

引用格式: XIAO Zhongwei, CHAI Minggang, WANG Mengyu, et al. Characteristics and Temperature Sensing Application of Optical Microbottle Resonators[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0206001

肖中威, 柴明钢, 王梦宇, 等. 光学微瓶腔特性及温度传感应用研究[J]. 光子学报, 2023, 52(2):0206001

光学微瓶腔特性及温度传感应用研究

肖中威¹, 柴明钢¹, 王梦宇¹, 谢成峰¹, 郭状¹, 张磊², 吴涛¹, 伏燕军¹

(1 南昌航空大学 江西省光电信息科学与技术重点实验室, 南昌 330063)

(2 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

摘要:设计并测试了两种基于微瓶腔结构的温度传感系统。分别基于电弧放电法和自主装法制备了氧化硅材料(SiO₂)和紫外光固化胶(UCA)聚合物材料微瓶腔,通过锥形光纤耦合的方式分析了两种微瓶腔基本特性,并测试它们在温度传感中的应用。实验结果表明,SiO₂微瓶腔在温度上升时的灵敏度为 11.13 pm/°C,在温度下降时的灵敏度为 10.25 pm/°C;UCA 微瓶腔在温度上升时的灵敏度为 111.89 pm/°C,在温度下降时的温度灵敏度为 102.02 pm/°C。两者在上升和下降时均保持很好的一致性,尤其UCA 微瓶腔温度灵敏度比 SiO₂微瓶腔提升了 10 倍。本文传感器具有体积小、价格低、可塑性和重复性好、灵敏度高等优势,在温度传感领域具有潜在应用。

关键词:光学微腔;传感器;温度;回音壁模式

中图分类号:TN252

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235202.0206001

0 引言

回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)光学微腔可以将光限制在非常小的空间内,极大地增强了光与物质之间的相互作用,与常规的光学谐振腔相比,具有超高的品质因子 Q 值和非常小的模式体积 V 的优势^[1],在高灵敏度传感中具有潜在的应用价值^[2-3]。制备 WGM 光学微腔的材料有液滴、晶体、半导体、聚合物和各种不同材质的玻璃等^[4]。WGM 光学微腔的形状也不受限于基本的球形、环形和盘形,尤其,具有三维结构的微瓶腔通过其表面的连续全内反射将 WGM 限制在两个转折点之间的谐振轴上,增强了对光的限制能力^[5-6],不仅增强了光与物质之间的相互作用,并且产生轴向自由频谱范围,具有丰富的模式光谱,在窄线宽激光器^[7]、高灵敏度传感^[8-9]、非线性光学^[5]等具有应用价值。

常见的微瓶腔有氧化硅材料(SiO₂)微瓶腔和聚合物材料(Polymer)微瓶腔两种。其中,SiO₂微瓶腔通常在常规单模光纤上采用软化压缩法^[10]或熔融挤压法^[5]制备,所采用的热源可以是 CO₂激光器或者高压电弧,受热软化或熔融的光纤受挤压下产生凸起,从而形成微瓶腔。SiO₂微瓶腔具有很高的表面质量,并且在宽带光谱范围具有很低的损耗,可以形成密集的谐振模式^[10]。高 Q 值的微瓶腔可以将腔内的光限制在瓶状区域内循环数万次,具有很长的光子寿命,在光学延迟线^[11]和量子信息^[12]等领域有着潜在的应用价值。另外,通过聚焦离子束铣削技术在微瓶腔表面精准的刻写划痕,可以定向选择某些较低模式的光谱^[8],得到比较稀疏,容易识别的模式谱,提高在光学传感中的应用价值。

另外,Polymer 微瓶腔通常基于自组装法制备,如聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)^[9]、聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)^[13]、SU-8^[14]、紫外光固化胶(Ultraviolet-Curable Adhesive, UCA)^[15]等 Polymer 材料结构灵活,易于加工,有着良好的可塑性,可以在光纤载体上利用材料的

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51865040, 41871229, 42175130, 62101230),江西省自然科学基金(Nos. 20202BABL212011, 20202BABL211010, 20202BABL212013, 20203BBG73039),江西省教育厅基金(No. GJJ190508)

第一作者:肖中威, 2008080300118@stu.nchu.edu.cn

通讯作者:柴明钢, mgchai@nchu.edu.cn

收稿日期:2022-08-15; **录用日期:**2022-10-05

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

表面张力作用自主装自然形成。聚合物微瓶腔兼具很好的集成性,利用封装技术可以将其高稳定的结构中^[15]。此外,由于聚合物材料具有很好的兼容性,可以通过将染料分子掺入到 Polymer 微瓶腔的方式^[16],制备微型激光器,具有良好的可调谐性和伸缩性。尤其是UCA微瓶腔,UCA材料本身具有较好的透光性和热光系数,并且可在紫外光照射下发生固化,这使得其易被制作成微瓶腔。

本文研究了SiO₂微瓶腔和UCA微瓶腔的特性,对比了两种不同材料微瓶腔在温度传感中的应用。首先,分别通过熔融挤压法和自组装机法制备了SiO₂微瓶腔和UCA微瓶腔。从微瓶腔的解析解出发,用宽带光源作为激励光源,测试了SiO₂微瓶腔和UCA微瓶腔的谐振特性。最后,测量了两种微瓶腔的谐振波长随温度变化的特性,并研究了两种微瓶腔的谐振波长偏移量与环境温度的关系,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 实验理论

微瓶腔具有独特的三维光学结构,既能够在径向方向上限制WGM,也可以将WGM限制在轴向方向,这主要是由轴向方向的两个转折点之间的直径变化引起的^[17]。图1(a)所示是微瓶腔沿轴向的截面示意图,其中 D_s 是连接微瓶腔的光纤柄直径, D_b 是微瓶腔赤道面处直径, L_b 是微瓶腔两瓶颈之间的长度。使用抛物线函数对微瓶腔的外形轮廓进行近似,沿微瓶腔轴向的抛物线近似公式为^[10]

$$D(z) = \begin{cases} D_b \left(1 - \frac{1}{2} (\Delta k \cdot z)^2 \right) & |z| \leq \frac{L_b}{2} \\ D_s & |z| > \frac{L_b}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,当 $z=0$ 时, D_b 是微瓶腔径向方向的最大直径; Δk 表示微瓶腔的曲率,决定着微瓶腔的鼓起程度。

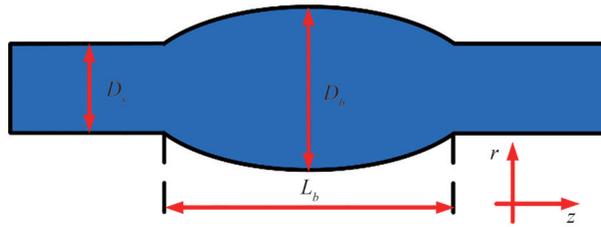


图1 光学微瓶腔的截面示意图及轮廓近似

Fig.1 Schematic of curved surface and outline approximation for optical microbottle resonator

微瓶腔的谐振模式由模式数 m 、 p 和 q 来表示,其中, m 表示方位角模式数, p 表示径向模式数, q 表示轴向模式数。利用亥姆霍兹方程,将波动方程分离变量,微瓶腔谐振模式模场 $E_{m,p,q}(r,z)$ 表示为

$$E_{m,p,q}(r,z) = E_p(r,z) \cdot Z_{m,q}(z) \cdot e^{im\varphi} \quad (2)$$

式中, $E_p(r,z)$ 表示在径向方向上的模场强度, $Z_{m,q}(z)$ 表示在轴向方向上的模场强度, $e^{im\varphi}$ 表示在角向方向上的模场强度。 $E_p(r,z)$ 与 $Z_{m,q}(z)$ 分别可表示为^[5]

$$E_p(r,z) = \begin{cases} AJ_m(k_0 n_1 R_c \cdot r/R(z)) & r \leq R(z) \\ BY_m(k_0 R_c \cdot r/R(z)) & r > R(z) \end{cases} \quad (3)$$

$$Z_{m,q}(z) = C_{m,q} H_q(\sqrt{\Delta E_m/2} \cdot z) \cdot \exp(-\Delta E_m \cdot z^2/4) \quad (4)$$

式中, n_1 为微瓶腔的有效折射率, J_m 和 Y_m 分别是贝塞尔函数(Bessel function)和修正后的第二类贝塞尔函数, A 、 B 为常数,可分取决于电场边界连续性条件。 k_0 为传播常数, $C_{m,q} = [\Delta E_m / \pi 2^{2q+1} (q!)^2]^{1/4}$, H_q 为 m 阶厄米多项式。 $\Delta E_m = 4U_{mp} \Delta k / D_b$,在忽略偏振效应 U_{mp} 可近似为Bessel函数的 p 阶根,表示为 $U_{mp} \approx m +$

$\alpha_p \left(\frac{m}{2} \right)^{1/3} + \frac{3}{20} \alpha_p^2 \left(\frac{m}{2} \right)^{-1/3}$ 。 α_p 是Airy函数的 p 阶根,当 $p=1,2,3,4$ 时, $\alpha_p=2.3381, 4.0897, 5.5205, 6.7867$ 。

每个模式数组 (m,p,q) 所对应的谐振波长解可由式(5)得出。

$$\lambda_{mpq} = 2\pi n_b \left[\left(\frac{2U_{mp}}{D_b} \right)^2 + \left(q + \frac{1}{2} \right) \Delta E_m \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

WGM光学微腔温度传感原理^[18]是:当微腔周围环境改变的时候,腔体内的温度因为热传递也会跟着改变,由于微腔材料本身具有热光效应或热膨胀效应,会分别导致微腔材料折射率和微腔直径的改变,在它们共同作用下使微腔的谐振波长发生蓝移或者红移。谐振波长 λ 与温度变化之间的关系为

$$\frac{d\lambda}{dT} = 2\pi R \frac{1}{m} \left(\frac{dn}{dT} \right) + 2\pi R \frac{1}{m} \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \right) = \lambda_0 \left[\left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) + \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \right) \right] \quad (6)$$

式中, m 是WGM角模式数, λ_0 是初始温度下的谐振波长, $(1/n)(dn/dT)$ 为微腔材料热光系数, $(1/R)(dR/dT)$ 为微腔材料热膨胀系数。由式(6)可知谐振波长随温度变化而发生的漂移 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda_0 k \Delta T \quad (7)$$

式中, k 为微腔材料的热光系数与热膨胀系数之和, ΔT 是模式体积内微腔材料介质与微腔周围环境之间的温度差。因此用高热光系数或热膨胀系数的材料制备的微腔可以实现高灵敏度的温度传感。

2 微瓶腔的制备

2.1 氧化硅微瓶腔的制备

SiO₂微瓶腔完整制备过程如图2(a)所示。首先,取一根单模光纤(SMF-28)剥去涂覆层,用酒精擦拭干净。处理完后利用高压电弧对光纤末端进行放电处理,放电时间大约为1 s,进行多次放电后光纤端受热熔融,在表面张力的作用下形成微球状。然后,再取一根单模光纤剥去涂覆层,用光纤切割刀将末端切平,移动光纤一端与之前制备成的微球腔在水平位置上对齐贴住。最后对两者紧贴的区域多次放电,在光纤的表面压力和两端的挤压作用力下形成为微瓶腔。这里需要注意的是,放电次数越多,微球的尺寸越大,用来制备成微瓶腔的尺寸也越大。图2(b)所示是制备得到尺寸为 $D_s=125 \mu\text{m}$ 、 $D_b=206 \mu\text{m}$ 和 $L_b=530 \mu\text{m}$ 的SiO₂微瓶腔。图2(c)展示了SiO₂微瓶腔在横截面上的模式电场分布,可以看出,在微瓶腔的 z 方向上存在明显的轴向模式。

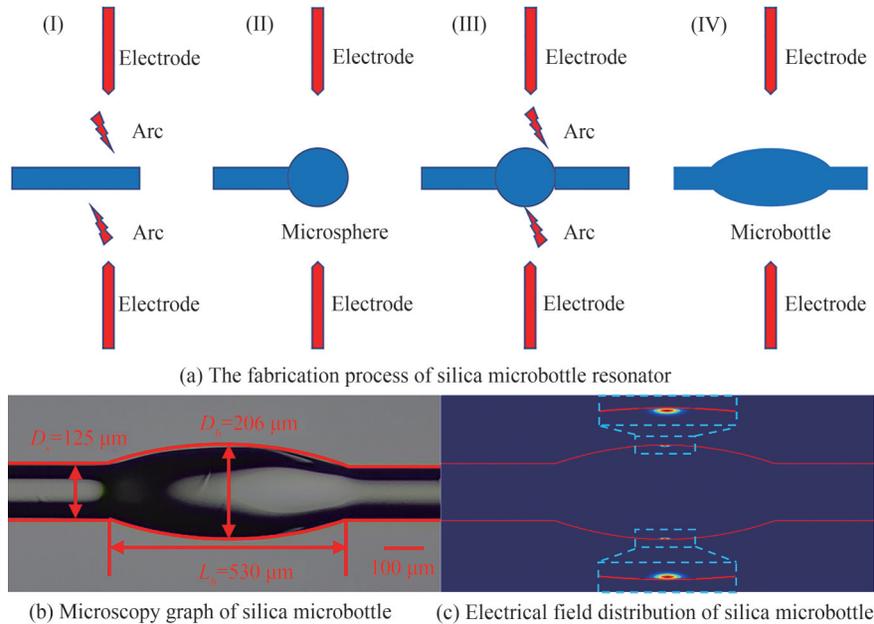


图2 氧化硅微瓶腔的制备过程及电场分布

Fig.2 The fabrication process and electrical field distribution of SiO₂ microbottle resonator

2.2 UCA微瓶腔的制备

UCA微瓶腔完整制备过程如图3所示。本次制作微瓶腔选用的UCA材料为紫外固化胶NOA61,

NOA61为紫外光固化胶常用材料,是一种无色透明液体,能在紫外光照射下呈现固化状态,并且NOA61紫外胶可以很好的润湿在玻璃光纤表面上,并在表面张力的作用下形成扁长形结构。首先,取一根单模光纤(SMF-28)剥去涂覆层,放在光纤熔融拉锥机上,通过火焰加热法拉制出锥形光纤,设置不同的火焰强度、拉锥机电动平移台移动的速度和距离可以制作出不同锥腰直径的锥形光纤,把制备好的锥形光纤竖直放置并固定好。其次,取一支注射器蘸取适量的NOA61液滴,把液滴转移到拉制好的锥形光纤锥腰上面的锥形过渡区。然后,NOA61液滴利用自身重力将沿着光纤锥滑落到锥腰下方过渡区,由于NOA61液滴具有一定的粘度,会有一部分液滴在滑落的过程中吸附到光纤锥上。附着在光纤锥上的NOA61液滴和光纤锥之间存在一个粘附力,这个作用力会使NOA61液滴在光纤锥表面铺展开;另外,NOA61液滴自身的表面张力会使它收缩,这样就会有多个相互分开的粘合剂片段形成。在NOA61液滴和光纤锥之间的界面张力作用下,粘附力和表面张力达到一个平衡状态,使瓶形微谐振腔在光纤锥上自组装的形成。因为NOA61对波长350~380 nm紫外光较为敏感,故使用中心波长为365 nm的紫外灯照射NOA61液滴十分钟左右使其固化。NOA61粘合剂有着高硬度和低收缩的特性,在适当的紫外光照射下生成固态的微瓶时,形态几乎不发生改变。待UCA微瓶腔固化后将其放进温度箱中经50°C烘干12 h后,即完成所有的制备过程。图3(b)展示的是制备得到级联UCA微瓶腔,图3(c)表示了级联UCA微瓶腔在横截面上的模式电场分布,可以看出,每个UCA微瓶腔都存在各自的轴向模式。

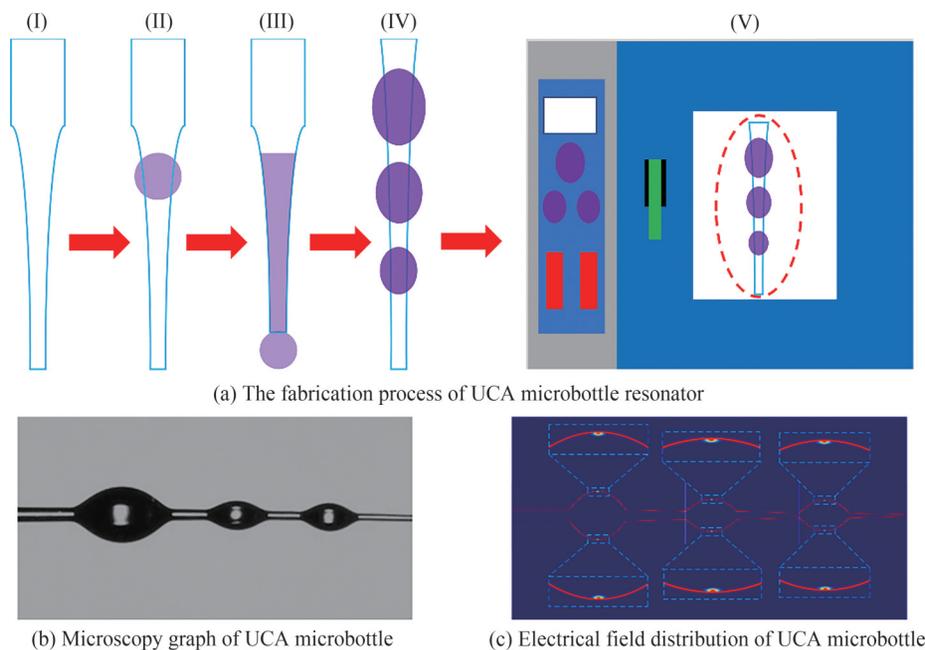


图3 级联UCA微瓶腔的制备过程及电场分布

Fig.3 The fabrication process and electrical field distribution of cascade UCA microbottle resonator

3 实验结果与分析

3.1 微瓶腔的Q值测量

品质因子Q值是光学微腔最基本的特性参数之一。首先测试了实验中制备的尺寸为 $D_s=125\ \mu\text{m}$, $D_b=338\ \mu\text{m}$ 和 $L_b=611\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 微瓶腔的谐振光谱特性,采用锥腰直径约为 $2\ \mu\text{m}$ 大小的锥形光纤对 SiO_2 微瓶腔的谐振光谱进行激发。激发光源选择输出连续光的宽带光源,宽带光源的中心波长为1550 nm。宽带光源输出激发光传输到锥形光纤,锥形光纤的输出端连接到光谱分析仪(Yokogawa, AQ6370D),光谱仪的最小分辨率为0.02 nm。图4(a)是锥形光纤与 SiO_2 微瓶腔赤道中心处耦合得到的光谱图。可以看出, SiO_2 微瓶腔的谐振模式可以明显被激发,谱线整齐且有规则,说明耦合进微瓶腔的光波被限制在瓶状的三维空间内,以WGM形式形成了振荡。图中标记了激发的谐振模式与理论计算所得到的对应的模式数,可以看出,除了激发出几个高效率的基模之外,在两个基模之间,还存在着少许高阶模式。微腔的自由光谱范围(Free

Spectra Range, FSR)理论值通过计算公式 $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \lambda^2/\pi n_1 D_b$ 计算得到,其中, λ 是谐振波长, n_1 为有效折射率。实验中测得SiO₂微瓶腔的FSR为1.572 nm,理论公式计算FSR为1.560 nm,两者结果非常接近。在微腔Q值的分析中,使用公式 $Q = \lambda/\delta\lambda$ 来估算^[19],其中, λ 为中心谐振波长, $\delta\lambda$ 是谐振谱线的半高全宽。另外图4(b)是取图4(a)谐振谱中谐振峰中心波长为1 545.489 nm处的WGM谐振谱图,对其进行洛伦兹拟合。其中,该谐振谱的半高全宽为0.033 nm,通过上述Q值计算公式可得到该谐振模式的Q值为 4.683×10^4 。

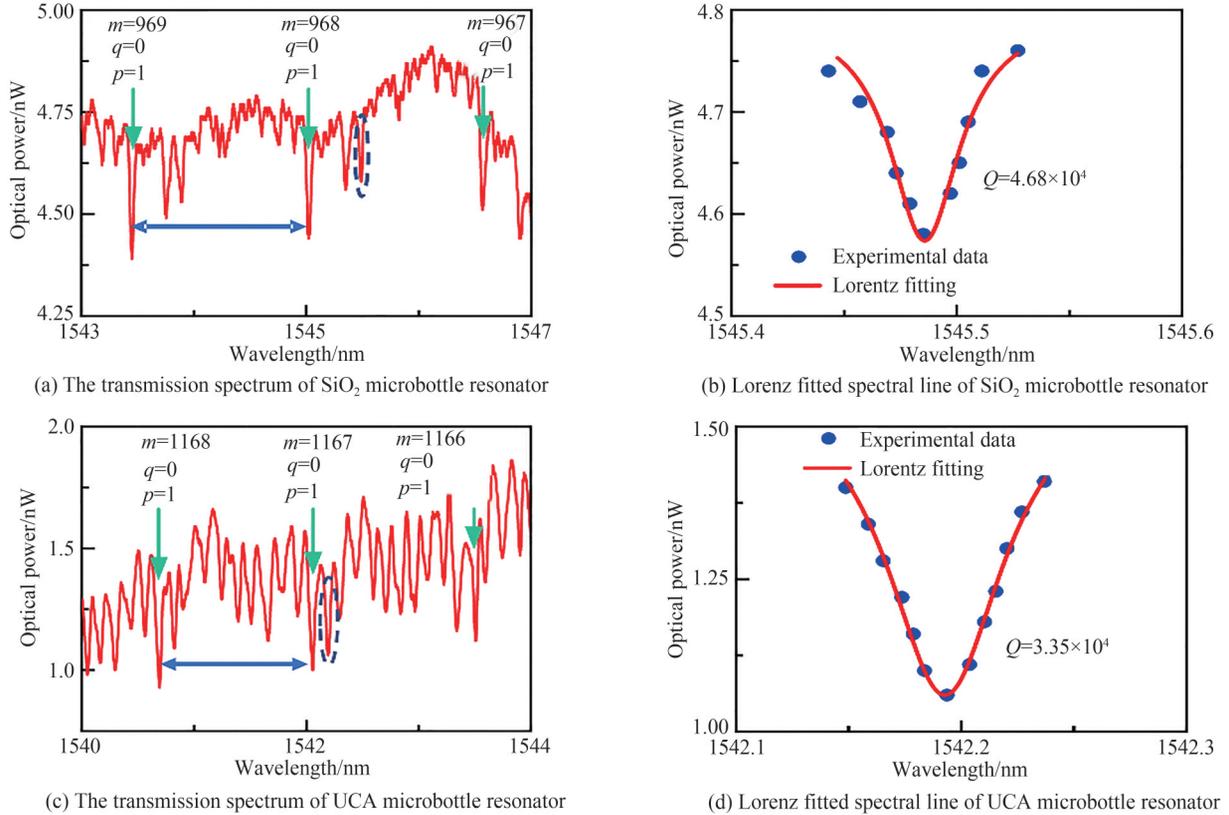


图4 两种材料微瓶腔的透射谱及谐振峰拟合

Fig.4 The transmission spectrum and Lorentz fitted spectral line of two kind of microbottle resonators

图4(c)所示是尺寸为 $D_s=125 \mu\text{m}$, $D_b=380 \mu\text{m}$ 和 $L_b=764 \mu\text{m}$ 的UCA微瓶腔激发的谐振谱,紫外固化胶NOA61在波长1 550 nm处的折射率为1.542,锥形光纤在波长1 550 nm处的折射率约为1.444,两者折射率比较接近,可以很好地满足相位匹配关系。通过观察UCA微瓶腔在赤道面耦合得到的谐振谱,可以发现,UCA微瓶腔的谐振谱十分密集,在同一个FSR内高效率激发的谐振模式比Silica微瓶腔相对较多,一方面原因是测试的UCA微瓶腔本身具有很低的光损耗;另一方面原因是经过固化处理后具有很光滑的表面和对称的轮廓结构。此外,通过理论公式计算的FSR为1.305 nm,实验中测得的FSR为1.324 μm ,与理论值非常接近。图4(d)是对谐振峰中心波长为1 542.194 nm处的WGM谐振谱进行洛伦兹拟合的结果。该谐振模式的半高全宽为0.046 nm,那么计算得到的Q值为 3.353×10^4 ,与Silica微瓶腔得到的Q值非常接近。

3.2 微瓶腔温度传感实验研究

微瓶腔温度传感特性的实验测试装置如图5所示。宽带光源作为激发光接入耦合系统,耦合系统输出光连接到光谱分析仪。耦合系统由微瓶腔与锥形光纤组成,锥形光纤用紫外胶固定在U型玻璃片上,再使用光纤夹具夹住玻璃片,微瓶腔与锥形光纤的耦合位置由高精度三维平移台进行调整控制。在光谱仪观察到透射谱线后对耦合系统进行封装,使用一块玻璃片同时接触U型玻璃片和装载着微瓶腔的石英玻璃管,对接触的地方点涂紫外胶后用紫外灯照射直至紫外胶固化。把封装好的耦合系统放进温度控制箱,通过改变温度控制箱的温度来观察光谱仪中透射谱线的漂移,可得到微瓶腔谐振波长温度传感响应。

接着通过升高或降低温度控制箱的温度,观察Silica微瓶腔的WGM谐振谱线产生相应的红移或蓝移

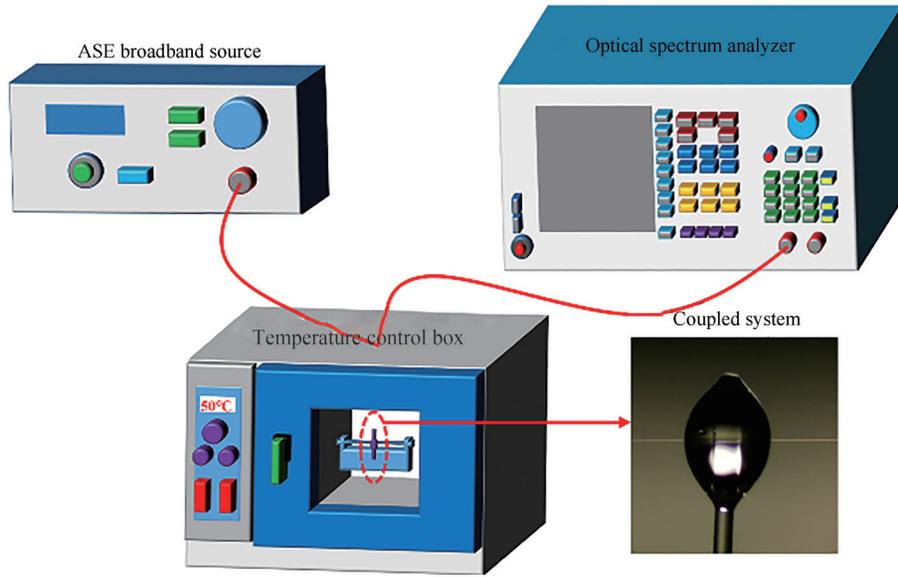


图5 温度传感实验装置

Fig.5 The experimental device of temperature sensing

现象。对 SiO_2 材料来说,它的热光系数和热膨胀系数都是正的,因此当腔体内温度上升或降低时,其 WGM 谐振谱会产生相应的红移或蓝移。图 6 所示是 SiO_2 微瓶腔 WGM 谐振谱随温度变化的情况,分别采集温度上升和下降时的 WGM 谐振谱。测试过程中,采集多个温度下的谐振光谱,再在光谱中取一个明显的谐振模式观察谐振波长的漂移情况。图 6(a)为当氧化硅微瓶腔系统温度从 25.7°C 升高到 46.0°C 时,WGM 谐振波长向长波方向移动,红移了 0.226 nm ,通过图 6(b)线性拟合得到温度灵敏度为 $11.13\text{ pm}/^\circ\text{C}$;图 6(c)展示了 SiO_2 微瓶腔系统温度从 47.8°C 下降到 28.1°C 时,WGM 谐振波长向短波方向移动,蓝移了 0.202 nm ,图 6(d)的

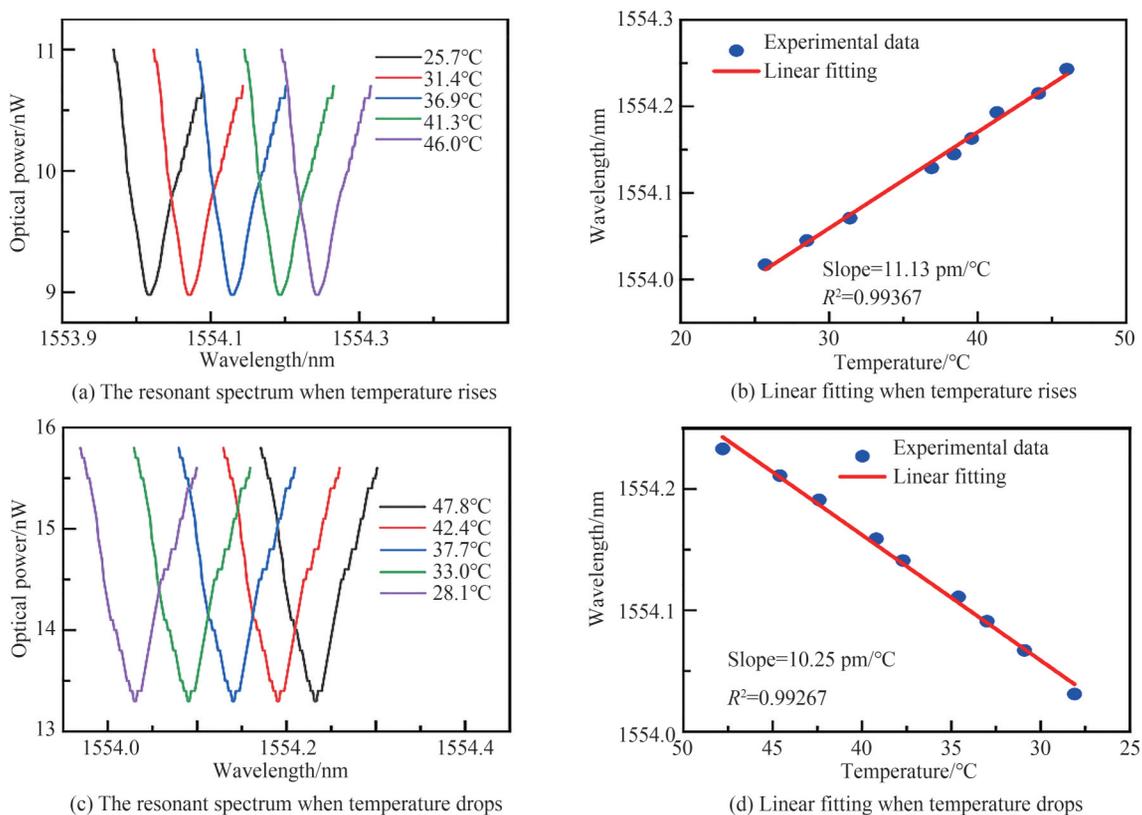


图6 silica微瓶腔的温度传感特性及线性拟合

Fig.6 Temperature sensing characteristic and Linear fitting of the SiO_2 microbottle resonator

线性拟合得到温度灵敏度为 $10.25 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。温度上升和温度降低过程中的得到温度灵敏度非常接近,表现出很好的一致性和可重复性。结果与文献[20] SiO_2 微球腔温度传感系统中测量得到的温度灵敏度结果 $7.38 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 非常接近,与文献[21]中 SiO_2 微瓶腔温度传感系统中测量得到的温度灵敏度结果 $10.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 也是非常吻合,验证了本次实验的可靠性。

采用相同的封装方法测试了UCA微瓶腔温度传感特性。在室温状态下,紫外固化胶NOA61具有正的热膨胀系数和负的热光系数,并且热光系数的绝对值大于热膨胀系数。因此,当UCA微瓶腔腔体内温度升高或降低时,其净效应是负的,WGM谱线产生相应的蓝移或红移,与 SiO_2 微瓶腔恰好相反。图8所示是UCA微瓶腔WGM谐振谱随温度变化的情况。分别采集了温度上升和下降时的WGM谐振谱,并通过温度检测仪纪录每个谐振谱对应微瓶腔系统的温度。图7(a)展示了当UCA微瓶腔系统温度从 25.4°C 升高到 48.1°C 时,WGM谐振波长向短波方向移动,蓝移了 2.54 nm ,通过图7(b)谐振波长随温度上升的线性拟合可得到温度灵敏度为 $-111.89 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;图7(c)展示了当紫外固化胶微瓶腔系统温度从 42.3°C 下降到 29.4°C 时,WGM谐振波长向长波方向移动,红移了 1.316 nm ,通过图7(d)谐振波长随温度下降的线性拟合可得到温度灵敏度为 $-102.02 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。温度上升和温度降低过程中的得到温度灵敏度非常接近,平均表现温度灵敏度为 $-106.96 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,是 SiO_2 微瓶腔的温度灵敏度的十倍,在温度传感器中有着潜在的应用。

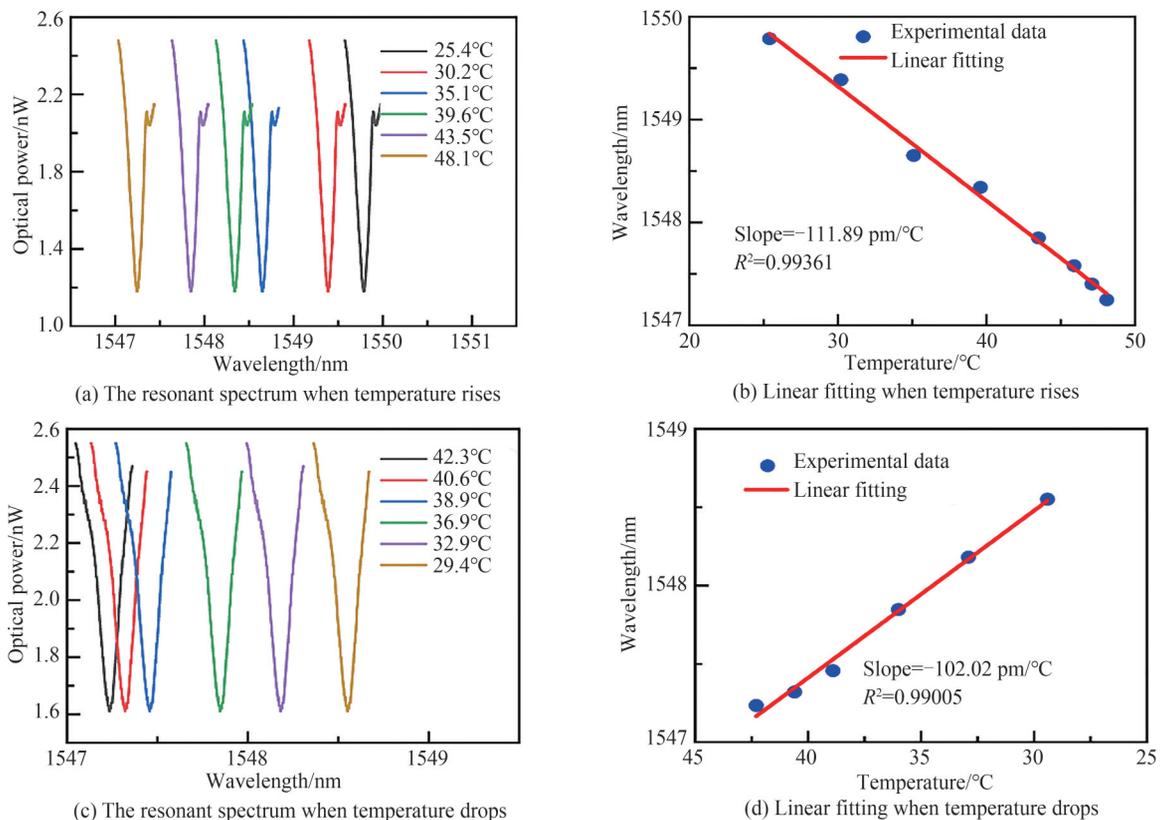


图7 UCA微瓶腔的温度传感特性及线性拟合

Fig.7 Temperature sensing characteristic and Linear fitting of the UCA microbottle resonator

表1是两种材料的光学微瓶腔的温度灵敏度对比,在尺寸差不多的情况下,由于 SiO_2 和NOA61的热膨胀系数基本一致,而NOA61的热光系数比 SiO_2 大两个数量级。为了便于探讨周围环境温度对WGM谐振谱偏移的影响,对光纤锥与微瓶腔耦合系统进行封装,使用封装后的耦合系统作为传感器研究温度传感特性,用中心波长为 1550 nm 的ASE宽带光源作为泵浦源,分别测量了 SiO_2 及NOA61微瓶腔在周围环境温度变化时其谐振波长的变化量。得到 SiO_2 微瓶腔在温度上升时的灵敏度为 $11.13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,在温度下降时的灵敏度为 $10.25 \text{ pm}/^\circ\text{C}$;紫外固化胶微瓶腔在温度上升时的灵敏度为 $111.89 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,在温度下降时的温度灵敏度为 $102.02 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。可以看出NOA61微瓶腔比 SiO_2 微瓶腔温度灵敏度大了一个数量级,这与它们的热光系

数与热膨胀系数大小相对应。测量结果对比发现,实验测得的温度灵敏度均在合理的区间范围内,两者均具有很好的一致性和可重复性。尤其,实验所设计的UCA微瓶腔不仅具有规则且高效的谐振模式谱,并且温度灵敏度相对目前光纤光栅^[22]温度传感传感器(6.43 pm/°C)、法珀微腔^[23]温度传感传感器(12 pm/°C)具有大幅度的性能提升,相信未来在合理的封装技术^[24]下可以得到应用。

表1 两种不同材料微瓶腔参数及特性对比

Table 1 Parameter and properties comparison for two kinds of different material microbottle resonators

Material	Size/ μm (D_s, D_b, L_b)	Thermo-optic coefficient	Coefficient of thermal expansion	Temperature rise sensitivity	Temperature drop sensitivity
SiO ₂	(125, 338, 611)	$8.57 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$2.2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	11.13 pm / °C	10.25 pm / °C
NOA61	(125, 380, 764)	$-2.46 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	$2.2 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	-111.89 pm / °C	-102.02 pm / °C

4 结论

本文理论和实验研究了SiO₂和UCA微瓶腔的制备及温度传感特性。分别通过电弧放电法和自主装法制备了SiO₂和UCA聚合物材料微瓶腔,并通过锥形光纤耦合的方式激发了两种微瓶腔透射谱。对比发现,UCA微瓶腔相对SiO₂微瓶腔具有更加密集且规则的谐振谱。分别表征了两种不同材料微瓶腔在温度上升和温度下降时的灵敏度,结果发现UCA微瓶腔微瓶腔比SiO₂微瓶腔温度灵敏度大了一个数量级,且具有较好的一致性、稳定性和可重复性。实验所设计的微瓶腔温度传感器制作简单、成本低、可控性强且灵敏度高,不仅在温度传感中具有应用价值,并且在化学和生物传感等领域具有潜在应用价值本文中可对不同材料的温度传感器件和耦合系统的稳定性等方面的研究提供参考价值。

参考文献

- [1] VAHALA K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424(6950): 839.
- [2] TOROPOV N, GABELLO G, SERRANO M P, et al. Reviews of biosensing with whispering-gallery mode laser[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 42.
- [3] TANG Shuijing, LI Beibei, XIAO Yunfeng. Optical sensing with whispering-gallery microcavities[J]. Physics, 2019, 48(3): 137-147.
唐水晶, 李贝贝, 肖云峰. 回音壁模式光学微腔传感[J]. 物理, 2019, 48(3): 137-147.
- [4] HEYLMAN K D, KNAPPER K A, HORAK E H, et al. Optical microresonators for sensing and transduction: a materials perspective[J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1700037.
- [5] WANG Mengyu, MENG Lingjun, YANG Yu, et al. Selection of whispering-gallery modes and Fano resonance of prolate microbottle resonators[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(23): 234203.
王梦宇, 孟令俊, 杨煜, 等. 扁长型微瓶腔中的回音壁模式选择及Fano谐振[J]. 物理学报, 2020, 69(23): 234203.
- [6] WANG Mengyu, YANG Yu, LU Zhizhou, et al. Experimental demonstration of nonlinear scattering processes in a microbottle resonator based on a robust packaged platform[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(18): 5917-5924.
- [7] MA Ruilong, YUAN Shixing, ZHU Song, et al. Tunable sub-kHz single-mode fiber laser based on a hybrid microbottle resonator[J]. Optics Letter, 2018, 43(2): 5315-5318.
- [8] YIN Yiheng, NIU Yangxiong, REN Mengxin, et al. Strain sensing based on a microbottle resonator with cleaned-up spectrum[J]. Optics Letter, 2018, 43(19): 4715-4718.
- [9] ZHU Naisi, SHI Bufan, GUO Yuyang, et al. Polydimethylsiloxane self-assembled whispering gallery mode microbottle resonator for ethanol sensing[J]. Optical Materials, 2020, 107: 110024.
- [10] MURUGAN G S, WILKINSON J S, ZERVAS M N. Selective excitation of whispering gallery modes in a novel bottle microresonator[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11916-11925.
- [11] SUMETSKY M. Delay of light in an optical bottle resonator with nanoscale radius variation: dispersionless, broadband, and low loss[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(16): 163901.
- [12] JUNGE C, O'SHEA D, VOLZ J, et al. Strong coupling between single atoms and nontransversal photons[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(21): 213604.
- [13] JOHARI M A M, POUR M P, NOMAN A A, et al. Effect of PMMA and PVA coating on the performance of optical microbottle resonator humidity sensors[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2019, 62(3): 993-998.
- [14] GRIMALDI I A, BERNESCHI S, TESTA G, et al. Polymer based planar coupling of self-assembled bottle microresonators[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105: 231114.

- [15] PERSICETTI G, GRIMALDI I A, TESTA G, et al. Self-assembling and packaging of microbottle resonators for all-polymer lab-on-chip platform[J]. *Sensors and Actuators: Physical*, 2018, 280: 271-276.
- [16] UBAID Saima, LIAO Feng, LINGHU Shuangyi, et al. Electrospun polymer bottle microresonators for stretchable single-mode lasing devices[J]. *Optics Letter*, 2018, 43(13): 3218-3131.
- [17] LOUYER Y, DESCHEDE D, RAUSCHENBEUTEL A. Tunable whispering-gallery-mode resonators for cavity quantum electrodynamics[J]. *Physical Review A*, 2005, 72: 031801.
- [18] LIN Xiaoyun, LIN Dequan, LIAO Tingdi, et al. Therm-optic effect of optical microsphere cavity for temperature sensor research[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 0314004.
林晓莹, 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.
- [19] DONG Yongchao, WANG Keyi, JIN Xueying. Packaged microsphere-taper coupling system with a high Q factor[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(2): 277-284.
- [20] ZHANG Y, ZHU N, ZHOU T, et al. Reserch on fabrication and sensing properties of fiber-coupled whispering gallery mode microsphere resonator[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2020, 20(2): 833-841.
- [21] HERTER J, WUNDERLICH V, JANECZKA C, et al. Experimental demonstration of temperature sensing with packaged glass bottle microresonators[J]. *Sensors (Basel)*, 2018, 18: 4321.
- [22] LIU Mingyao, ZHANG Weiwei, SONG Han. Study on temperature sensing characteristics of FBG in low temperature environment[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(2): 327-331.
刘明尧, 张伟伟, 宋涵, 等. 低温环境下FBG温度传感特性研究[J]. *半导体光电*, 2022, 43(2): 327-331.
- [23] SHEN Jiaxin, WANG Wei, ZHAO Qiong, et al. A fiber grating and Fabry-Perot microcavity sensor for temperature and strain measurement[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(2): 16-20.
申佳鑫, 王伟, 赵琼, 等. 光纤光栅与法珀微腔温度应变双参量传感器[J]. *激光杂志*, 2021, 42(2): 16-20.
- [24] WANG Pengfei, LI Angzhen. Packaged and integration of whispering gallery modes optical microcavity devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148008.
王鹏飞, 李昂震. 回音壁模式光学微腔器件的封装与集成[J]. *光子学报*, 2019, 48(11): 1148008.

Characteristics and Temperature Sensing Application of Optical Microbottle Resonators

XIAO Zhongwei¹, CHAI Minggang¹, WANG Mengyu¹, XIE Chengfeng¹, GUO Zhuang¹,
ZHANG Lei², WU Tao¹, FU Yanjun¹

(1 *Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*)

(2 *Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology, Hefei 230026, China*)

Abstract: Optical resonators can limit light into a tiny space, enhancing the interaction between optics and materials. Optical microcavities supporting Whispering Gallery Modes (WGMs) have their advantages with miniaturization and easy integration. The WGMs in optical microcavities achieve optical confinement along the microcavities substance based on the principle of light total internal reflection, which can significantly strengthen light-matter interactions and increase quality factors. These advantages make them have great potential for high-sensitivity sensing applications. WGM optical microcavities have been prepared with various shapes, such as spheres, bottles, disks, rings, cylinders, hemispheres, and so on. In addition, optical microcavities have been also prepared with a variety of materials such as crystals, semiconductors, polymers and glass. Among them, polymer material has the advantages of being flexible, easy to process, and plasticity. It can be easy to be integrated on the optical fiber using the surface tension of the material to install natural formation. In addition, the polymer microbottle resonator is very well integrated. The result makes it possible for packaging the polymer microbottle resonator into a highly stable structure. In this paper, optical microbottle resonators prepared by silica material and Ultraviolet-Curable Adhesive (UCA) material are studied. The preparation methods for the two kinds of microbottle resonators are demonstrated. More specifically, silica microbottle resonators were prepared by the arc discharge method, and UCA polymer microbottle resonators were fabricated by the self-assembling

technology. For silica microbottle resonators, the coating layer of a single-mode optical fiber was peeled off firstly and the end of the optical fiber was melted with high voltage discharge so that it formed a microsphere under the action of surface tension. Then, another optical fiber was moved close to the microsphere, and a microbottle resonator could be formed after multiple discharges around the area between the microsphere and the fiber. For UCA microbottle resonators, the polymer material UCA NOA61 is selected because the UCA material has a good light transmission and thermo-light coefficient, and can be cured under ultraviolet light. These properties make it easy to make a microbottle resonator. The self-assembling technology is used to fabricate UCA microbottle resonators. The UCA microbottle resonator was formed through the natural process. Firstly, a tapered fiber was made with the help of the heat-and-pull technique, then an appropriate amount of NOA61 droplets were transferred to the conical transition area above the fiber cone waist. As a result, NOA61 droplets would be self-assembled on the fiber cone because of its own gravity and surface tension to form a flat elongated structure. Subsequently, the NOA61 droplets attached to the tapered fiber were solidified by an ultraviolet lamp. Finally, the samples were placed into a temperature box to heat it and solidify them completely. In the test system, a broadband source in the communication band was a light source to excite the WGMs in the microbottle resonator. The output was detected by an optical spectrum analyzer. In addition, a tapered fiber, fabricated by using the heat-and-pull technique, is chosen as a waveguide to excite WGMs. The basic properties of the two kinds of different materials microbottle resonator were analyzed by a coupled tapered optical fiber. The quality factor of the silica microbottle resonator was 4.683×10^4 and the quality factor of the UCA microbottle resonator was 3.353×10^4 , correspondingly. The quality factors of the two kinds of microbottle resonators are very close. Temperature sensing applications based on the microbottle resonators were tested. The experimental results show that the sensitivity of the silica microbottle resonator is $11.13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ when the temperature rises and $10.25 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ when the temperature drops. The sensitivity of the UCA microbottle resonator is $111.89 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ when the temperature rises and $102.02 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ when the temperature drops. Both of them maintain a good consistency when rising and falling. In particular, the temperature sensitivity based on the UCA microbottle resonator is 10 times higher than that of the Silica microbottle resonator. The demonstrated sensors based on our microbottle resonator have the advantages of small size, low price, good plasticity and repeatability, and high sensitivity, and have potential applications in the field of temperature sensing.

Key words: Optical microcavity; Sensor; Temperature; Whispering gallery mode

OCIS Codes: 140.3948; 140.3410; 140.5960