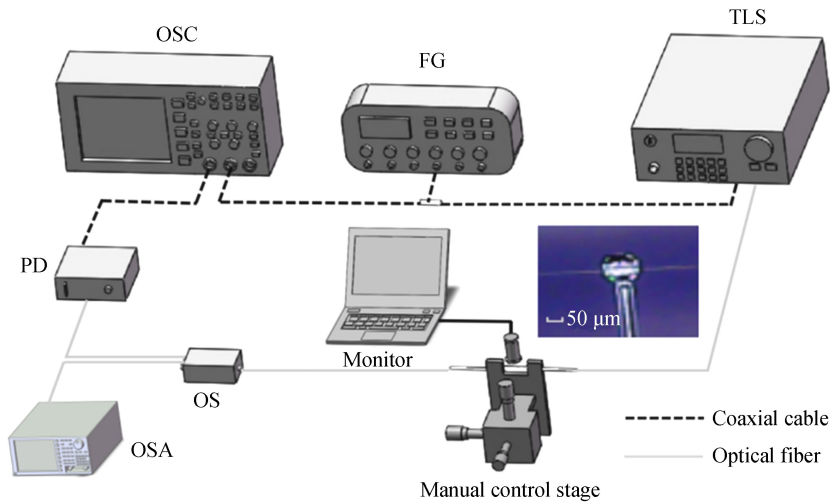
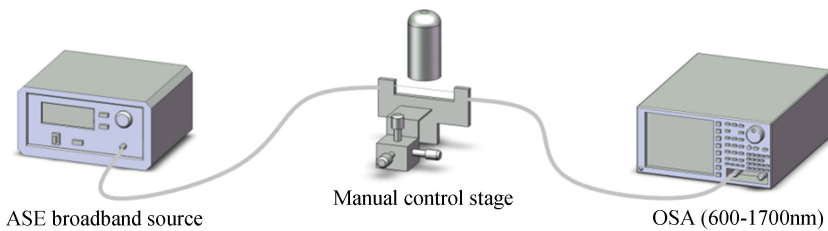


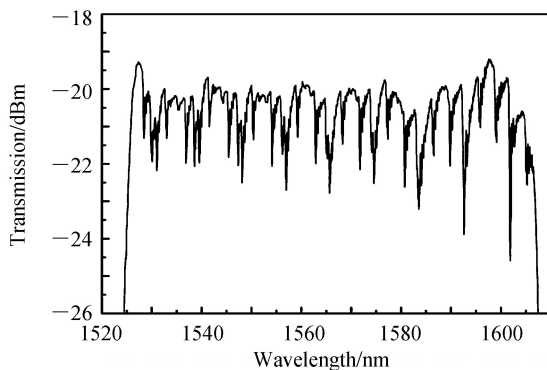
图 1 采用 TLS 为泵浦源的实验装置示意图.插图:锥光纤与直径 100  $\mu\text{m}$  的微球的耦合

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device with TLS as the pump source. Inset: coupling diagram of tapered fiber and microspheres with diameter of 100  $\mu\text{m}$

采用 TLS 为激励源的成本高,需要手动调谐得到谐振波长,且由式(1)可知,输入光偏振态的变化也会改变形貌共振谱,所以 TLS 输出的偏振光在普通光纤中受振动影响时偏振态会改变而失谐,并不利于实际



(a) Schematic diagram of the experimental device with ASE as the pump source



(b) Resonance spectrum of silica microsphere cavity

图 2 采用 ASE 为泵浦源的实验装置图和共振谱

Fig.2 Experimental setup and resonance spectrum using ASE as the pump source

应用.为更适应于实际使用,用放大的自发辐射( Amplified Spontaneous Emission ,ASE)光源测量微球腔的谐振谱,其实验装置如图 2(a)所示.来自 1 550 nm 波段宽带 ASE 光源的输入光以倏逝波的形式通过锥光纤进、出微球腔,在光谱分析仪上显示出锥形光纤与微球腔的 WGM 谐振谱,如图 2(b).在图 2(b)的 WGM 谱中可以看到不同的高阶模式,一个自由光谱范围(FSR)中存在多个谐振模式,一部分是最易激发且同时激发的不同高阶径向模式,一部分是微球腔的偏心效应导致的方位角模式退简并产生的模式劈裂.

## 2.2 微球的 $Q$ 值测量

首先制备高  $Q$  值的微球可参考文献[17].选用微球涉及  $Q$  值测量,其方法为:按图 1 连接设备,将 TLS 的波长通过旋钮以 1pm 步长调节,同时 FG 给在 TLS 的压电陶瓷(PZT)加上三角波电信号进行波长扫描来观察数字示波器上的共振吸收峰.在波长调节扫描时,在多个共振吸收峰中,选择最窄的共振吸收峰来测量  $Q$  值,图 3 为微球腔的  $Q$  值测量图.图中的三角波调制电压的峰-峰值为 3 V,调制频率约为 300 Hz.根据  $Q$  值定义,得到计算微腔  $Q$  值的公式为

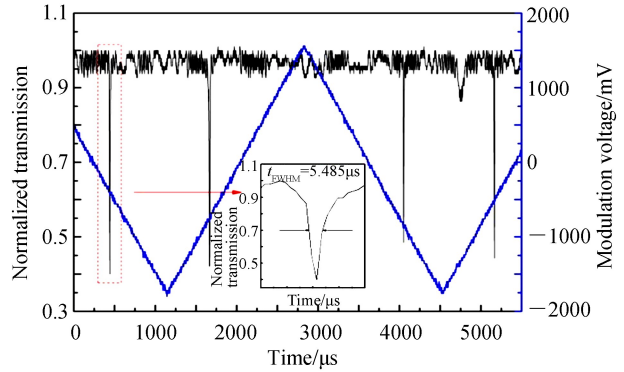


图 3 二氧化硅微球的  $Q$  值测试图

Fig.3  $Q$ -value test plot of silica microspheres

$$Q_{\text{Load}} = \frac{f}{\Delta f} = \frac{c/\lambda_r}{\frac{t_{\text{FWHM}}}{0.5T_{\text{signal}}} \times (300\text{MHz/V}) \times U_{\text{signal}}} \quad (7)$$

式中,  $f$  是谐振频率,  $\Delta f$  是谐振峰的线宽,  $c$  是光速,  $\lambda_r$  是泵浦光的谐振波长,  $t_{\text{FWHM}}$  是对应于谐振峰半高全宽的时间, 300 MHz / V 是 TLS 中 PZT 的每伏电压调制频率量,  $U_{\text{signal}}$  和  $T_{\text{signal}}$  分别是信号发生器输出的三角波峰-峰电压和信号周期.图 2 中的各值对应为:  $\lambda_r = 1\,520.052\text{ nm}$ ,  $U_{\text{signal}} = 3\,314.18\text{ mV}$ ,  $T_{\text{signal}} = 3\,428.731\,4\ \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{FWHM}} = 5.485\ \mu\text{s}$ . 从式(7)可知,微球的  $Q$  值为  $6.19 \times 10^7$ .我们用同样的方法测试了掺铥二氧化硅微球腔、碲酸盐玻璃微球腔和  $\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  共掺的碲酸盐玻璃微球腔的  $Q$  值,掺杂稀土离子后会因吸收损耗的增加而球腔  $Q$  值略有下降,但量级均能达到  $10^6$ .

## 3 微球腔热光效应实验研究

### 3.1 二氧化硅微球腔的热光效应研究

#### 3.1.1 1 550 nm 可调谐激光器作为泵浦源

如上述测得  $Q$  值后,将 FG 中的三角波调制转换为直流(Direct Current, DC)偏移调制,对 PZT 加调谐电压改变 TLS 输出波长.通过手动旋转 DC 旋钮以进行更精细的波长扫描,当输入球的激光波长  $\lambda_p$  达到微腔的共振波长  $\lambda_r$  (对应泵浦功率为  $82.67\ \mu\text{W}$ )时,将观察到整条谐振线下降,表示光耦合入微球,透射的光减少.此时在光谱分析仪上测得的就是最精准的球腔谐振波长.

采用 1 550 nm 可调谐激光器测试了二氧化硅微球腔的谐振波长随输入功率的变化,用掺铒光纤放大器和光衰减器来控制进入微球的功率.当输入球的功率增加时,由于小球受热而使其固有谐振波长红移.谐振波长的红移与输入功率成线性关系,如图 4 所示.当输入功率从 3.5 mW 增加到 15.83 mW,谐振波长从 1 520.64 nm 移动到 1 520.78 nm,平均红移率为 0.011 3 nm/mW.在进球之前输入功率均保持  $80\ \mu\text{W}$  不变的情况下,测试了一个直径为  $142\ \mu\text{m}$  的二氧化硅微球腔的谐振波长随周围环境温度的改变.利用一台红外加热仪来改变周围环境温度,一个放置在微腔附近的温度探测器,如铂电阻测温仪来测量环境温度.缓慢加热,使球与环境处于热交换平衡.图 5 描绘了随着环境温度的升高,微腔的谐振波长向长波方向移动.在  $\Delta T_s = 20^\circ\text{C}$  的环境温度改变下,谐振波长改变了 0.19 nm,平均红移率为 0.009 5 nm/ $^\circ\text{C}$ .对二氧化硅材料来说,热膨胀系数为  $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,热光系数为  $8.57 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,则系数  $k$  为  $9.12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,理论上的  $\Delta\lambda/\Delta T$  为 0.013 8 nm/ $^\circ\text{C}$ .

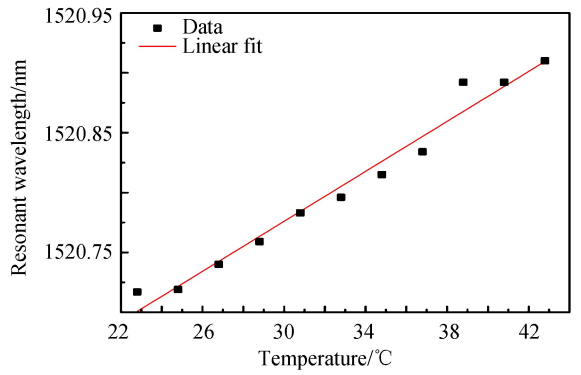
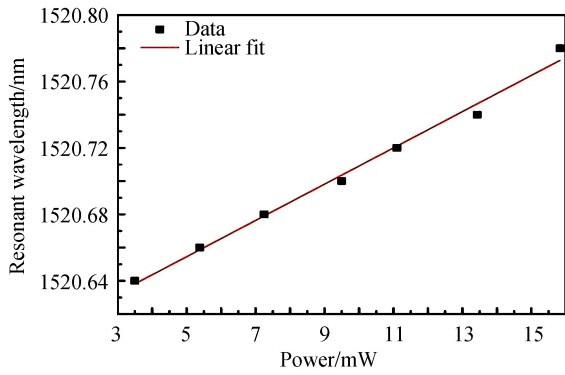


图 4 在 300K 的环境温度下,谐振波长随输入功率变化的拟合曲线

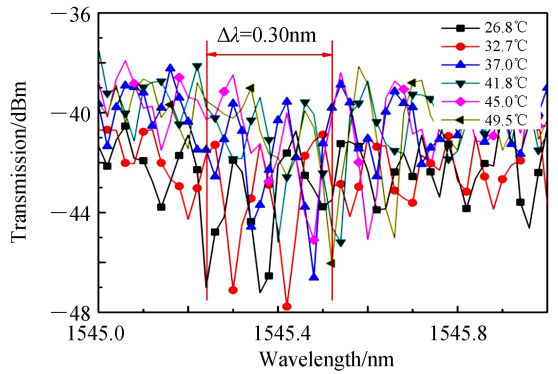
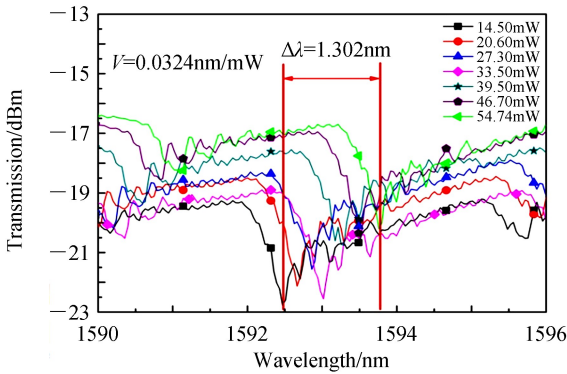
图 5 在 80  $\mu$ W 的输入功率下,谐振波长随环境温度变化的拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of resonant wavelength with input power at 300K ambient temperature

Fig.5 Fitting curve of resonant wavelength with ambient temperature at 80  $\mu$ W input power

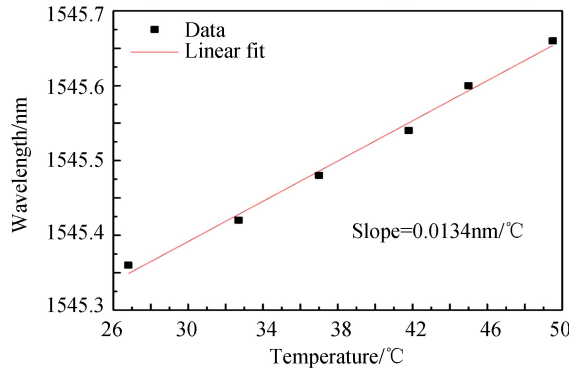
### 3.1.2 1 550 nm 宽带 ASE 光源作为泵浦源

采用宽带的 ASE 光源,其与球腔的谐振峰波长不受输入光纤振动的影响,且造价低,不用手动调谐寻找谐振峰波长,更适应于实际应用.图 6(a)为光谱分析仪记录的不同功率的形貌特征谐振谱,输入功率从 14.5 mW 到 54.74 mW 变化时,二氧化硅微球腔谐振波长红移了 1.302 nm,平均红移率  $V=0.0324$  nm/mW.同样地,测试了周围环境温度的变化对二氧化硅微球的形貌特征谐振谱产生的影响.图 6(b)为当 ASE 功率为 5 mW 时,不同环境温度下二氧化硅微球腔的谐振谱.当周围环境温度从 26.8°C 升到 49.5°C,谐振波长向长波移动了 0.3 nm,通过图 6(c)的线性拟合可得平均红移率为 0.0134 nm/°C,与理论值 0.0143 nm/°C(由式(3)可得)基本一致.由于回音壁可以支持多个模式振荡,利用多个模式同时进行温度传感测试,测得的灵敏度基本一致,经平均后会使得稳定性更好,可以得出结论:利用多个模式同时进行温度传感测试时,传感的稳定性会更好.



(a) Resonance spectra at different powers

(b) Resonance spectra at different ambient temperatures



(c) Variation of resonant wavelength with ambient temperature

图 6 二氧化硅微球腔的谐振谱随激励功率与环境温度的变化

Fig.6 The change of resonance spectrum of silica microsphere cavity with excitation power and ambient temperature

比较 1 550 nm 可调谐激光器和 1 550 nm 波段宽带光源两种光源泵浦下不同输入功率和不同环境温度的平均红移率,可知宽带光源的功率红移率较大,这是由于宽带光源有多个波长谐振,进入微球腔的功率较高,宽带光源的温度红移率更接近理论值.因此具有高稳定、高功率输出、受环境影响小等优点的宽带光源成为精确测量微腔谐振波长变化的首选.

### 3.1.3 掺铈二氧化硅微球腔的热光效应研究

掺杂了稀土离子的玻璃材料能够提高对泵浦光的吸收,因此测试了一个直径为 170  $\mu\text{m}$  的掺铈二氧化硅微球腔在不同输入功率和不同环境温度下的谐振谱.如图 7 所示,在 26.23 mW 的输入功率变化量的影响下,谐振波长红移了 1.278 nm,平均红移率  $V=0.0487\text{ nm/mW}$ ,比无掺杂的二氧化硅微球腔高 16.3  $\mu\text{m/mW}$ .同样的,对不同环境温度下的掺铈二氧化硅微球腔的谐振波长改变进行拟合,得到的平均红移率为 0.0152  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,高于无掺杂的二氧化硅微球腔.

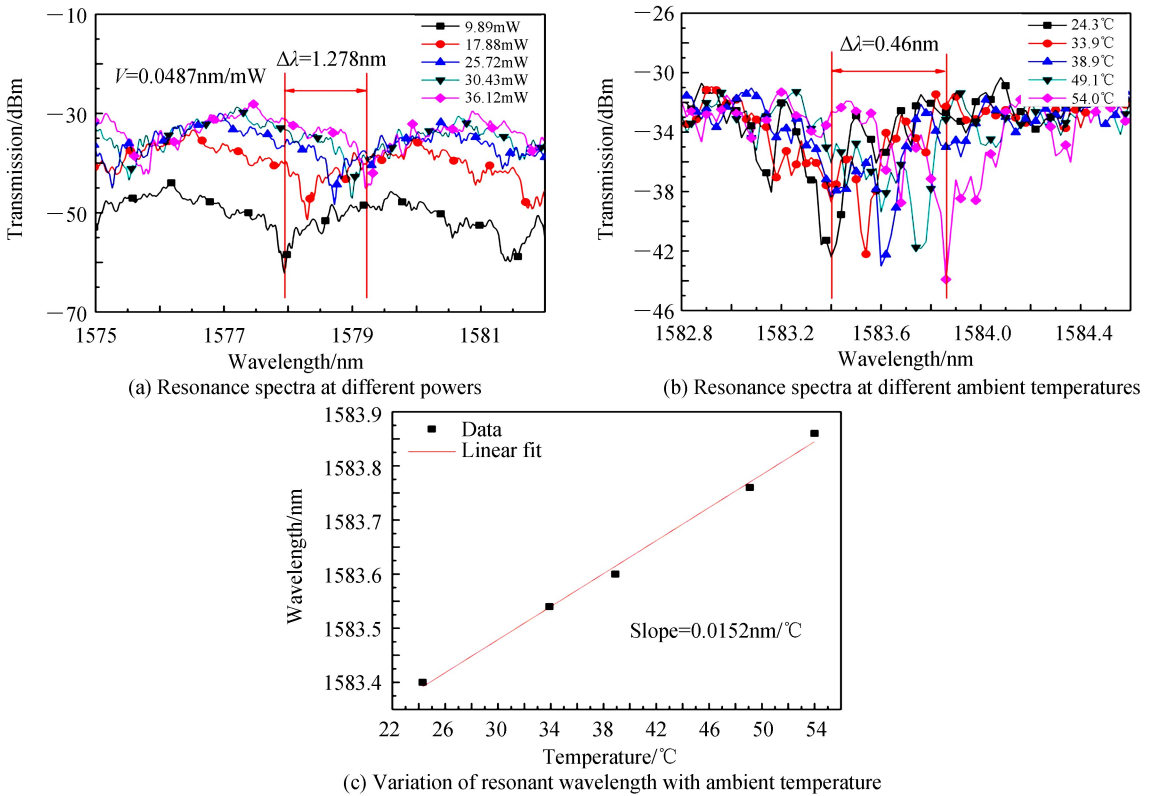


图 7 掺铈二氧化硅微球腔的谐振谱随激励功率与环境温度的变化

Fig.7 The change of resonance spectrum of Erbium-doped silica microsphere cavity with excitation power and ambient temperature

## 3.2 硝酸盐玻璃微球腔的热光效应研究

不同材料基质的热光系数和热膨胀系数不同,产生的热光效应也不一样.采用宽带光源泵浦硝酸盐玻璃微球腔,并与二氧化硅微球腔进行比较,研究不同材料的玻璃基质的热光效应.

### 3.2.1 无掺杂硝酸盐玻璃微球腔

制备了直径为 135  $\mu\text{m}$ ,组分为  $69\text{TeO}_2\text{-}23\text{WO}_3\text{-}8\text{La}_2\text{O}_3$  的硝酸盐玻璃微球.用 ASE 光源测量微球透射谱,如图 8 所示.当输入功率从 4.68 mW 增加至 19.58 mW 时,谐振峰从 1 562.2 nm 红移至 1 563.26 nm,平均红移率达到 0.0711  $\text{nm/mW}$ .当温度从 24.3 $^\circ\text{C}$  上升至 44.5 $^\circ\text{C}$  时,谐振峰红移 0.38 nm,平均红移率如图 8 (c)所示为 0.0191  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ ,计算出的  $k$  为  $1.21\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ .通过比较可知,硝酸盐玻璃微球腔的平均红移率比二氧化硅微球腔高,这是因为硝酸盐玻璃的  $k$  比二氧化硅高.与参考文献[18]中硅微环腔的平均红移率 1.1  $\text{nm/mW}$  对比,可知硅受温度的影响更为明显,这是由于硅的热光系数为  $1.85\times 10^{-4}/\text{K}$ ,热膨胀系数为  $2.6\times 10^{-6}/\text{K}$ ,折射率为 3.45,硅的  $k$  值比二氧化硅和硝酸盐玻璃都高.从另一个角度来说,二氧化硅材料的热稳定性更好.

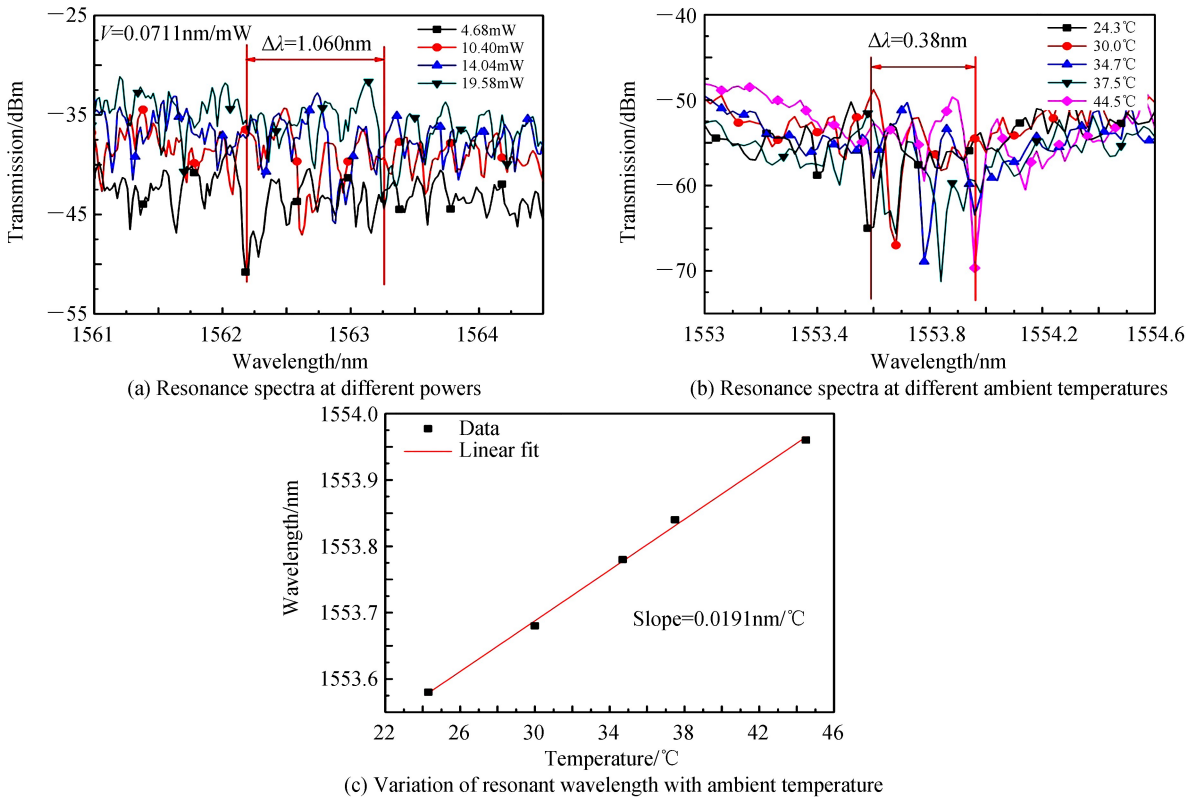
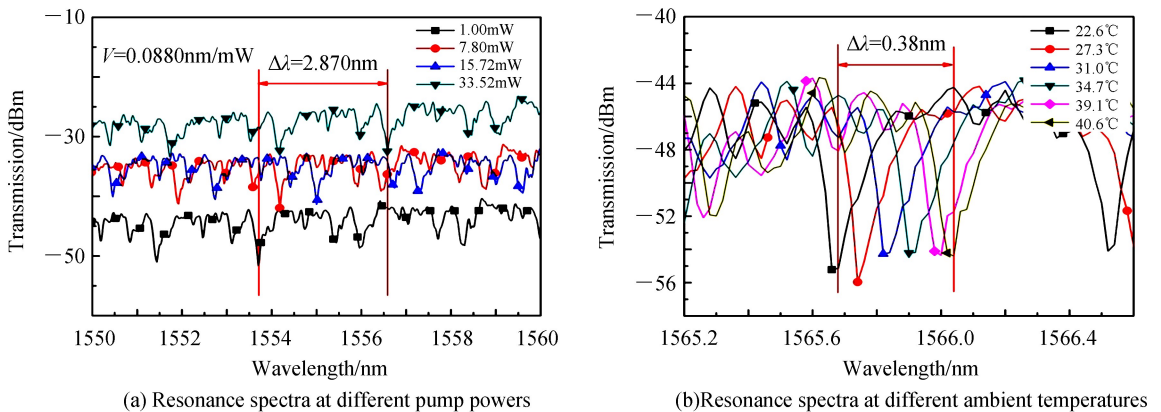


图 8 无掺杂碲酸盐玻璃微球腔的谐振谱随激励功率与环境温度的变化

Fig.8 The change of resonance spectrum of undoped tellurite glass microsphere cavity with excitation power and ambient temperature

### 3.2.2 Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup> 共掺的碲酸盐玻璃微球腔

为增加对光的吸收,实验还制备了 Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup> 共掺的碲酸盐玻璃微球腔,所用碲酸盐玻璃材料配比为: 68.7TeO<sub>2</sub>-23WO<sub>3</sub>-8La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.1Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.2Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.图 9(a)为直径 170 μm 的 Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup> 共掺碲酸盐微球腔谐振波长随功率变化的结果.随着输入功率的增加,谐振波长红移了 2.87 nm,平均红移率 V 为 0.088 nm/mW.不同环境温度下 Er<sup>3+</sup>/Tm<sup>3+</sup> 共掺碲酸盐玻璃微球腔的谐振谱如图 9(b)所示.由图 9(c)可知,当温度从 22.6℃上升至 40.6℃时,平均红移率为 0.021 3 nm/℃.相对于无掺杂的碲酸盐玻璃材料,可以发现掺杂了稀土离子的碲酸盐玻璃的热光效应更加显著.





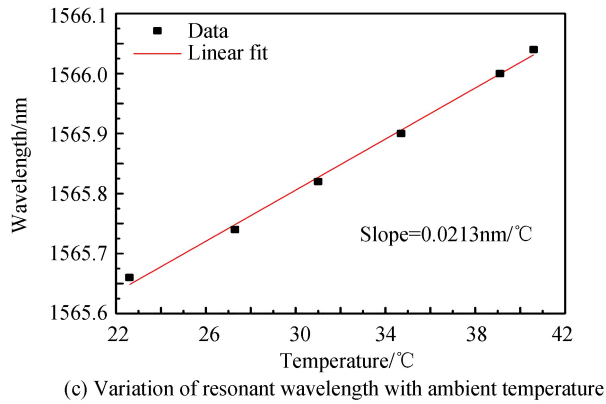


图 9  $\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  共掺碲酸盐玻璃微球腔的谐振谱随激励功率与环境温度的变化

Fig.9 The change of resonance spectrum of  $\text{Er}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$  codoped tellurite glass microsphere cavity with excitation power and ambient temperature

## 4 结论

本文比较高 Q 二氧化硅和碲酸盐玻璃微球腔的热光效应,探讨了泵浦光功率、周围环境温度和稀土离子掺杂对谐振谱频移的影响,发现热光系数、热膨胀系数较高的基质材料微球对温度更加敏感.稀土离子的掺杂加强了基质材料对光、热的吸收,热光效应更加明显.用 1 550 nm 波段可调谐激光器和宽带 ASE 光源两种泵浦源,分别测量了二氧化硅、碲酸盐玻璃微球及其稀土离子掺杂微球在激励光功率、环境温度变化时其谐振峰波长的变化量.得到了碲酸盐微球激励功率灵敏度为 71.1 pm/mW,温度灵敏度为 19.1 pm/°C.若掺杂了钪离子和铪离子,则激励功率灵敏度和温度灵敏度分别高达 88 pm/mW 和 21.3 pm/°C;二氧化硅微球激励功率灵敏度为 32.4 pm/mW,温度灵敏度为 13.4 pm/°C,铪离子的掺杂使激励功率灵敏度达到 48.7 pm/mW,温度灵敏度达到 15.2 pm/°C.温度传感的稳定性较好,也具有可重复性,实验温度动态范围为 20~95°C,分辨率为 1°C.本文结果可对不同材料的热光效应、光纤温度传感器件和光器件的稳定性等方面的研究提供价值.

## 参考文献

- [1] VERNOOY D W, ILCHENKO V S, MABUCHI H, *et al.* High-Q measurements of fused-silica microspheres in the near infrared[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(4): 247-249.
- [2] VERNOOY D W, FURUSAWA A, GEORGIADES N P. Cavity QED with high-Q whispering gallery modes[J]. *Physical Review A*, 1998, **57**(4): 2293-2296.
- [3] KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, VAHALA K J. Kerr-nonlinearity optical parametric oscillation in an ultrahigh-Q toroid microcavity.[J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(8): 083904.
- [4] LI Q, HUANG Y, LIN Y, *et al.* Ultralow-threshold laser in a  $\text{Nd}^{3+}$  doped silica microsphere [J]. *Optics Communications*, 2015, **356**: 368-372.
- [5] ARNOLD S, KENG D, SHOPOVA S I, *et al.* Whispering gallery mode carousel-a photonic mechanism for enhanced nanoparticle detection In biosensing[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(8): 6230-6238.
- [6] YAN Y Z, ZOU C L, YAN S B, *et al.* Packaged silica microsphere-taper coupling system for robust thermal sensing application[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(7): 5753-5759.
- [7] LI B B, WANG Q Y, XIAO Y F, *et al.* On chip, high-sensitivity thermal sensor based on high-Q polydimethylsiloxane-coated microresonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(25): R1777.
- [8] XU L, JIANG X, ZHAO G, *et al.* High-Q silk fibroin whispering gallery microresonator[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(18): 20825.
- [9] SCHILLER S, BYERS R L. High-resolution spectroscopy of whispering gallery modes in large dielectric spheres[J]. *Optics Letters*, 1991, **16**(15): 1138-1140.
- [10] SCHILLER S. Asymptotic expansion of morphological resonance frequencies in Mie scattering[J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(12): 2181-2186.
- [11] CARMON T, YANG L, VAHALA K J. Dynamical thermal behavior and thermal self-stability of microcavities[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(20): 4742-4750.
- [12] VOLLMER F, BRAUN D, LIBCHABER A, *et al.* Protein detection by optical shift of a resonant microcavity[J].

- Applied Physics Letters*, 2002, **80**(21): 4057-4059.
- [13] ZHANG Yu-guang, 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.
- [14] LIU Li-sa, CAI Zhi-ping, WEN Guo-bin, *et al.* Theoretical simulation for a coupling system with taper fiber and silicon-microsphere resonator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 20-23.  
刘丽飒, 蔡志平, 温国斌, 等. 熔锥光纤与球微腔耦合系统的理论模拟[J]. 光电工程, 2004, **31**(4): 20-23.
- [15] 杨超麟. 光纤耦合回音壁模微球腔特性及其选模技术研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2017.
- [16] HUANG J, HUANG Y, WU T, *et al.* High efficiency white luminescence in  $Tm^{3+}/Er^{3+}/Yb^{3+}$  tri-doped oxyfluoride glass ceramic microsphere pumped by 976nm laser[J]. *Journal of Luminescence*, 2015, **157**(1): 215-219.
- [17] ZHANG Pei-jin, HUANG Yu, GUO Chang-lei, *et al.* Study of cascaded raman scattering laser in silica microsphere pumped by 976 nm laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(22): 219-224.  
张培进, 黄玉, 郭长磊, 等. 976nm 激光抽运二氧化硅微球级联拉曼散射激光的研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(22): 219-224.
- [18] PENG S, REANO R M. Low-power optical bistability in a free-standing silicon ring resonator[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(8): 1124-1126.