

空心微瓶谐振腔的封装及折射率传感特性研究

赵帅昌 王梓杰 刘笑尘 汪柯红 陈溢琦 杨勇 张琦 张小贝

Package of hollow micro-bottle resonator and refractive index sensing properties

ZHAO Shuaichang, WANG Zijie, LIU Xiaochen, WANG Kehong, CHEN Yiqi, YANG Yong, ZHANG Qi, ZHANG Xiaobei

引用本文:

赵帅昌, 王梓杰, 刘笑尘, 等. 空心微瓶谐振腔的封装及折射率传感特性研究[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 1001–1006. DOI: 10.5768/JAO202243.0508002

ZHAO Shuaichang, WANG Zijie, LIU Xiaochen, et al. Package of hollow micro-bottle resonator and refractive index sensing properties[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(5): 1001–1006. DOI: 10.5768/JAO202243.0508002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

毛细管内嵌微球谐振腔的温度传感特性研究

Temperature sensing characteristics of a microsphere resonator embedded in a capillary

应用光学. 2021, 42(5): 926–931 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508001>

高功率固体激光器增益非均匀分布引起的效能亏损效应研究

Efficiency loss induced by non-uniform gain distribution in high power solid state lasers

应用光学. 2019, 40(4): 542–550 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401003>

高灵敏度光纤应变传感器

High sensitive fiber strain sensor

应用光学. 2017, 38(5): 848–851 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0508002>

基于平面波导激励的修正长程表面波的传感器研究

Modified long-range surface plasmon wave sensor based on planar waveguide excitation

应用光学. 2018, 39(2): 246–251 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0205002>

光子晶体方形谐振器波分解复用的特性

Wavelength division demultiplexing characteristics of photonic crystal square resonator

应用光学. 2018, 39(1): 157–164 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0108002>

侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器

Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor

应用光学. 2019, 40(3): 511–516 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 05-1001-06

空心微瓶谐振腔的封装及折射率传感特性研究

赵帅昌, 王梓杰, 刘笑尘, 汪柯红, 陈溢琦, 杨 勇, 张 琦, 张小贝

(上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

摘 要: 为提高传感器的稳定性和便携性, 提出一种基于空心微瓶谐振腔的折射率传感器, 对系统进行封装并对其折射率传感特性进行研究。仿真分析不同壁厚下空心微瓶谐振腔径向回音壁模式的光场分布, 光场在微瓶内部的占比随着器件壁厚的减少而增加, 有利于提高传感灵敏度。为减小空心微瓶谐振腔的壁厚, 利用氢氟酸对石英毛细管进行腐蚀, 使用光纤熔接机制备了薄壁空心微瓶谐振腔。采用紫外胶将耦合系统封装固定在载玻片上, 器件稳定性和便携性得到提升。研究了封装器件在不同折射率匹配液下的传感特性, 器件传感灵敏度为 26.50 nm/RIU。该传感器具有稳定性强、灵活性高、损耗小等优点, 在光微流控折射率检测方面拥有很大的应用潜力。

关键词: 空心微瓶谐振腔; 回音壁模式; 封装传感器; 折射率传感; 光微流控

中图分类号: TN253

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0508002

Package of hollow micro-bottle resonator and refractive index sensing properties

ZHAO Shuaichang, WANG Zijie, LIU Xiaochen, WANG Kehong, CHEN Yiqi, YANG Yong,
ZHANG Qi, ZHANG Xiaobei

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: To improve the stability and portability of the sensor, a refractive index sensor based on hollow micro-bottle resonator was proposed to package the system and study its refractive index sensing properties. The optical field distribution of radial echo-wall mode of hollow micro-bottle resonator under different wall thicknesses was simulated and analyzed. The proportion of the optical field inside the micro-bottle increased with the decrease of wall thickness of device, which was beneficial to improve the sensing sensitivity. To reduce the wall thickness, the quartz capillary was etched by hydrofluoric acid, which was used to fabricate the thin-wall hollow micro-bottle resonator by fusion splicer. The coupling system was packaged and fixed on a slide by using UV adhesive, which enhanced the stability and portability of the sensor. Finally, the sensing characteristics of the packaged device under different refractive index matching fluids were studied and the sensing sensitivity was 26.50 nm/RIU. The proposed sensor has the advantages of high stability, high flexibility and low loss, which has great application potential in optofluidic refractive index detection.

Key words: hollow micro-bottle resonator; echo-wall mode; packaged sensor; refractive index sensing; optofluidic

引言

回音壁模式 (whispering gallery mode, WGM) 光学谐振腔基于光的全反射原理将光限制在其内

部, 拥有极高的品质因子 (quality factor, Q 值) 和较小的模式体积, 因此受到人们的广泛关注。WGM 谐振腔主要包括微球腔^[1-3]、微盘腔^[4-5]、微环腔^[6-7]、

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-26

基金项目: 国家自然科学基金 (62022053, 61875116); 111 计划 (D20031); 上海市科委项目 (22010500100, 22ZR1424800)

作者简介: 赵帅昌 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事空心微瓶谐振腔折射率传感和磁场传感研究。

E-mail: shuaichangzhao@shu.edu.cn

通信作者: 张小贝 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事特种光纤器件、光学谐振腔和光纤传感研究。E-mail: xzbzhang@shu.edu.cn

微柱腔^[8-9]和微瓶腔^[10-11]等。微柱腔和微瓶腔相较于其他谐振腔不仅支持环绕赤道面传播的径向 WGM, 还支持沿轴向传播的轴向 WGM^[12]。由于微瓶腔的非球面特性, 轴向回音壁模式被很好地限制在其 2 个转折点之间, 增强了对光的限制能力, 因此微瓶腔相较于微柱腔拥有更高的 Q 值。空心微瓶谐振腔拥有天然的微流体通道, 可以检测其内部微流体的变化, 使其成为微流检测识别的重要平台, 因此被广泛用于生物传感^[13-14]、流体识别^[15]、纳米粒子检测^[16]、流速传感^[17-18]等领域。为了有效激发 WGM, 通常使用光纤融锥耦合空心微瓶谐振腔, 其耦合效率可以达到 99%^[19]。然而, 传统的光纤融锥耦合系统容易受到外界环境的干扰, 并且灵活性差, 限制了其实际应用^[20]。因此为了提高整个耦合系统的稳定性和灵活性, 需要对整个耦合系统进行封装。

目前, 研究者已经提出了几种光纤融锥耦合 WGM 谐振腔的封装方案。2011 年, 中北大学的 Y. Yan 等人提出了点封装方法对微球谐振腔进行封装^[21]。该方法通过在光纤融锥的耦合区域滴入少量低折射率紫外胶, 对耦合区域进行局部封装。该方法提高了耦合系统的稳定性, 但操作过程比较复杂。2013 年, 南安普顿大学的 P. Wang 等人提出了一种全封装方法对微球谐振腔进行封装^[22]。该方法通过低折射率的紫外胶将整个光纤融锥耦合系统包裹, 避免了外界环境的干扰且显著提高了系统稳定性, 但是其引入大量的紫外胶不可避免地会降低谐振腔的 Q 值。2015 年, 中国科技大学的 Y. Dong 等人提出了一种新的封装方法对微球谐振腔进行封装^[23]。该方法通过石英玻璃管和 2 个石英玻璃片将整个耦合系统封装, 避免了在耦合区域引入紫外胶, 降低了损耗且稳定性强, 但是操作过程比较复杂。2016 年, 复旦大学的 T. Tang 等人提出了一种改进的全封装方法对微泡谐振腔进行封装^[24]。通过紫外胶将整个耦合系统封装在自制的玻璃支架上, 提高了系统的稳定性和便携性, 但是该方法隔离了回音壁模式与外加介质的相互作用。2020 年, 北京邮电大学的 D. Yang 等人通过改进的全封装方法对微泡谐振腔进行封装^[25]。该方法通过隔离微泡腔与外界环境使稳定性得到了提高, 但是减少了回音壁模式与外界介质的作用并引入损耗。2021 年, 上海大学的 Z. Wang 等人提出了一种改进的全封装方法对微瓶腔进行封装^[18]。该方法优化了封装步骤, 操作

简单且稳定性强, 但是同样减少了回音壁模式与外界介质的相互作用。

为了克服上述问题, 本文提出了一种改进的微瓶封装方法, 并将其用于折射率传感。该封装方法使用紫外胶将耦合系统封装在载玻片上, 提高了系统稳定性的同时使其具有便携性。在器件制备中, 通过氢氟酸腐蚀石英毛细管内壁减小其壁厚, 使用光纤熔接机制备了薄壁空心微瓶谐振腔。研究了封装空心微瓶谐振腔的折射率传感特性。

1 工作原理

图 1(a) 展示了空心微瓶谐振腔与光纤融锥耦合系统示意图。光纤熔锥中的光通过倏逝场耦合进入空心微瓶谐振腔中, 与空心微瓶谐振腔中的微流体发生相互作用, 随着微流体折射率的改变, WGM 谐振波长发生偏移。图 1(b) 展示了空心微瓶谐振腔的横截面示意图。空心微瓶谐振腔在径向方向可以分为 3 层结构, 即外部的空气层、中间的石英壁层和内部的微流体层。

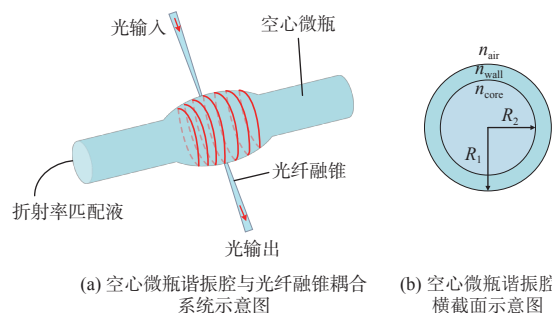


图 1 空心微瓶谐振腔与光纤融锥耦合示意图与空心微瓶谐振腔的横截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hollow micro-bottle resonator coupled with tapered fiber and cross section of micro-bottle structure

空心微瓶谐振腔中 WGM 与微流体的相互作用程度取决于径向回音壁模式在空心微瓶谐振腔内部的光场占比。回音壁模式的径向分布可以表示为^[24]

$$E_r(r) = \begin{cases} AJ_m(n_{\text{core}}k_\varphi r) & r \leq R_2 \\ BJ_m(n_{\text{wall}}k_\varphi r) + CH_m(n_{\text{wall}}k_\varphi r) & R_2 < r \leq R_1 \\ DH_m(n_{\text{air}}k_\varphi r) & r > R_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: J_m 和 H_m 分别是 m 阶的 Bessel 函数和 Hankel 函数; k_φ 是波矢; n_{air} 、 n_{core} 和 n_{wall} 分别是空气、空心

微瓶谐振腔内部微流体和微瓶壁的折射率; R_1 和 R_2 分别是空心微瓶谐振腔的外部半径和内部半径; A 、 B 、 C 和 D 是与边界连续条件相关的系数。

我们基于有限元法 (COMSOL 软件) 仿真了不同壁厚下空心微瓶谐振腔的光场分布。入射光波长设置为 1 500 nm, $R_1 = 114 \mu\text{m}$ 。 n_{air} 、 n_{core} 和 n_{wall} 分别设置为 1.0、1.33 和 1.44。仿真结果如图 2 所示。随着空心微瓶谐振腔的壁厚减少, 光场逐渐向空心微瓶谐振腔的内壁靠近, 并且有部分光场进入空心微瓶谐振腔的内部, 内部光场占比增加, 可以增强倏逝场与内部液体的相互作用, 因此, 减小微瓶壁厚有利于提高传感灵敏度。

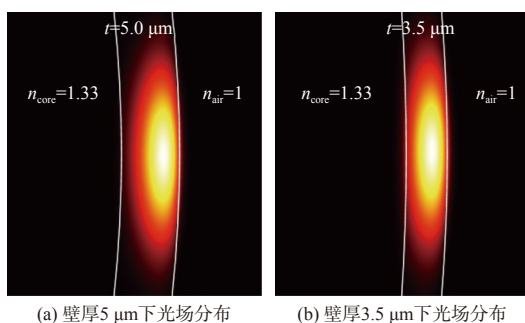


图 2 不同壁厚下空心微瓶谐振腔的光场分布

Fig. 2 Optical field distribution of hollow micro-bottle resonator with different wall thicknesses

空心微瓶谐振腔的折射率传感原理是检测 WGM 谐振波长的偏移。随着空心微瓶谐振腔内部微流体折射率的改变, 空心微瓶谐振腔的有效折射率发生变化, 最终导致 WGM 谐振波长发生偏移, 偏移量可以表示为^[26]

$$\Delta\lambda = \eta \frac{\lambda}{n_{\text{eff}}} \Delta n_{\text{core}} \quad (2)$$

式中: λ 是谐振波长; n_{eff} 是空心微瓶谐振腔的有效折射率; η 是光场在微流体中的占比。因此, 当空心微瓶谐振腔内部微流体折射率增加时, WGM 谐振波长发生红移。

2 器件的制备与封装

空心微瓶谐振腔是基于外径和内径分别为 125 μm 和 75 μm 的去涂覆层石英毛细管 (Innosep TSP075150) 制备而成。为制备薄壁空心微瓶谐振腔, 通过氢氟酸腐蚀减小石英毛细管壁厚, 腐蚀装置如图 3(a) 所示。实验中截取一段长度为 50 cm 的石英毛细管, 通过紫外胶将其与 1 mL 的注射器相连接。通过注射器吸取浓度为 20% 的氢氟酸溶

液, 利用注射泵以 20 $\mu\text{L}/\text{min}$ 的速率将氢氟酸溶液注入到石英毛细管中, 氢氟酸废液通过塑料烧杯收集。图 3(b) 展示了腐蚀前后石英毛细管的横截面示意图, 腐蚀 75 min 后得到壁厚为 9.8 μm 的石英毛细管。

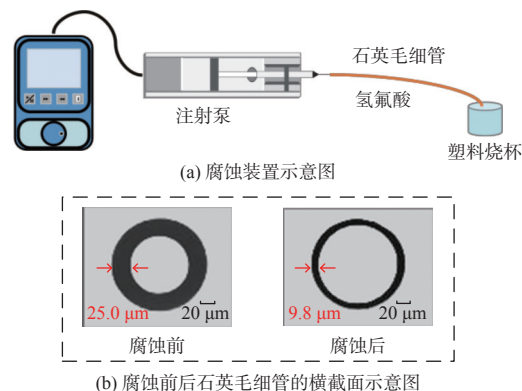


图 3 石英毛细管的腐蚀实验装置和腐蚀前后横截面示意图
Fig. 3 Schematic of corrosion experimental device and cross section of quartz capillary before and after corrosion

空心微瓶谐振腔的制备过程如图 4 所示。通过光纤熔接机 (FITEL S179) 电极放电对腐蚀后石英毛细管的一端进行密封。将石英毛细管的另一端与气压泵连接, 对石英毛细管内部加压, 如图 4(a) 所示。在放电强度为 20 bit 和放电时间为 45 ms 的条件下, 利用光纤熔接机电极放电使石英毛细管受热膨胀, 形成瓶装结构, 如图 4(b) 所示。

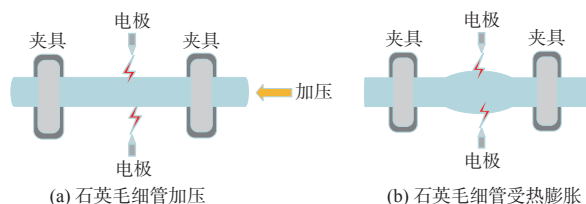


图 4 空心微瓶谐振腔的制备过程

Fig. 4 Fabrication process of hollow micro-bottle resonator

为了有效激发空心微瓶谐振腔的 WGM, 使用光纤融锥进行耦合。但是, 光纤融锥和空心微瓶谐振腔的耦合位置容易改变, 且稳定性较差。因此, 为了保证光纤融锥和空心微瓶谐振腔耦合位置的稳定, 对整个结构进行封装显得至关重要, 封装过程如图 5 所示。通过熔融拉锥法制备锥腰直径为 2 μm 的光纤融锥, 将其放置在预先准备好的载玻片上。使用紫外胶将光纤融锥的两端固定, 避免其移动。在显微镜的监测下, 使用三维调整架精密调节空心微瓶谐振腔和光纤融锥的耦合位置, 当光谱分析仪上出现稳定的回音壁模式后, 使

用紫外胶将空心微瓶谐振腔的两端固定到载玻片上。这种封装方法避免了在耦合区域引入紫外胶,并且稳定性强,整个器件可以随着载玻片灵活移动,从而提高了整个器件的实用性。

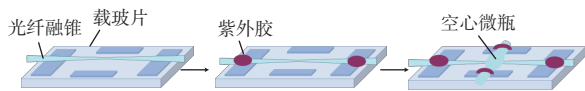
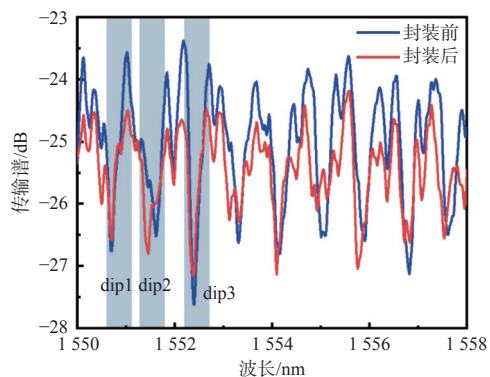


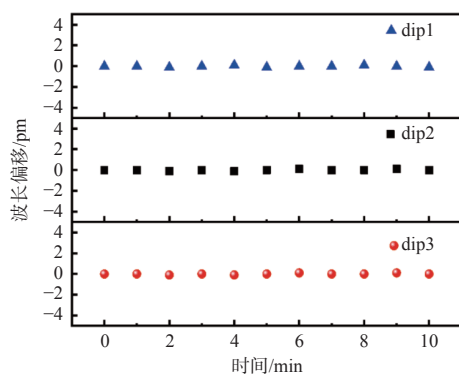
图5 传感器的封装过程

Fig. 5 Package process of sensor

图6(a)展示了空心微瓶谐振腔封装前后的传输谱变化情况。在空心微瓶谐振腔两端滴入紫外胶对其封装后,传输谱的形状基本不变,仅传输损耗略微增加,这是由于紫外胶重力导致的空心微瓶谐振腔和光纤融锥接触程度增加。为测试封装后该器件的稳定性,使用光谱分析仪实时记录封装后传输谱的变化情况,然后在一个自由光谱范围内选择1550.704 nm、1551.456 nm和1552.384 nm处的谐振模式来检测其稳定性,并分别标记为dip1、dip2和dip3。图6(b)展示了这3个谐振模式对应的谐振波长在10 min内的偏移情况。结果表



(a) 封装前后传输谱的变化情况



(b) 封装后传感器的实时稳定性

图6 封装前后空心微瓶谐振腔的传输谱以及稳定性测试

Fig. 6 Transmission spectra of hollow micro-bottle resonator before and after package and stability test

明封装后的传输谱非常稳定,谐振波长基本保持不变,因此,封装后的传感器具有良好的稳定性。

3 实验结果与分析

折射率传感实验装置如图7所示。光从宽带光源的输出端传输到锥腰直径为2 μm的光纤融锥,光纤融锥的输出端连接到最小分辨率为0.02 nm的光谱分析仪(Yokogawa, AQ6370D)。实验中制备的空心微瓶谐振腔半径为114 μm,壁厚约为3.5 μm。空心微瓶谐振腔的一端通过铁氟龙套管连接到注射泵中。实验中折射率匹配液通过不同浓度的甘油溶液制备,其相应折射率可由阿贝尔折射率分析仪测得。注射泵以20 μL/min的速率将折射率匹配液注入到空心微瓶谐振腔中,匹配液折射率的变化引起WGM谐振波长偏移,因此可以得到器件谐振波长的折射率传感响应。

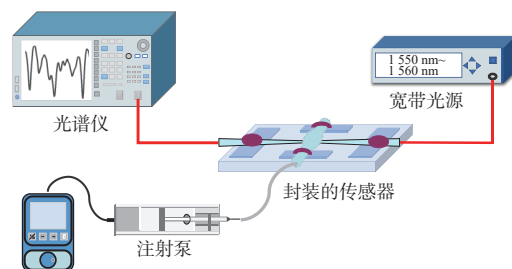
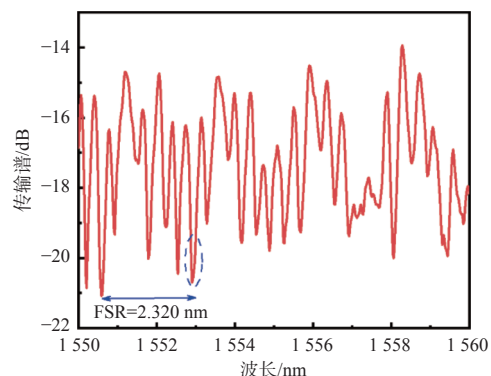


图7 折射率传感实验装置

Fig. 7 Schematic diagram of refractive index sensing experimental device

图8(a)展示了在1550 nm~1560 nm范围内空心微瓶谐振腔的传输谱。实验上测得WGM的自由光谱范围(free spectra range, FSR)为2.320 nm,与理论公式 $FSR = \lambda^2 / 2n_{eff}\pi R_1 = 2.334$ nm计算结果相一致。图8(b)是对1552.9 nm处的谐振谱形进行洛伦兹拟合的结果。根据空心微瓶谐振腔Q值的计算公式 $Q = \lambda / \delta_\lambda$,其中 δ_λ 为该谐振模式的半高全宽,得到该谐振模式的Q值为 8.724×10^3 。



(a) 空心微瓶谐振腔的传输谱

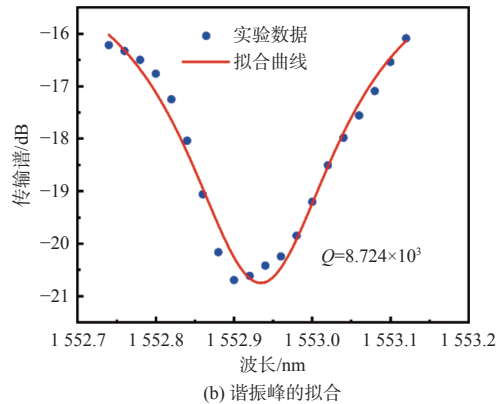
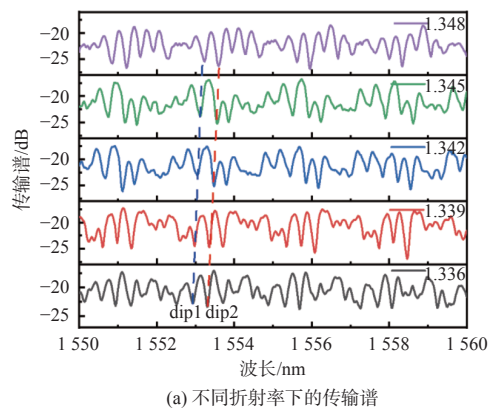


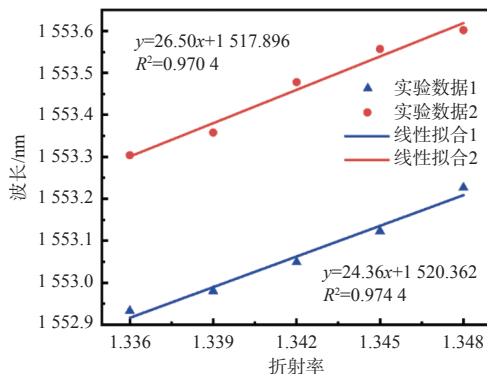
图8 空心微瓶谐振腔的传输谱及其谐振峰拟合

Fig. 8 Transmission spectrum of hollow micro-bottle resonator and its resonance peak fitting

图9(a)展示了空心微瓶谐振腔内部匹配液折射率从1.336增加到1.348时的传输谱响应。谐振波长dip1和dip2对应2个WGM模式,其变化趋势分别用蓝色和红色虚线表示,随着空心微瓶谐振腔内部匹配液折射率增加,谐振波长发生红移。2个谐振波长折射率响应的线性拟合曲线如图9(b)所示。2个模式都表现出良好的线性度,折



(a) 不同折射率下的传输谱



(b) 谐振波长与折射率的变化曲线

图9 空心微瓶谐振腔传输谱的折射率传感特性

Fig. 9 Refractive index sensing characteristics of transmission spectrum of hollow micro-bottle resonator

射率灵敏度分别为 24.36 nm/RIU 和 26.50 nm/RIU。2个模式灵敏度区别是由于WGM的模式阶次不同,不同阶次模式有效折射率不同。

4 结论

本文研究了空心微瓶谐振腔的制备、封装以及折射率传感特性。理论仿真了空心微瓶谐振腔的径向WGM在不同壁厚下的分布情况。随着空心微瓶谐振腔壁厚的减少,光场在空心微瓶谐振腔内部微流体中的比例增加,有利于提高传感灵敏度。为了减小空心微瓶谐振腔的壁厚,通过氢氟酸腐蚀石英毛细管内壁,使用光纤熔接机电极放电制备了薄壁空心微瓶谐振腔。为了提高光纤融锥耦合系统的稳定性和便携性,对整个耦合系统进行封装。使用封装后的传感器进行折射率传感特性研究,实验中获得的最大折射率传感灵敏度为 26.50 nm/RIU。该封装后的传感器具有较高的稳定性、灵活性和灵敏度,可以广泛应用于折射率传感。

参考文献:

- [1] 孙航, 刘笑尘, 王梓杰, 等. 毛细管内嵌微球谐振腔的温度传感特性研究[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 926-931.
SUN Hang, LIU Xiaochen, WANG Zijie, et al. Temperature sensing characteristics of a microsphere resonator embedded in a capillary[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 926-931.
- [2] 刘笑尘, 谢严, 陈溢琦, 等. 光纤耦合双微球谐振腔及其模式分裂特性[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 140-148.
LIU Xiaochen, XIE Yan, CHEN Yiqi, et al. Fiber coupled double microsphere resonator and its mode splitting characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 140-148.
- [3] 张建辉, 徐鹏飞, 李小枫, 等. 高Q光学微球腔角速度传感效应验证[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 1057-1061.
ZHANG Jianhui, XU Pengfei, LI Xiaofeng, et al. Validation of high-Q optical microsphere resonator angular velocity sensor[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(6): 1057-1061.
- [4] 林春婷, 吴根柱, 汪成程, 等. 基于模式分裂现象的在纤式双微盘谐振腔[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 76-81.
LIN Chunting, WU Genzhu, WANG Chengcheng, et al. In-fiber double microdisk resonator based on mode splitting[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 76-81.
- [5] JIANG Xuefeng, XIAO Yunfeng, YANG Qifan, et al.

- Free-space coupled, ultralow-threshold Raman lasing from a silica microcavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(10): 101102.
- [6] 韩毅帅, 孙天宇, 贾慧民, 等. 氮化铝微环谐振腔临界耦合条件及制备工艺研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(5): 94-102.
- HAN Yishuai, SUN Tianyu, JIA Huimin, et al. Critical coupling condition and preparation technology of aluminum nitride microring resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 94-102.
- [7] 陈伟. 聚合物材料并联双环型温度传感器的设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(3): 495-498.
- CHEN Wei. Design of polymer parallel double-ring temperature sensor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 495-498.
- [8] ZHANG Yanan, ZHU Naisi, GAO Peng, et al. Magnetic field sensor based on ring WGM resonator infiltrated with magnetic fluid[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 493: 165701.
- [9] MELDRUM A, MARSIGLIO F. Capillary-type microfluidic sensors based on optical whispering gallery mode resonances[J]. *Reviews in Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, 3(3): 193-209.
- [10] 侯峰裕, 王梓杰, 余洋, 等. 空心微瓶谐振腔的曲率模型及其传输特性研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 1122-1128.
- HOU Fengyu, WANG Zijie, YU Yang, et al. Research on curvature model and transmission characteristics of hollow micro-bottle resonator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 1122-1128.
- [11] 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.
- [12] SENTHIL MURUGAN G, PETROVICH M N, JUNG Y, et al. Hollow-bottle optical microresonators[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20773-20784.
- [13] YU Xiaochong, TANG Shuijing, LIU Wenjing, et al. Single-molecule optofluidic microsensor with interface whispering gallery modes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(6): e2108678119.
- [14] GUO Zhihe, LU Qijing, ZHU Chenggang, et al. Ultra-sensitive biomolecular detection by external referencing optofluidic microbubble resonators[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12424-12435.
- [15] WANG Zijie, ZHANG Xiaobei, ZHANG Qi, et al. Monitoring and identifying pendant droplets in microbottle resonators[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 662-667.
- [16] WARD J M, YANG Yong, LEI Fuchuan, et al. Nanoparticle sensing beyond evanescent field interaction with a quasi-droplet microcavity[J]. *Optica*, 2018, 5(6): 674-677.
- [17] CHEN Zhenmin, GUO Zhihe, MU Xin, et al. Packaged microbubble resonator optofluidic flow rate sensor based on Bernoulli Effect[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36932-36940.
- [18] WANG Zijie, ZHANG Xiaobei, ZHAO Shuaichang, et al. High-sensitivity flow rate sensor enabled by higher order modes of packaged microbottle resonator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(12): 599-602.
- [19] CAI M, PAINTER O, VAHALA K J. Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(1): 74-77.
- [20] 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): 94-103.
- WANG Pengfei, LI Angzhen. Packaging and integration of whispering gallery modes optical microcavity devices[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 94-103.
- [21] YAN Yingzhan, ZOU Changling, YAN Shubin, et al. Robust spot-packaged microsphere-taper coupling structure for in-line optical sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(22): 1736-1738.
- [22] WANG Pengfei, DING Ming, LEE T, et al. Packaged chalcogenide microsphere resonator with high Q-factor[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131110.
- [23] DONG Yongchao, WANG Keyi, JIN Xueying. Packaged microsphere-taper coupling system with a high Q factor[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(2): 277-284.
- [24] TANG Ting, WU Xiang, LIU Liying, et al. Packaged optofluidic microbubble resonators for optical sensing[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 395-399.
- [25] YANG Daquan, DUAN Bing, WANG Aiqiang, et al. Packaged microbubble resonator for versatile optical sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4555-4559.
- [26] WHITE I M, FAN Xudong. On the performance quantification of resonant refractive index sensors[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1020-1028.