

## 封装型回音壁模式光学微腔器件稳定性研究

王梦宇, 刘霁阳, 李远松, 范乐康, 艾文成, 黄宇帆, 刘经钰, 吴涛, 谢成峰\*, 郭状\*\*, 万生鹏, 伏燕军

南昌航空大学测试与光电工程学院无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

**摘要** 回音壁模式光学微腔凭借其超高的品质因数和极小的模式体积在微型激光器、光学滤波器、非线性转换器 and 光学传感器等光子学器件中扮演着重要的角色。然而, 这类微腔光学系统的谐振特性受外界环境的影响非常大, 需要消除外界环境对微腔器件的干扰才能进入外场应用。研究了回音壁模式光学微腔的间接封装技术, 封装型微球腔器件的  $Q$  值达到  $5.1 \times 10^7$ 。研究了封装型微腔器件的稳定性, 分析了谐振模式透过率、谐振点偏移和半峰全宽的艾伦方差。结果显示, 设计的封装型微球腔器件有着很强的稳定性, 并且具有强鲁棒性、便携性、隔离性、集成性等诸多优势, 推动了微腔器件的实用化。

**关键词** 光纤光学; 光学微腔; 耦合; 封装器件; 稳定性; 艾伦方差

**中图分类号** TN248.1

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1713002

## 1 引言

回音壁模式微腔<sup>[1]</sup>将光波限制在腔体内来回反射, 使光子几乎无损耗地沿环路持续传播, 从而实现光子的选择和增强, 在特定条件下还能实现激光输出。近二十年来, 由于具备超高品质因子( $Q$ )和超低模式体积的优势<sup>[2]</sup>, 回音壁模式微腔器件在微型激光器<sup>[3]</sup>、高灵敏度传感器<sup>[4]</sup>、光学滤波器<sup>[5]</sup>、光电陀螺仪<sup>[6]</sup>等领域中表现出越来越重要的应用价值。然而, 微腔光学系统十分容易受到外界环境的影响, 诸如环境压力变化、机械振动、灰尘以及温度波动等<sup>[7-8]</sup>, 这给微腔器件的实用化带来了巨大的挑战。此外, 材料损耗和表面粗糙度是影响微腔  $Q$  值的重要因素, 同时氧化硅微腔暴露在正常的空气中会吸附空气中的水分子<sup>[9]</sup>, 造成腔体表面不均匀, 使得微腔  $Q$  值下降。因此, 将微腔光学系统进行有效封装、隔绝外界环境的微腔封装技术是其走向实际应用的重要手段<sup>[7]</sup>。

激发微腔内的回音壁模式需采用波导耦合的方式<sup>[10]</sup>, 而为了实现波导与微腔的高效耦合, 实验上需要精密调节两者之间的耦合间距<sup>[11]</sup>, 这严重阻碍了微腔器件走向实用化的进程。为了摆脱微腔与波导耦合受到的限制, Yan 等<sup>[12]</sup>提出了利用低折射率紫外胶将氧化硅微球腔与波导耦合点进行局部固化的封装方式, 这类封装方法被称为点封装, 点封装的方式不仅大大提高了耦合系统的鲁棒性, 而且封装后微球腔的  $Q$  值达到了  $1.02 \times 10^7$ 。考虑到点封装对操作要求较

高, 难以实现大规模制作, 2011 年, Yan 等<sup>[9]</sup>进一步提出了利用紫外胶将氧化硅微球腔与波导整个耦合系统包裹在一起的全包裹封装方式, 封装后微球腔  $Q$  值能达到  $5 \times 10^6$ 。2013 年, Wang 等<sup>[13]</sup>利用紫外胶将  $\text{As}_2\text{S}_3$  微球腔与波导进行全包裹封装, 在  $\text{As}_2\text{S}_3$  微球腔封装器件上激发的  $Q$  值高达  $1.8 \times 10^5$ 。2016 年, Tang 等<sup>[14]</sup>采用全包裹封装方法封装了氧化硅微泡腔。2020 年, Yang 等<sup>[15]</sup>验证了全包裹氧化硅微泡腔的热响应。2021 年, Wang 等<sup>[16]</sup>采用全包裹封装方法封装了三维结构的氧化硅微瓶腔,  $Q$  值高达  $1.8 \times 10^5$ , 验证了该方法在流体传感中的应用前景。全包裹封装具有操作要求小的优势, 将耦合系统与外界环境隔开, 使器件具有很好的隔离性, 但系统中的倏逝场无法与外界介质发生相互作用, 因此微腔器件无法用于基于倏逝场的传感应用。采用紫外胶的方式也会造成  $Q$  值的降低, 这主要是胶的吸收和辐射损失导致的。另外, 低折射率紫外胶等材料会发生老化问题, 用这些材料封装的微腔器件在较长时间后性能可能会发生较大变化, 这也对其实用化带来困难。

为了进一步解决耦合系统的耦合问题, 2012 年, Monifi 等<sup>[17]</sup>通过微加工的方式制备了一排小型支撑墙, 用来支撑悬置的光纤波导, 提升了机械稳定性和耦合系统的鲁棒性, 这种封装方式对加工工艺要求较高, 且加工成本较高。2014 年, Vanier 等<sup>[18]</sup>将  $\text{As}_2\text{S}_3$  微球腔与光纤波导封装在一个密闭的玻璃管中, 隔离效果较好, 在耦合系统中观察到多至五阶拉曼的级联拉曼散射

**收稿日期:** 2021-08-20; **修回日期:** 2021-10-06; **录用日期:** 2021-12-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(51865040, 62101230)、江西省自然科学基金(20202BABL212011, 20202BABL212010, 2020BABL212013)、江西省教育厅科技项目(GJJ190508)

**通信作者:** \*xcf@nchu.edu.cn; \*\*guoz@nchu.edu.cn

效应。2018 年, Herter 等<sup>[19]</sup>采用 3D 打印的固定结构对氧化硅微球腔与波导进行封装,验证了其在温度传感上的应用。这类封装方式被统称为间接封装,常被应用于聚合物微柱腔的耦合系统中<sup>[20]</sup>。然而,在这类封装方式中,微腔与波导的耦合一旦确立,便无法对其再行调控,直接将耦合系统置于一个固定的结构内部,也无法确定其耦合状态,这类封装方式仍需进一步研究。

本文设计了一种基于回音壁模式微腔与光纤锥波导耦合系统的一体化间接封装型器件,未改变封装前已调整好的耦合状态,并将封装器件固定于密封且干净的透明玻璃盒子中。封装器件具有很强的抗干扰能力,避免了外界环境的干扰,兼顾了超高 Q 值、强鲁棒性、强稳定性、便携性等诸多优良特性,并可以长时间保持。此外,重点对微腔封装型器件的稳定性进行了分析,标定了微腔谐振波长的稳定性,实现了对稳定性的检测以及稳定时间的测量,为微腔器件的稳定性分析提供了新思路。最后,将设计的封装型器件与其他封装方式的器件进行了综合对比。

## 2 微腔制备与封装

目前制备回音壁模式微球腔主要有三种方式:1)溶胶-凝胶法<sup>[21]</sup>;2)大功率 CO<sub>2</sub> 激光器加热法<sup>[10]</sup>;3)电弧放电法<sup>[22]</sup>。溶胶-凝胶法使用有机材料,制备的微球腔尺寸通常在 nm 级别,光损耗较大,难以制作出超高 Q 值的微球腔。大功率 CO<sub>2</sub> 激光器加热法将 CO<sub>2</sub> 激光器发出的激光聚焦于裸纤处使氧化硅熔化,熔化的氧化硅在表面张力的作用下形成光滑球形,其缺点在于使用仪器贵重且微球的圆度和光滑度较难控制。本文采用电弧放电法制备了  $\mu\text{m}$  级别的光学微球腔,其优点在于简单可控。用实验室自制的光纤熔接机熔融常规单模光

纤。同时,通过定量改变放电功率、放电次数,可制得高圆度微球,制作过程如下:首先去除普通单模光纤的涂覆层,露出裸纤,将裸纤固定于熔接机两端电极中间,通过电极放电,电弧的作用使氧化硅玻璃熔化。熔化后的氧化硅在表面张力的影响下形成球形微腔,通过控制放电功率及放电次数,微腔表面不断得到修整,这样就制作出一个具有光滑表面、圆度极高的高 Q 值微腔。图 1 所示为上述方法制备得到的微球腔,直径  $D=284\ \mu\text{m}$ ,可以看出,表面非常光洁,其中 SEM 为扫描电镜。

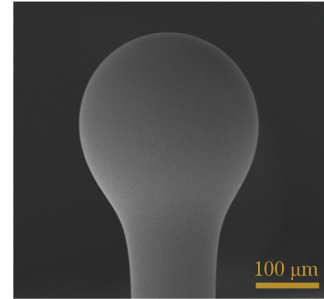


图 1 电弧放电法制备得到的微球腔 SEM 图

Fig. 1 SEM image of microsphere cavity prepared by arc discharge method

由于光学微腔的谐振模式是被束缚在腔内的,需要通过倏逝场将波导器件和微腔耦合。为了高效激发出腔内的谐振模式,我们通过热拉法制备了直径为  $2\ \mu\text{m}$  的光纤锥波导。微球腔-光纤锥耦合系统的封装流程如图 2 所示。首先,将微球腔嵌套于玻璃管中,光纤锥则被紫外光固胶固定在玻璃片上的两块小石英片之间。这两块小石英片的作用是抬高光纤锥,一方面可以方便成像时照明,另一方面保证微球腔与光纤锥耦合时玻璃管与玻璃片不发生接触。其次,使用一个高精度的三维调整平台控制光纤锥与微球腔的相对位

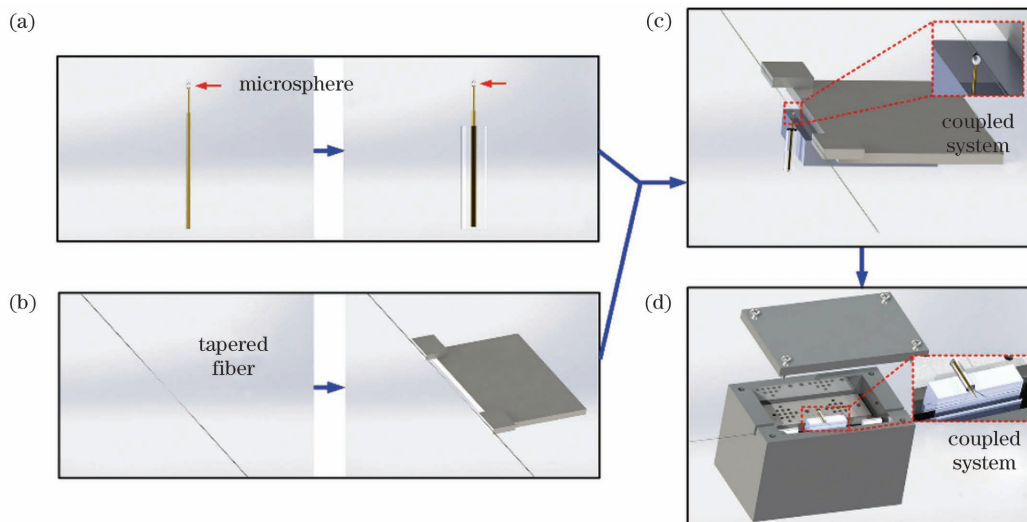


图 2 微球腔的封装步骤示意图。(a)将微球腔嵌套于玻璃管中;(b)将光纤锥固定于玻璃片上;(c)使用高精度三维调整平台控制光纤锥与微球腔的相对位置;(d)将固定的三维结构放入玻璃盒内

Fig. 2 Schematics of microsphere cavity packaging steps. (a) Microsphere cavity is nested in glass tube; (b) tapered fiber is fixed on glass plate; (c) relative position between tapered fiber and microsphere cavity is controlled by high precision 3D adjustment platform; (d) three-dimensional structure is placed in glass box

置,通过固定于平台上方与侧面的高清电荷耦合器件 (CCD) 显微镜调节微球腔位置以实现较好的耦合,避免碰断光纤锥。然后再取出另一个玻璃片,将玻璃管和玻璃片同时固定。最后,将固定的三维结构放入一个干净的玻璃盒中,并在玻璃盒中放置一些干燥剂,以隔离微腔系统与外界环境。在对玻璃盒进行抽真空处理后,再用热熔胶将其密封,最后用两对螺丝旋扭机械密封玻璃盒,这样就完成了所有的封装过程。值得一提的是,封装过程中微腔与光纤锥保持接触,以物理接触的形式提高其抗振动性能。封装后的微腔器件直接接入光纤接头,方便集成于各类光纤系统中。

### 3 谐振特性分析

在完成微球腔耦合器件封装后,搭建光电测试系

统对封装器件进行谐振特性分析,系统如图 3(a) 所示。完整的探测系统包括可调谐激光器、物镜、偏振控制器(PC)、微球腔耦合器件、光电探测器(PD)、数字示波器、数据采集卡、信号发生器(AFG)、显微镜成像系统以及上位机系统。微球腔耦合器件如图 3(b) 所示,可调谐激光器的调谐范围由 AFG 提供的周期信号控制,激光器产生的一定波长的激光通过物镜耦合进入 PC,PC 控制进入腔内光的偏振态。为了更好观测封装器件的谐振特性,PD 将经过微腔的光信号转换成电信号后,电信号被分成两路,一路在示波器中观察,另一路被数据采集卡采集,信息被传输到上位机上进行处理。测试过程中可通过高清 CCD 显微镜观察微球腔与光纤锥的耦合位置,防止两者发生移位,微球腔与光纤锥的相对位置如图 3(c) 所示。

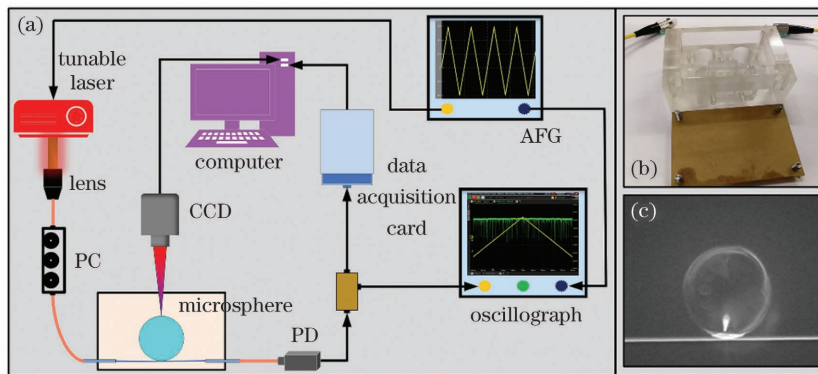


图 3 微腔封装器件谐振特性的观测系统。(a) 微球腔谐振模式激发装置;(b) 封装型微球腔实验装置图;(c) 光纤锥耦合微球腔的光学显微照片

Fig. 3 Observation system for resonance characteristic of packaged microresonator device. (a) Excitation device for resonance modes of microsphere cavity; (b) experimental device of packaged microsphere cavity; (c) optical micrograph of tapered fiber coupled microsphere cavity

将激光器的波长设置为 1550 nm 左右,利用 AFG 将频率扫描范围设置为 10 GHz,微腔封装器件的谐振光谱如图 4(a) 所示。可以看出,在 10 GHz 频谱范围内激发的谐振模式特别多,这得益于微球腔与光纤锥

波导良好的相位匹配<sup>[23]</sup>,微球腔内的大多数谐振模式被激发。这里的谐振模式除了包括微球腔中典型的基模和较低的径向模式之外,还包括了一些高阶的径向模式,图 5 为利用有限元法计算得到的微球腔在

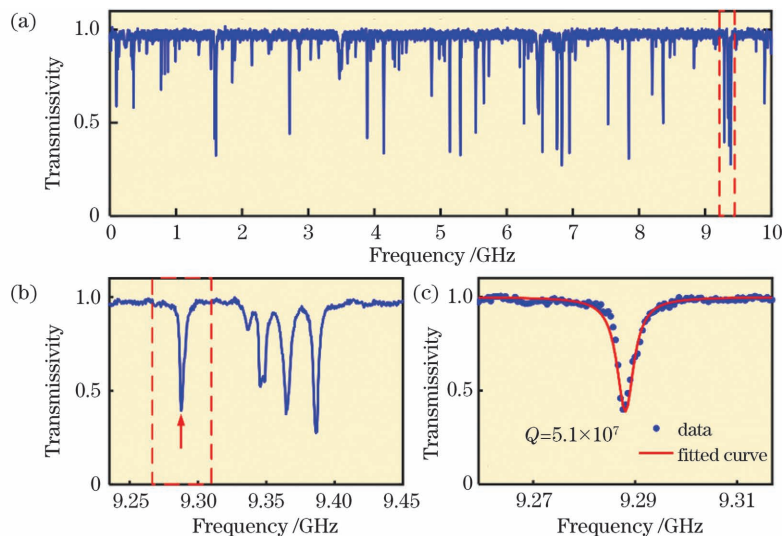


图 4 封装型微球腔谐振光谱。(a) 谐振光谱完整图;(b) 谐振光谱放大图;(c) 典型谐振谱及洛伦兹拟合曲线

Fig. 4 Resonance spectra of packaged microsphere cavity. (a) Total view of resonance spectrum; (b) magnified view of resonance spectrum; (c) typical resonance spectrum and Lorentz fitting curve



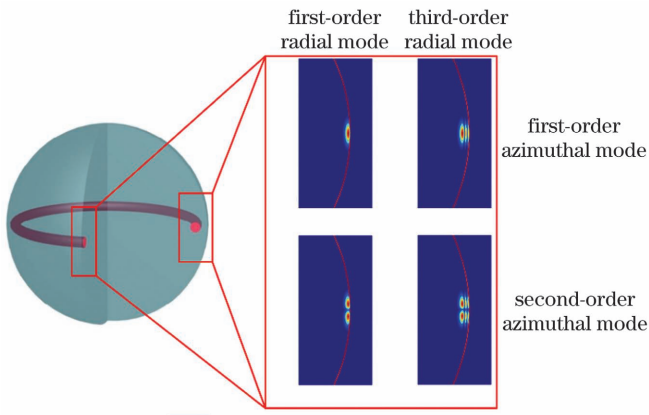


图 5 微球腔各阶模式下的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution under each mode of microsphere resonator

1550 nm 附近的基模和高阶模式。此外,对于正常完美的微球腔,不同阶方位角上的谐振模式存在兼并效应,具有相同的谐振波长。但是,在加工过程中,腔体会受重力的影响,腔体并不是完美的球体,或多或少存在一定偏心。这种偏心效应会使得方位角模式发生退兼并效应,致使谐振峰增加<sup>[24]</sup>。所以最后激发的微球腔谐振模式较多。

为了更好地展示谐振谱,将图 4(a)中矩形框内的部分谐振峰放大,如图 4(b)所示,可以观察到选取的几个谐振模式的透过率高,说明不同阶数的谐振模式在相同的波导耦合条件下具有不同的耦合效率,从而使得谐振峰表现出不同的透过率。如果需要定向提升某一特定波长处的透过率,可在封装前调节

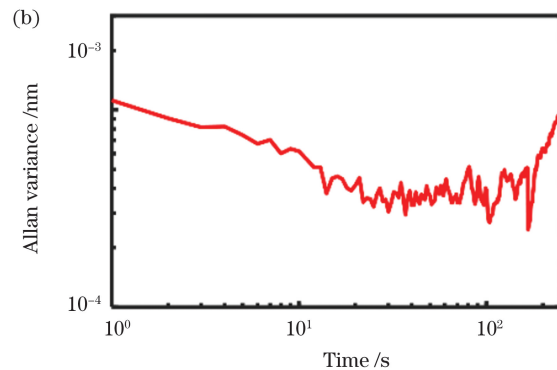
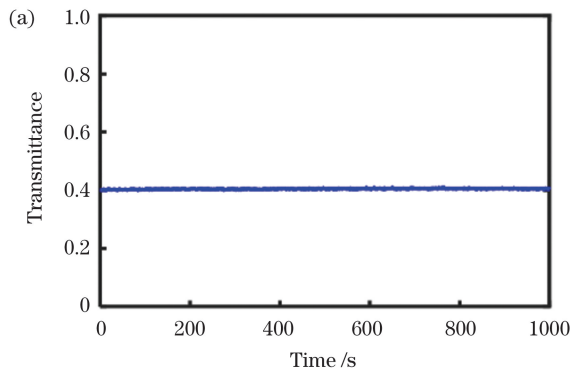


图 6 谐振模式透过率稳定性评估。(a)透过率随时间变化曲线;(b)透过率 Allan 方差

Fig. 6 Stability evaluation of resonance mode transmittance. (a) Transmittance versus time; (b) Allan variance of transmittance

从图 7(a)可以看出,以第一个谐振波长点作为参考点,谐振波长偏移量在观察范围内漂移了 5.4 pm,且谐振波长点呈现上升的趋势,漂移的方向为长波方向,处于红移状态。这是腔内的热效应和激光器工作波长偏移共同引起的<sup>[8, 25]</sup>,漂移量的大小由腔体材料的热膨胀系数和热折射系数决定,二者属于器件的固有特性,而且由于微球腔的 Q 值过高,腔内的热效应尤为明显。另外,激光器的工作波长随时间的延长存在一定的漂移,也在一定程度上影响谐振波长点的稳定性。谐振波长偏移量的 Allan 方差如图 7(b)所示,

微球腔与光纤锥的耦合间隙或调整微球腔与光纤锥的相对空间位置<sup>[11]</sup>。对图 4(b)中矩形框内的谐振峰进行洛伦兹拟合,如图 4(c)所示,通过测量谐振峰的半峰全宽( $\Delta f$ ),可得到 Q 值,为  $5.1 \times 10^7$ ,且大多数 Q 值超过了  $10^7$  量级。很明显封装的微球腔器件表现出了极高 Q 值,如此高的 Q 值可显著提高光学滤波器应用中的带宽并降低微型激光器和非线性转换器应用中的泵浦光阈值,具有重要的科学意义。

## 4 讨 论

为了测试微腔的稳定性,在数据采集卡采集到数据后,对封装型微腔器件谐振模式的透过率和谐振波长进行实时分析。为了描述封装型微腔器件的谐振性能稳定性,图 6 和图 7 分别给出了谐振模式的透过率和谐振波长点随时间的变化以及 Allan 方差。Allan 方差定义为数据平均值的样本方差,其反映了相邻两个采样段内平均频率差的起伏。Allan 方差可以用于表征噪声系数,Allan 方差越小则器件稳定性越好,稳定时间越长。实验选取到达最大信噪比的时间为处于稳定状态的临界时间。从图 6(a)可以看出,谐振模式的透过率在 0.4 上下漂移,其最大值为 0.4089,最小值为 0.3999,透过率变化量不超过 0.009,基本处于一个变化不大的数量值。由图 6(b)可以看出,透过率 Allan 方差呈数量级下降,在长达 200 s 的时间内下降趋势仍然十分明显,并且在整个观察时间内都处于同一数量级。可以肯定的是,谐振模式在长达 1000 s 的时间内处于一个稳定的状态。

波长偏移量 Allan 方差的数量级减小,最小值出现在 1 s 附近,波长的稳定时间明显受到了热效应的影响。图 7(c)展示了谐振模式的半峰全宽变化,波动范围在 0.0017 pm 内。半峰全宽的 Allan 方差如图 7(d)所示,半峰全宽 Allan 方差的数量级减小,其最小值出现在 23 s 附近,之后受到热效应的影响存在波动。后期可以考虑在封装器件内加入一套温度控制系统,消除热效应对器件稳定性带来的影响。此外,在封装型器件的后期应用中,还可以考虑加入频率锁定系统,对微腔的谐振波长点进行跟踪锁定。

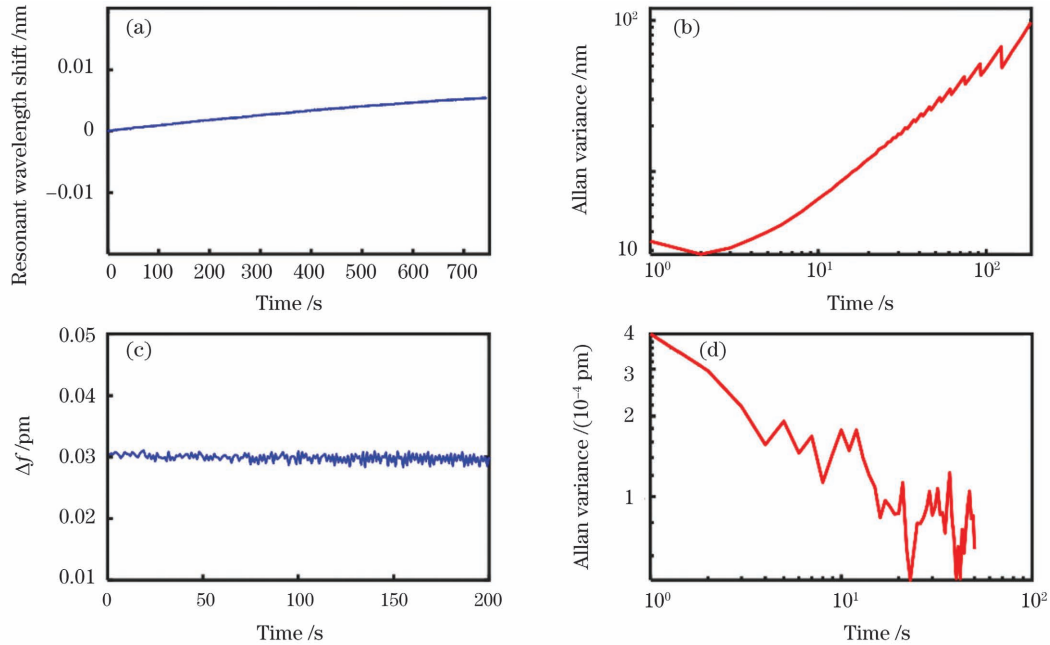


图 7 谐振波长点稳定性评估。(a)谐振波长偏移量随时间变化曲线；(b)谐振波长偏移量的 Allan 方差；(c)半峰全宽随时间的变化曲线；(d)半峰全宽的 Allan 方差

Fig. 7 Stability evaluation of resonance wavelength point. (a)Resonant wavelength shift versus time; (b)Allan variance of resonant wavelength shift; (c)  $\Delta f$  versus time; (d) Allan variance of  $\Delta f$

从上述实验结果来看,调整微腔与波导,使其具有极佳耦合特性,采用间接封装方式对氧化硅微球腔耦合系统进行封装,封装型微球腔器件的  $Q$  值提高到了  $5.1 \times 10^7$ ,是点封装微球腔器件  $Q$  值的 5 倍<sup>[12]</sup>,比全包裹封装微球腔<sup>[9]</sup>、全包裹封装微瓶腔器件<sup>[16]</sup>、全包裹封装微泡腔器件<sup>[14-15]</sup>等同类材料微球腔器件  $Q$  值基本高出 1~2 个数量级,比全包裹封装  $As_2S_3$  微球腔器件<sup>[13]</sup>  $Q$  值高出 2 个数量级;而相

比于其他的间接封装方式,比同类型材料间接封装型微腔器件<sup>[17-18]</sup>  $Q$  值高出 1 个数量级,比间接封装型聚合物微腔器件  $Q$  值高出 4 个数量级。不同封装型回音壁模式微腔的对比如表 1 所示。如此高的  $Q$  值显著提高了微腔器件在光学滤波器、微型激光器以及非线性转换器中的应用价值,并且封装微腔器件具有强稳定性、强鲁棒性、便携性、隔离性等诸多优良特性。

表 1 不同封装型回音壁模式微腔的对比

Table 1 Comparison of different packaged microcavities based on whispering-gallery mode

Material	Shape	Diameter / $\mu\text{m}$	Method	$Q$ factor	Ref.
$SiO_2$	Microsphere	300	Spot-packaged	$1.02 \times 10^7$	[12]
		340	Wholly-packaged	$5 \times 10^6$	[9]
	Microbottle	188	Wholly-packaged	$1.4 \times 10^5$	[16]
		246	Indirectly-packaged	$3.3 \times 10^6$	[19]
	Microbubble	80	Wholly-packaged	$5.03 \times 10^6$	[14]
		285	Wholly-packaged	$3.52 \times 10^6$	[15]
	Microtoroid	120	Indirectly-packaged	$4.5 \times 10^6$	[17]
	Microsphere	284	Indirectly-packaged	$5.1 \times 10^7$	This work
$As_2S_3$	Microsphere	110	Wholly-packaged	$1.8 \times 10^5$	[13]
Polymer	Microsphere	40	Indirectly-packaged	$1 \times 10^7$	[18]
	Microcylindrical cavity	240	Indirectly-packaged	$3 \times 10^3$	[20]

根据以上结果和分析可知:1)采用电弧放电法加工超光洁的微球腔,采用间接封装的方法对微球腔与光纤锥进行封装,封装型器件表现出了超高  $Q$  值,从加工到封装,过程都易于复制,成本低廉且操作简单;2)所设计的封装型器件隔离了外界环境,在不加顶端板时可应用于折射率检测及气体、生化物质传感等应

用中;3)设计的封装型微腔器件具有很强的稳定性和很强的抗干扰能力,在很大程度上避免了外界环境的干扰,可以长时间保持,并且兼顾了强鲁棒性、便携性等诸多优良特性;4)封装后的微腔器件直接接入了光纤接头,方便集成于各类光纤系统中,可直接应用于光学滤波器、光学陀螺仪、光电振荡器等系统中。相信这

种便携的具有良好鲁棒性的微腔器件将会得到广泛的应用,尤其在振动环境中。

## 5 结 论

提出了一种封装型回音壁模式光学微腔器件,该器件不仅具有强鲁棒性、强稳定性、强抗干扰能力、便携性等优异特性,而且具有超高品质因子。利用搭建的光电探测系统对间接封装的器件进行谐振特性分析,  $Q$  值达到  $5.1 \times 10^7$ , 高于点封装和全包裹封装方式。详细分析了封装型光学微腔的稳定性,引入 Allan 方差对微腔稳定性进行分析,谐振模式在长达 1000 s 的时间内处于一个相对比较稳定的状态。但由于热效应的影响,谐振点出现漂移,后续将通过引入温度控制系统和频率锁定系统来解决这个问题。所设计的器件在微型激光器、光学滤波器、光电陀螺仪、高灵敏度传感器、光学滤波器等系统中极具应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Vahala K J. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, 424 (6950): 839-846.
- [2] 邹长铃, 董春华, 崔金明, 等. 回音壁模式光学微腔: 基础与应用 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42(11): 1155-1175.  
Zou C L, Dong C H, Cui J M, et al. Whispering gallery mode optical microresonators: fundamentals and applications [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2012, 42 (11): 1155-1175.
- [3] Zhuang S J, Huang Y T, Peng L X, et al. Realization of an O-waveband laser based on cascaded stimulated Raman scattering of microspheres [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(27): 7572-7576.
- [4] Liu W Y, Li W, Wang R, et al. Magnetic sensor based on WGM hollow microbubble resonator filled with magnetic fluid [J]. *Optics Communications*, 2021, 497: 127148.
- [5] 陈或芳, 沈骁, 周权, 等. 基于磷酸盐玻璃微球腔的全光调谐光纤滤波器 [J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0106003.  
Chen Y F, Shen X, Zhou Q, et al. All-optical tunable fiber filter based on phosphate glass microspheres [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0106003.
- [6] 李昊天, 刘文耀, 潘梓文, 等. 基于双频锁定的谐振式微光陀螺背散噪声抑制 [J]. *激光与红外*, 2019, 49(7): 886-890.  
Li H T, Liu W Y, Pan Z W, et al. Suppression of backscattering noise in resonant micro optic gyroscope with two laser frequencies locking-in [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(7): 886-890.
- [7] 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.  
Wang P F, Li A Z. Packaging and integration of whispering gallery modes optical microcavity devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(11): 1148008.
- [8] 商成龙, 唐军, 皮海龙, 等. 高  $Q$  值光学微球腔的温度系数研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0302005.  
Shang C L, Tang J, Pi H L, et al. Temperature coefficient of high- $Q$  microsphere cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0302005.
- [9] 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.
- [10] 王梦宇, 金雪莹, 李飞, 等. 波导耦合回音壁模式光学微球腔结构耦合特性分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(3): 284-289, 337.  
Wang M Y, Jin X Y, Li F, et al. Analysis for coupling characteristics of optical microsphere cavity in waveguide coupled whispering gallery mode [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(3): 284-289, 337.
- [11] 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.  
Wang M Y, Meng L J, Yang Y, et al. Selection of whispering-gallery modes and Fano resonance of prolate microbottle resonators [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(23): 234203.
- [12] 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 Photonics Technology Letters*, 2011, 23(22): 1736-1738.
- [13] Wang P F, Ding M, Lee T, et al. Packaged chalcogenide microsphere resonator with high  $Q$ -factor [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(13): 131110.
- [14] Tang T, Wu X, Liu L Y, et al. Packaged optofluidic microbubble resonators for optical sensing [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 395-399.
- [15] Yang D Q, Duan B, Wang A Q, et al. Packaged microbubble resonator for versatile optical sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4555-4559.
- [16] Wang Z J, Zhang X B, Zhao S C, 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.
- [17] Monifi F, Friedlein J, Ozdemir Ş K, et al. A robust and tunable add-drop filter using whispering gallery mode microtoroid resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(21): 3306-3315.
- [18] Vanier F, Peter Y A, Rochette M. Cascaded Raman lasing in packaged high quality  $As_2S_3$  microspheres [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28731-28739.
- [19] Herter J, Wunderlich V, Janeczka C, et al. Experimental demonstration of temperature sensing with packaged glass bottle microresonators [J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4321.
- [20] Kavungal V, Farrell G, Wu Q, et al. A packaged whispering gallery mode strain sensor based on a polymer-wire cylindrical micro resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36 (9): 1757-1765.
- [21] 柯超珍, 许灿华, 黄衍堂, 等. 溶胶-凝胶法制备  $TiO_2-SiO_2$  混合微球腔的激发高阶回音壁模式 [J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0213002.  
Ke C Z, Xu C H, Huang Y T, et al. High-order whispering gallery modes in  $TiO_2-SiO_2$  hybrid microsphere cavity prepared with sol-gel method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46 (2): 0213002.
- [22] Zhang Y N, Zhu N S, Zhou T M, et al. Research on fabrication and sensing properties of fiber-coupled whispering gallery mode microsphere resonator [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(2): 833-841.
- [23] 温钦, 秦晋辉, 周恒, 等. 回音壁模式光学微腔的激发模式控制 [J]. *光学学报*, 2020, 40(19): 1919001.  
Wen Q, Qin J H, Zhou H, et al. Controllable excitation of whispering gallery mode micro-rod resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1919001.
- [24] Vassiliev V V, Velichansky V L, Ilchenko V S, et al. Narrow-line-width diode laser with a high- $Q$  microsphere resonator [J]. *Optics Communications*, 1998, 158(1/2/3/4/5/6): 305-312.
- [25] Wang M Y, Zeng S F, Meng L J, et al. Experimental observation of dynamic transmission lineshapes in a robust SNAP microbottle-taper coupling system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 7105412.

# Research on Stability of Packaged Optical Microresonator Device Based on Whispering-Gallery Mode

Wang Mengyu, Liu Jiyang, Li Yuansong, Fan Lekang, Ai Wencheng, Huang Yufan,  
Liu Jingyu, Wu Tao, Xie Chengfeng<sup>\*</sup>, Guo Zhuang<sup>\*\*</sup>, Wan Shengpeng, Fu Yanjun  
*Key Laboratory of Nondestructive Test of Ministry of Education, School of Measuring and Optical Engineering,  
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China*

## Abstract

**Objective** Due to their ultra-high quality ( $Q$ ) factor and extremely small mode volume, optical microcavities supported whispering gallery modes are becoming increasingly popular in photonic devices such as micro-lasers, optical filters, nonlinear effects, and optical sensors. However, the external environment, such as changes in environmental pressure, mechanical vibration, dust, and temperature fluctuations, has a considerable impact on the resonance characteristics of this type of microcavity system. The material loss and surface roughness are two important factors that affect the  $Q$  value of the microcavity and should not be overlooked. If the silica microcavity is exposed to normal environment, it will adsorb water molecules in the air, reducing the  $Q$  factor; therefore, the external environment's interference with the microcavity must be eliminated. To make it suitable for outside applications, the packaging method based on the microcavity must be examined further. Furthermore, the packaging technology must be updated to improve the stability of the coupled microcavity system.

**Methods** The silica microsphere cavity is fabricated by using arc discharge to melt the tip of a single-mode optical fiber. When the end of a standard single-mode fiber is melted and solidified, it forms a sphere with an ultra-smooth surface. The tapered fiber, created using the heat-and-pull technique, serves as a waveguide to excite the microsphere's whispering gallery modes. Subsequently, we propose a whispering gallery mode microcavity and fiber tapered waveguide coupling system that is indirectly packaged. The adjusted coupling state before packaging is not changed during the packaging process, and the silica microcavity is fixed in a sealed and clean transparent glass box. The packaging method has the advantages of ensuring a good coupling state, being isolated from the external environment, portability, and long-term stability of the ultra-high- $Q$  factor. The stability of the transmittance, resonant wavelength point, and full width at half maximum are calibrated and analyzed using the Allan variance. Finally, the proposed packaged devices are compared to other packaging methods.

**Results and Discussions** The resonance spectrum of the packaged microsphere cavity is measured using an experimental setup. The Lorentz function is used to fit the resonant peak at 9.29 GHz. A typical  $Q$  factor after packaging is still approximately  $5.1 \times 10^7$  (Fig. 4). The stability of the resonance performance is evaluated to test the stability of the packaged microcavity. The Allan variance is used to describe the variation of the transmittance, resonant wavelength point, and full width at half maximum ( $\Delta f$ ) with time. The results indicate that the transmittance is basically constant (0.4 nm), indicating that the resonant state is very stable for up to 1000 s. (Fig. 6). Furthermore, the resonant wavelength point shows a rising trend, implying that the resonant point appears in a red-shifted state (Fig. 7). The minimum value of Allan variance of the resonant point is near 1 s and the minimum value of Allan variance of  $\Delta f$  is near 23 s. In this experiment, the  $Q$  factor of the packaged microcavity device reaches  $5.1 \times 10^7$ , which is five times higher than the  $Q$  factor of the spot-packaged silica microsphere, and one to two orders of magnitude higher than the  $Q$  factors of wholly-packaged silica microsphere, microbottle, microbubble, and  $\text{As}_2\text{S}_3$  microsphere (Table 1). The  $Q$  factor of our packaged silica microcavity is four orders of magnitude greater than that of the indirectly packaged polymer microcylindrical cavity. The ultra-high  $Q$  factor contributes to the high application value for micro-lasers, optical filters, optical gyroscopes, and high sensitivity sensors.

**Conclusions** In this study, we propose a novel indirectly packaged whispering gallery mode optical microcavity device. A photodetection system is used to analyze the resonance characteristics of the packaged device, and the  $Q$  value reaches  $5.1 \times 10^7$ , which is higher than the  $Q$  values of other spot-packaged and wholly-packaged devices. The packaging method not only has excellent characteristics such as strong robustness, stability, interference immunity, and portability, but also guarantees an ultra-high  $Q$  factor. The stability of the packaged microcavity is thoroughly examined, and Allan variance is used to assess the stability of the resonant mode. The result demonstrates that the resonant state is stable for up to 1000 s, but the resonant point drifts due to the thermal effect. In the following work, a temperature control system and



a frequency locking system are being considered to solve this problem. Our research provides a solid foundation for the practical use of microcavity devices and contributes to the advancement of microcavity technology. The evaluation method introduces a novel idea for analyzing the stability of microcavity devices. The packaged devices are highly promising in many applications including micro-lasers, optical filters, optical gyroscopes, and high sensitivity sensors.

**Key words** fiber optics; optical microcavity; coupling; packaged device; stability; Allan variance