

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.230039.

光电器件研究与应用

黄嘉祺, 邹辉. 回音壁模式光学微腔及其应用研究进展[J]. 光通信研究, 2024(3):230039.

Huang J Q, Zou H. Research Progress of Whispering Gallery Mode Optical Microcavity and Its Application [J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230039.

回音壁模式光学微腔及其应用研究进展

黄嘉祺¹, 邹辉²

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621054)

摘要:近年来, 高品质因子的回音壁模式(WGM)光学微腔发展迅速, 成为光学和物理领域的热点研究。光学微腔是一种微型光学元件, 由于其微小的尺寸和高品质因子, 可以加强光与物质的相互作用并使光在其中长时间存留。WGM光学微腔是光学微腔的典型代表之一, 具有体积小、灵敏度高和寿命长等优点, 目前, 基于WGM光学微腔的应用主要集中在各类传感、激光器和滤波器等领域。然而, 当前对WGM光学微腔的研究还未实现大规模生产, 仅处于实验室研究阶段, 工业化生产还存在成本高、制作工艺困难等缺点。文章重点介绍了WGM光学微腔的研究进展, 阐述了回音壁材料对Q值的影响, 近几年WGM光学微腔在传感、激光器和滤波器领域的应用, 并提出了在可能实现全光网络的未来WGM光学微腔存在的挑战及进一步研究方向。对于后续研究, 文章认为首先需降低成本、缩短时间, 提高制备工艺的精度和效率; 其次, 需要解决微腔与光学器件耦合的问题, 提高耦合效率并提高抗干扰能力; 最后, 需要解决腔体对环境的敏感性问题, 以确保微腔在制备滤波器等器件时具有良好的稳定性。

关键词:回音壁模式; 高品质因子; 光学微腔; 传感

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A

Research Progress of Whispering Gallery Mode Optical Microcavity and Its Application

HUANG Jiaqi¹, ZOU Hui²

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621054, China)

Abstract: In recent years, high quality factor echo wall mode optical microcavities have developed rapidly and become a hot research topic in the fields of optics and physics. Optical microcavity is a kind of micro optical element. Due to its small size and high-quality factor, it can enhance the interaction between light and matter, enabling long-time light stays. Echo wall mode resonators are one of the typical representatives of optical microcavities, with advantages of small size, high sensitivity, and long life. Currently, applications based on echo wall mode resonators are mainly concentrated in various fields such as sensors, lasers, filters, and so on. However, current research on echo wall mode resonators has not yet achieved large-scale production, and is only in the laboratory research stage. Industrial production still has shortcomings such as high cost and manufacturing process difficulties. This article focuses on the research progress of echo wall mode resonators, expounds the impact of echo wall materials on Q values, and discusses the applications of echo wall mode resonators in the fields of sensors, lasers, and filters in recent years. It also proposes the challenges and further research directions of echo wall mode resonators in the future, which may realize all-optical networks. For further research directions, we believe that it is necessary to reduce costs, shorten time, and improve the accuracy and efficiency of the preparation process. It is also necessary to solve the coupling problem between the microcavity and the optical device, improving the coupling efficiency and the anti-interference ability. It should also address the sensitivity of the cavity to the environment to ensure that the microcavity has good stability when preparing devices such as filters.

Key words: WGM; high quality factor; optical microcavity; sensor

0 引言

回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)光学微腔是通过全反射将光束束缚在球型腔内而形成的谐振模式, 具有品质因子(Q值)高、模式体积小和能量密度高^[1]等优势。在微腔中, 光与物质能够

产生相互作用, 如倍频、四波混频和受激拉曼散射等非线性效应^[2]。因此, WGM光学微腔的性能对其材料、大小及外部环境极其敏感, 其对外部环境及自身材料的敏感性被广泛应用于生物传感^[3]、温度传感^[4]和电磁传感^[5]等领域。随着研究的深入, WGM光学微腔的制备、调控和应用方面取得了许多重要

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-03-20; 纸质出版日期: 2024-06-10

作者简介: 黄嘉祺(1999-), 男, 江苏无锡人。硕士, 主要研究方向为回音壁模式光学微腔。

通信作者: 邹辉, 副教授。E-mail: zouhui1010@163.com

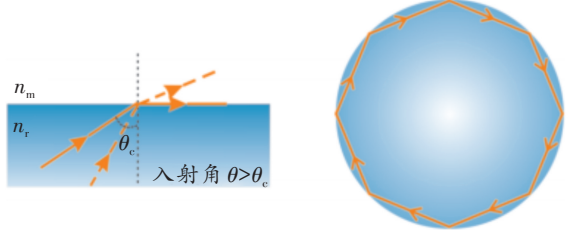
© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

进展。然而,对于不同类型的 WGM 光学微腔,其优缺点和适用场景仍需进一步研究。

本文主要介绍了 WGM 光学微腔特性参数、回音壁材料的选择对 Q 值的影响,以及在各个领域的重要应用,WGM 光学微腔的发展历程和现状,并探讨了其在传感器领域的应用前景,对当前 WGM 光学微腔研究存在的问题和未来的发展方向进行了分析和探讨,旨在为相关研究提供参考和指导。

1 WGM 光学微腔基本概念

回音壁最初的发现是关于声学现象的解释。在 1910 年, Lord Rayleigh^[6] 在英国 St. Paul's 教堂发现了 WGM。其基本原理为声波以极小的能量损耗通过连续反射的方式传播。由于损耗小,声波传输距离得到了极大提高。光波的传输方式本质上与声波相似,其原理如图 1 所示^[7]。在光学微腔内传输的光波从光密介质进入光疏介质,入射角大于全反射临界角时,将在腔内发生全反射。当腔内传播一周的光与新进入光学微腔的光的光程为波长的整数倍时,会产生谐振现象,保持稳定的行波传输模式。这种现象被称为“光学回音壁模式^[8]”。



(a) 微腔内表面全反射光线示意图
(a) Schematic diagram of total reflected light on the surface of micro cavity

(b) 行波传输示意图
(b) Schematic diagram of traveling wave transmission

注: n_m 为上半部分介质折射率; n_r 为下半部分介质折射率; θ_c 为全反射临界角。

图 1 WGM 基本原理^[7]

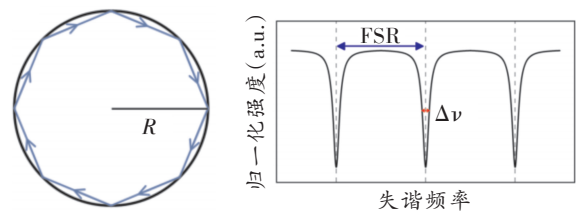
Figure 1 Basic principle of WGM^[7]

(1) WGM 光学微腔特性参数

WGM 光学微腔是一种特殊的微型光学元件,其特性参数包括光学微腔的品质因子(Q 值)、光学微腔的波长(λ)、自由光谱范围(Free Spectral Rang, FSR)、模式的电场分布和光学微腔的体积等。其中,Q 值是衡量光学微腔能够长时间存留光子的能力的重要参数,是指光学微腔内光能量损失与光能量储存的比值,定义为^[9]

$$Q = 2\pi \cdot \frac{W}{W_{\text{loss per cycle}}}$$

式中: W 为光学微腔内储存的能量; $W_{\text{loss per cycle}}$ 为光在光学微腔内传输一周所损耗的能量。Q 值越大,表示光子在光学微腔内的储存时间越长,相应地,光学微腔的灵敏度和分辨率也会提高^[10]。 λ 和 FSR 则是描述光学微腔模式特性的关键参数^[11], λ 是指光学微腔内产生谐振的光波波长,而 FSR 则是指光学微腔内相邻两个波长之间的频率差,用 $\Delta\nu$ 表示,是衡量光学微腔内不同模式之间的能量耦合程度的重要参数^[12],图 2 所示为 FSR 和 $\Delta\nu$ 示意图。此外,光学微腔模式的电场分布也是描述光学微腔特性的关键参数之一,可用于设计光学元件和研究光与物质相互作用的过程。光学微腔的体积也是重要参数之一^[13],体积越小,其灵敏度和分辨率会相应提高。因此,深入研究 WGM 光学微腔的特性参数对于设计和优化光学器件,以及在传感、光通信和激光器等领域的应用具有重要意义。



(a) WGM 全反射示意图
(a) WGM total reflection diagram

(b) 微腔中的 FSR 与 $\Delta\nu$
(b) FSR and $\Delta\nu$

注: R 为 WGM 光学微腔半径。

图 2 FSR 和 $\Delta\nu$ 示意图^[12]

Figure 2 FSR and $\Delta\nu$ schematic diagram^[12]

(2) WGM 光学微腔耦合方式

我们进行 WGM 光学微腔耦合的目的是储存微腔能量,尽量减小能量损耗。由于通过自由空间将光耦合进微腔内能量损耗大,所以针对不同的微腔需选择不同的光学器件进行耦合,以减少腔体内部的光能损耗,提升光学微腔的性能。

目前主要的耦合方式有微腔与棱镜耦合^[14]、微腔与端面耦合^[15]、微腔与波导耦合^[16]、微腔与 D 形光纤耦合^[17]和微腔与锥形光纤耦合^[18]。各种耦合方式如图 3 所示。

微腔在材质和尺寸等方面的不同导致需要采用不同的耦合方式以确保其最佳性能。微腔与棱镜耦合是最早期的耦合方式,其原理是将微腔与棱镜耦合在一起,使得入射光通过棱镜与微腔的界面时满足全反射定律,光的波动性在界面产生纵向倏逝波,当倏逝波与微腔的 WGM 发生相位匹配时,光被耦合到微腔中。然而,该方式的耦合装置体积大、

调节复杂,且由于棱镜中光场多次折射导致了耦合效率的下降,微腔与棱镜耦合效率只有 70%。目前,最常用、最热门的微腔耦合方式是微腔与锥形光纤耦合。光纤锥是由普通单模光纤拉制而成,可以在拉锥过程中改变光纤锥的厚度,从而微调腔内光场传播。此外,该方式操作简单,制作成本低,耦合效率可达 99.9%,因此成为最常用的微腔耦合方式之一。

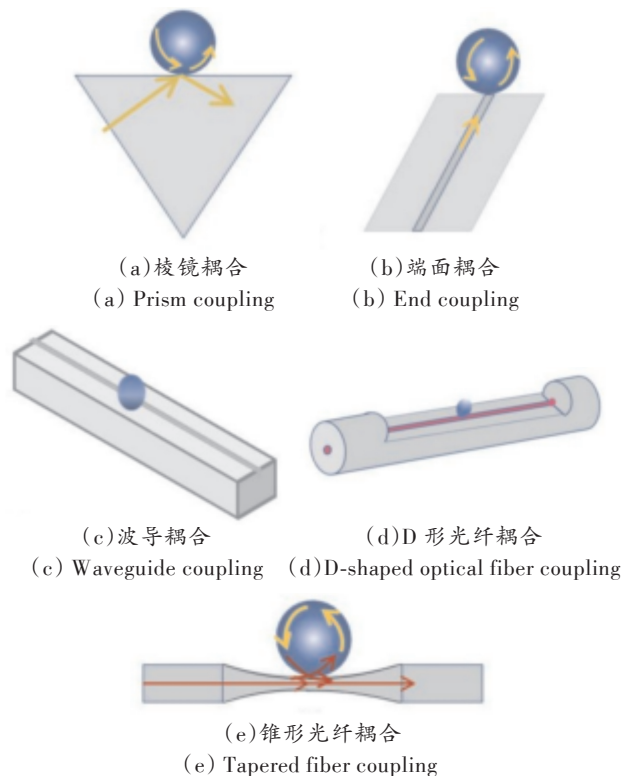


图 3 各种耦合方式^[12]

Figure 3 Various coupling methods^[12]

2 WGM 微腔材料对其 Q 值的影响

WGM 光学微腔的 Q 值直接反映了光学微腔性能的好坏。学者们从上世纪开始致力于采用不同的方法提高光学微腔的 Q 值。使用不同材料可以减少光学微腔的吸收损耗^[19],而材料本身则决定了微腔 WGM 的 Q 值上限。下面将介绍半导体、玻璃、聚合物和晶体 4 种材料对微腔 Q 值的影响。

(1) 半导体材料

20 世纪 80 年代,随着半导体加工工艺的成熟,微腔表面粗糙度下降,将半导体材料用于制作光学微腔,极大提升了 Q 值。半导体材料的折射率差异较大,能更好地将光约束在腔体内,从而减少腔内损耗。1987 年,Braginskii 等^[20]首次制备出了高 Q 值的微球腔;1992 年,McCall 等^[21]用掺铌二氧化硅微球制作出低阈值激光器,利用高反射率半导体薄圆

盘在薄圆盘平面内产生了 100 超低阈值的激光出射;2008 年,Reitzenstein 等^[22]制作了半导体微柱光学微腔并应用于低阈值激光器,微柱腔 Q 值超过 10^4 ,激光器阈值电流 $< 8 \mu\text{A}$,具有更低的阈值和更好的散热。虽然硅是现代微电子学和光子学的主要材料,但光学硅微谐振器 Q 值较低限制了其应用。2018 年,Shitikov 等^[23]制作了 1 550 nm 波长的毫米级晶体硅光学谐振器,图 4 所示为实验装置图,其 Q 值达到了 1.2×10^9 ,并提出了一种新型硅半球形耦合器对 WGM 谐振器进行激励,其耦合效率高达 35%。

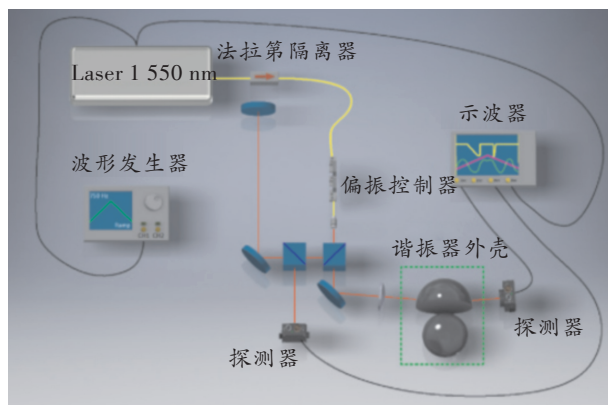


图 4 实验装置图^[23]

Figure 4 The experimental setup diagram^[23]

(2) 玻璃材料

玻璃是常用的 WGM 光学微腔材料之一,因其成本低且易加工,被广泛应用于各领域。此外,玻璃材料可方便地实现离子掺杂,通过掺杂某些稀土离子或荧光材料,可显著提高 WGM 腔性能。传统微谐振器的频率间隔大、可调谐性有限,限制了其在需要谐振与预定频率重合的应用中的使用。2009 年,Pollinger 等^[24]提出了一种瓶状的玻璃微腔,使用高度扁平形状的耳语画廊模式“瓶子微谐振器”,成功克服了这一限制。实验制备的腔体尺寸为 30 mm 左右,Q 值达到了 3.6×10^8 。2017 年,Zaijin Fang 小组^[25]制作了一种掺杂 Bi^{3+} 的玻璃微球,该微球可作为低阈值激光器、滤波器等高性能器件的材料之一。综上所述,基于玻璃材料制备的微球腔具有成本低、可掺杂和加工方式多样性等优势,是研究者们的首选材料之一。

(3) 聚合物材料

聚合物材料与玻璃类似,具有成本低和加工方式多等优点。2011 年,Grossmann 等^[26]使用双光子吸收诱导聚合在硅上制造了 $Q > 10^6$ 的高 Q 聚合物微盘。柔性三维光刻方法可以在同一衬底上制造

不同腔厚度,有利于快速原型制作。2019年,Xin Tu等^[27]利用纳米印刷技术制备了 Q 值为 8×10^5 的SU-8微环光学微腔。2020年,王亚平等^[28]利用一种掺杂荧光染料的聚苯乙烯微光学微腔,实现了生物细胞传感,细胞内荧光微球WGM的谐振峰红移与细胞类型有关。虽然聚合物材料加工方便且成本低廉,但由于其微腔 Q 值低于玻璃和半导体材料,故其应用相对受限制。

(4) 晶体材料

晶体材料制备的WGM光学微腔具有极高的 Q 值,因为材料本身减少了光学微腔的吸收损耗,但加工方法较为单一且成本较高。常用的晶体材料有CaF₂、MgF₂和石英晶体等。1961年,Garrett等^[29]首次在实验室制备了CaF₂微波光学微腔,但当时加工工艺不成熟导致腔体表面粗糙且 Q 值较低。2012年,Lin J等^[30]使用飞秒激光微加工石英晶体制备了高 Q 值WGM微腔, Q 值可达 1.07×10^6 。2011年,Liang等^[31]使用MgF₂晶体制备了 Q 值高达 10^9 的WGM微腔,并产生了35 GHz光学频率梳。

事实上,影响微腔 Q 值的因素有很多,如制备材料、加工工艺^[32]和外界环境^[33]等,其中对微腔性能影响最直接的因素是微腔的选材。总的来说,WGM光学微腔材料的选择各有优缺点:玻璃材料与聚合物材料成本低廉、加工工艺简单且方法多样,但制备的微腔品质因子在相同加工方式下没有晶体、半导体材料高;而半导体、晶体材料加工方式成本较高且方法单一。所以如何在确保 Q 值高的前提下,减少制备成本、缩短制备周期是当下需要解决的问题。

3 基于WGM光学微腔的应用

WGM光学微腔的高精度传感器应用源于其对外界环境的敏感性和自身材料特性。当腔体外界环境发生变化,或与外界微小粒子接触时,光学微腔中倏逝波会受到影响,导致谐振峰偏移,这种特性使得WGM光学微腔成为传感领域的前沿研究热点。自2002年美国Stephen Arnold课题组^[34]观测到WGM光学微腔谐振峰在水溶液中的蛋白质后,其在生物传感、温湿度传感和应力传感等领域^[35]得到广泛应用。下面将介绍近年来WGM光学微腔在传感、激光器和滤波等领域的应用。

(1) 生物传感及纳米量级颗粒检测

近年来,WGM腔已经在生物传感领域取得了

快速的进展。2008年,Vollmer等^[36]使用自制的WGM微球腔成功地检测了单个病毒分子,实验制备了 Q 值为 2.6×10^5 的微球,并通过锥形光纤的瞬时耦合来激发WGM。图5所示为利用WGM微球光学微腔对病毒分子检测的原理图,显示了浸没在水溶液中的二氧化硅微球(此处半径 $R \approx 50 \mu\text{m}$)中激发的WGM的典型透射光谱。实验结果表明,单个纳米颗粒的吸附可以导致WGM共振频率/波长的离散变化,从而实现在水缓冲液中单个病毒分子的检测。实验还发现了微球的大小对单个病毒分子的检测精度有影响,减小微球直径将使测量结果更准确。

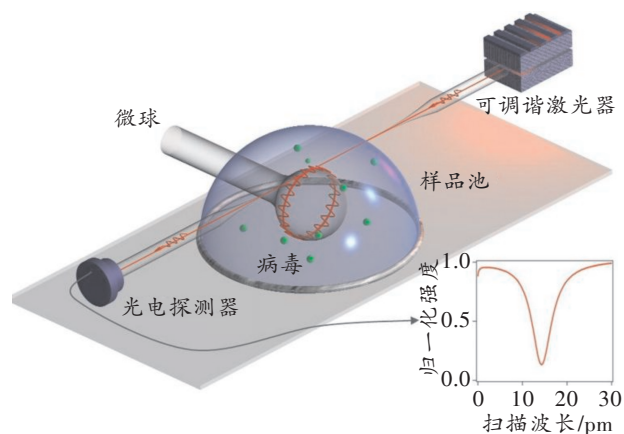


图5 利用WGM微球谐振器的生物检测系统原理图^[36]

Figure 5 PrSchematic diagram of biological detection system using WGM microsphere resonator^[36]

2013年,北京大学肖云峰组^[37]监测微腔中的耳语廊模式展宽,提出了一种新的无标记传感机制,可消除对敏感纳米颗粒检测的超高 Q 模式空腔的严格要求。同年,Dantham等^[38]制作了WGM-纳米壳杂化光学微腔,并成功实现了对单个甲状腺球蛋白(Thyroglobulin, Tg)和牛血清白蛋白(Bovine Serum Albumin, BSA)的检测,其质量分别仅为1和0.11 ag(66 kDa)。2020年,Wang Y P等^[39]利用荧光绿(Fluorescent Green, DG)荧光微球本身所拥有的WGM对不同种类的细胞进行了检测,图6所示为检测细胞装置图。实验证明DG微球腔模式体积小、灵敏度高和谐振性能稳定,能在水环境中输出WGM模式激光,其半峰全宽窄,能量高,对腔外环境的变化极为敏感,可以实现对待测物质的高灵敏度检测。该实验的不同结果可作为高灵敏度生物传感系统的应用。

2021年,Wang等人^[40]开发了一种基于WGM

光谱的高灵敏度液晶放大光流共振生物传感器,用于蛋白质的定量分析。实验通过微谐振器的壁厚和生物分子与激光束的相互作用,蛋白质分子发生微小变化,WGM光谱能够放大这种变化,通过波长偏移表征目标分子的浓度。此外,考虑到液晶在生物传感领域的广泛应用,这种液晶传感平台可通过改变微流控腔的修饰,进一步触发液晶的取向转变,为高灵敏度的无标记生物分子检测提供了新的解决方案。

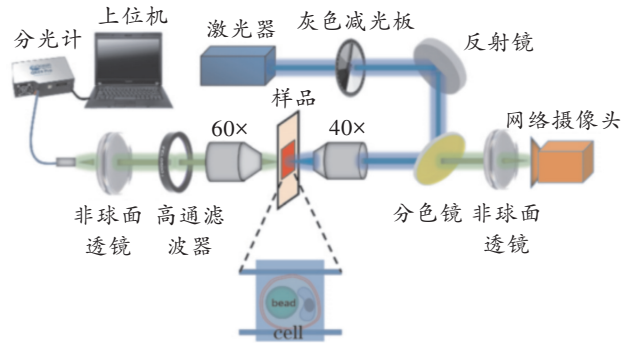


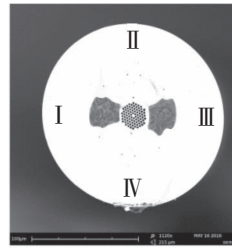
图6 实验装置示意图^[39]

Figure 6 The experimental setup diagram^[39]

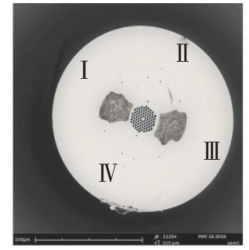
(2) 温度传感器与湿度传感器

使用WGM光学微腔进行温湿度检测的原理是基于其对外界环境的敏感性。当温湿度发生变化时,微腔的尺寸和折射率都会随之改变,导致谐振波长也发生变化。早在2006年,Nawrocka等人^[41]就在硅环形微腔中实现了灵敏度为0.11 nm/K的温度调谐,随后,更多的学者对此进行了研究。2009年,Wu等^[42]人制作了基于二氧化硅/聚合物纤维的微腔,实现了Q值为12 000/8 000、灵敏度分别为52和266 pm/K的温度传感。2018年,美国华盛顿大学杨兰课题组制作了基于WGM、Q值为 10^5 量级的微环腔,并与单模激光器、光电探测器等元件封装,制成了具有物联网控制功能的高灵敏度温度传感器,成功应用于航空测绘领域。2020年,T. Munoz-Hernandez等人^[43]提出并分析了一种基于WGM的温度传感器,该传感器位于由金属填充的侧孔光子晶体光纤(Side Hole Photonic Crystal Fiber, SH-PCF)形成的圆柱形微谐振器中。图7所示为扫描电镜与实验装置图,实验采用铋(Bi)和钢(In)金属制作PCF微谐振器,利用光纤锥度传出的透射光进行光谱分析。研究发现,填充钢的PCF具有最大的温度灵敏度(18.72 pm/°C),且WGM位移主要取决于腔体变形。这项研究提出的mSH PCF微谐振器是一种很有前途的实用和基础科学

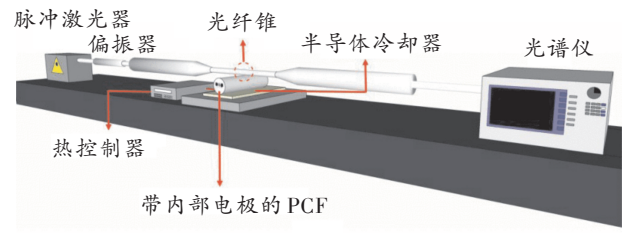
研究候选器件。



(a) 带有Bi金属的侧孔多氯联苯的扫描电镜图像
(a) Scanning electron microscope image of side pore polychlorinated biphenyls with Bi metal



(b) 带有In金属的侧孔多氯联苯的扫描电镜图像
(b) Scanning electron microscope image of side pore polychlorinated biphenyls with In metal



(c) 实验装置图

(c) Experimental apparatus

图7 扫描电镜与实验装置图^[43]

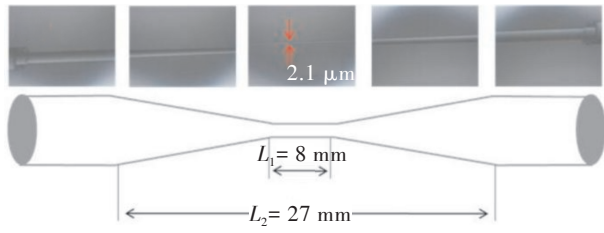
Figure 7 Scanning electron microscopy image and experimental setup diagram^[43]

WGM腔不仅用于温度传感,也可用于湿度传感。2018年,Lei Liang等^[44]提出了一种基于WGM微谐振器的高灵敏度湿度传感器。该传感器使用腰部直径为2.1 μm的锥形光纤通过瞬逝耦合激发微球(200 μm)谐振器中的WGM。实验结果显示,该传感器可测量相对湿度,其灵敏度在20%~70%相对湿度范围内为0.11 dB/%RH,70%~90%相对湿度范围内为0.21 dB/%RH。此外,该传感器结构紧凑,滞后性低,具有良好的重复性和相对较低的温度交叉灵敏度。图8所示为光纤锥与微球封装示意图。

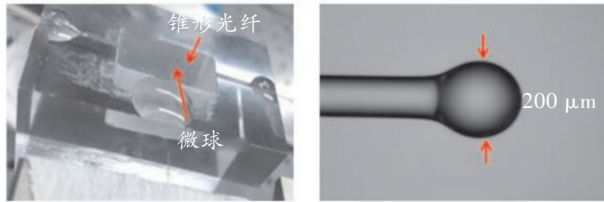
(3) 其他类型传感器

WGM腔不仅在生物、温度传感方面有应用,也可以用于光流体传感及浓度传感。2021年,Wenyao Liu等^[45]成功证明了一种基于填充磁性流体(Magnetic Fluid, MF)的WGM空心微气泡光学微腔的磁感应方法。MF的折射率变化引起传输频谱偏移,如图9所示,实验制备了Q值为 4.02×10^6 的WGM空心微气泡光学微腔,并研究了MF浓度对光学微腔的影响。实验结果表明,当光学微腔壁厚为19 μm时,磁感应灵敏度为2.6 pm/mT,范围为2~20 mT。通过减小壁厚,获得的磁感应灵敏度

可达 25.21 pm/mT。该 WGM 谐振器在光流体传感及浓度传感方面具有广泛的应用前景。



(a) 用于将光耦合到微球中的锥形纤维的示意图
(a) Schematic diagram of tapered fibers used to couple light into microspheres



(b) 封装传感器的照片
(b) Photos of packaged sensors
(c) 实验中使用的微球的光学显微镜图像
(c) Optical microscope images of the microspheres used in the experiment

图 8 光纤锥与微球封装示意图^[44]

Figure 8 Schematic diagram of fiber optic cone and microsphere packaging^[44]

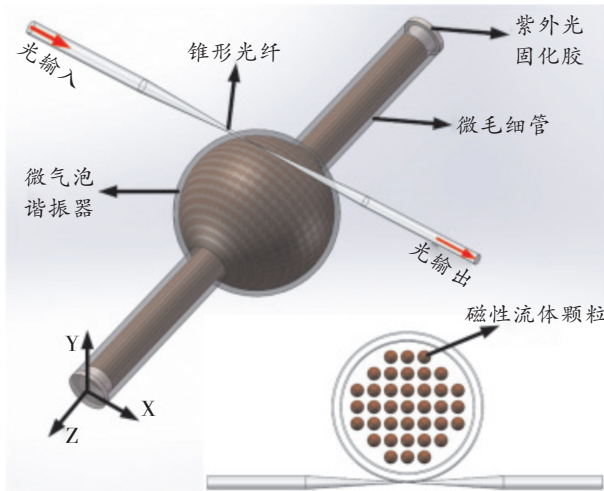


图 9 空心微气泡光学微腔示意图^[45]

Figure 9 Schematic diagram of hollow microbubble resonator^[45]

2022 年, Eyal Yacoby 等^[46]提出了一种基于二氧化硅可拉伸微球的 WGM 应力传感器, 其 WGM 腔 Q 值为 10^8 。在外界应力的作用下, 腔内半径发生变化, 从而使光学微腔的振峰发生改变。因此, WGM 微腔振峰发生位移, 可用作应力传感器。实验还证明了多模二极管激光器通过微球的自注入反馈锁定到微球的单个 WGM, 这种光学锁定伴随着

多模二极管激光器的大幅光谱变窄。

2021 年, Johari 等^[47]制作了基于 WGM 的瓶装液体传感器。实验研究了聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)涂层对微瓶光学微腔作为乙醇液体传感的影响。3 种尺寸的膜生物反应聚乙烯醇(Membrane Bioreactor Polyvinyl Alcohol, MBR-PVA)产生的共振深度表明, 所有尺寸的 Q 值始终 $>10^4$ 。实验还比较了发射功率和波长漂移的灵敏度、线性度、稳定性和重复性参数。结果表明, 微瓶光学微腔的尺寸影响 MBR-PVA 作为液体浓度传感器的性能。

WGM 腔还可以应用于电场传感。2020 年, 周权等^[48]制作了一种薄壁毛细管液芯微腔电场传感器, 通过锥区锥形光纤以倏逝场的形式耦合激光到微腔中激发 WGM 的原理图如图 10 所示, 实验用毛细管制备了 Q 值为 2.6×10^6 的 WGM 腔, 并利用蛋白质分子在缓冲溶液里带电荷的特性, 制成了对外界电场更加敏感的传感器, 最终获得了最高 $10.6 \text{ pm}/(\text{kV}/\text{m})$ 的电场灵敏度。

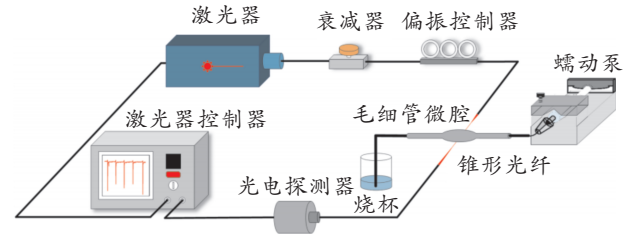


图 10 毛细管微腔 DNA 测试原理示意图^[12]

Figure 10 Schematic diagram of capillary microcavity DNA testing^[12]

(4) 低阈值激光器

WGM 腔因高 Q 值、小模式体积和低腔内损耗等特性广泛应用于低阈值激光器的制造。单晶钙钛矿是激光和其他光电应用的理想选择。2022 年, Guohui Li 等人^[49]成功用单晶钙钛矿制造了低阈值激光器。但实际上, 大多数报道的钙钛矿谐振器表面和刻面不光滑, 限制了 Q 值, 从而增加了激光阈值。该实验通过化学气相沉积生长在云母基体到 SiO₂ 上的钙钛矿纳米腔, 并使用飞秒激光来激发钙钛矿纳米腔的转移印刷, 将其转化为光滑的钙钛矿, 从而提高了 WGM 腔的 Q 值。最终实验得到 WGM 腔 Q 值为 2 580, 激光阈值为 $27.89 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。该方法代表了实现更小尺寸、更好热管理的钙钛矿纳米激光器及其在光电子器件中应用的重要进展。

(5) 滤波器

WGM 光学微腔功耗小、调谐范围大, 使其也被应用于可调谐滤波器领域。2003 年, 加州理工学院

Savchenkov 等^[50]制作出了基于 WGM 光学微腔的棱镜耦合洛伦兹滤波器。制备的滤波器可调谐范围达到 20 GHz,且腔内损耗低。实验表明,当施加 10 V 的电压时,横向磁偏振光的频谱移动了 0.8 GHz。2021 年,Nidhi 等^[51]设计了一种采用等离子体超材料结构的多带滤波器,并在微波频率下对其进行了表征。它由一种独特的基于表面等离子体激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)的平面传输线和 WGM 谐振器组成。所设计的滤波器在共振频率下具有尖锐的抑制响应。实验制备的滤波器具有尖锐的抑制特性,可作为无线收发器系统中抑制不需要的频率分量的潜在候选者。

微腔传感领域近年来发展迅速,其灵敏度逐步提高,而真实环境中的生物检测等应用也对微腔传感器的实用性提出了各种挑战与机遇。微腔在激光器及滤波器方面的应用也证实了其在光学领域的重要性。随着微纳加工技术的进步,人们有望逐步解决 WGM 微腔传感器在真实应用中的各种技术挑战,从而将微腔传感器推向真实的应用。

4 结束语

在传感领域,WGM 腔以高 Q 值、小模式体积和低损耗等特性发挥着重要作用;在低阈值激光器的研发和滤波器的制作中,WGM 腔也有广泛的应用。如果光学成为通信领域的主流技术,全光信息技术就将成为可能,这就需要体积小、损耗低和性能高的光学器件,而 WGM 腔具有高 Q 值、小模式体积,可用于激光器组成的高性能光学器件,可能在该领域实现意想不到的效果。

当前 WGM 腔的研究尚处于实验室阶段,未能实现大规模生产。工业化制造面临成本高、制作工艺困难等挑战。未来的研究需解决以下问题:首先,需降低制备成本、缩短时间,提高工艺的精度和效率;其次,必须解决 WGM 腔与光学器件耦合的问题,提高耦合效率和抗干扰能力;最后,应处理腔体对环境的敏感性,确保在制备滤波器等器件时 WGM 腔具有良好的稳定性。

参考文献:

- [1] Grudin I S, Matsko A B, Maleki L. Brillouin Lasing with a CaF₂ Whispering Gallery Mode Resonator[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(4): 043902.
- [2] Ilchenko V S, Savchenkov A A, Matsko A B, et al. Nonlinear Optics and Crystalline Whispering Gallery-Mode Cavities [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(4): 043903.
- [3] Vollmer F, Arnold S. Whispering-gallery-mode Biosensing: Label-free Detection down to Single Molecules [J]. Nature Methods, 2008, 5(7): 591–596.
- [4] Feron P, Arnaud C, Boustimi M, et al. Optical Feedback on Whispering Gallery Mode Laser: Wavelength Shifts in Erbium-doped Microspherical Laser[C]//Integrated Optics and Photonic Integrated Circuits. Strasbourg, France: SPIE, 2004, 5451: 199–209.
- [5] Haroche S, Kleppner D. Cavity Quantum Electrodynamics[J]. Physics Today, 1989, 42(1): 24–30.
- [6] Rayleigh L. CXII. The Problem of the Whispering Gallery [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1910, 20(120): 1001–1004.
- [7] 赵宏春. 回音壁模式光学微腔传感原理及性能研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2020.
Zhao H C. Study on the Principle and Performance of Echo Wall Mode Optical Microcavity Sensing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [8] Oraevsky A N. Whispering-gallery Waves[J]. Quantum Electronics, 2002, 32(5): 377.
- [9] Chremmos I, Schwelb O, Uzunoglu N. Photonic Microresonator Research and Applications [M]. New York: Springer, 2010: 1155–1175.
- [10] 邹长铃,董春华,崔金明. 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. Whispering-gallery Mode Optical Microcavities: Fundamentals and Applications[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 42(11): 1155–1175.
- [11] 何塞林. 微纳光子集成[M]. 北京:科学出版社, 2010.
Jose Capmany. Micro and Nano Photonics Integration [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [12] 周权. 高 Q 值回音壁模式微腔传感器研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2021.
Zhou Q. Research on High Q Echo Wall Mode Microcavity Sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [13] 潘毓. 超高品质回音壁模式谐振器研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
Pan Y. Research on Ultra-high Q Whispering-gallery-mode Resonators [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [14] Collot L, Lefevre-Seguin V, Brune M, et al. Very high-Q Whispering-gallery Mode Resonances Observed

- on Fused Silica Microspheres[J]. *Europhysics Letters*, 1993, 23(5): 327.
- [15] Shu F, Zou C, Sun F. Perpendicular Coupler for Whispering-gallery Resonators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3123–3125.
- [16] Laine J P, Little B E, Lim D R, et al. Microsphere Resonator Mode Characterization by Pedestal Anti-resonant Reflecting Waveguide Coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(8): 1004–1006.
- [17] Shi L, Zhu T, Huang D, et al. In-fiber Whispering-gallery-mode Resonator Fabricated by Femtosecond Laser Micromachining[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3770–3773.
- [18] Wan H, Chen J, Wan C, et al. Optofluidic Microcapillary Biosensor for Label-free, Low Glucose Concentration Detection[J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(8): 3929–3937.
- [19] Bo F, Wang J, Cui J, et al. Lithium-niobate-silica Hybrid Whispering-gallery-mode Resonators[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(48): 8075–8081.
- [20] Braginskii V B, Chenko V S. Properties of Optical Dielectric Microresonators[J]. *Soviet Physics Doklady*, 1987, 32: 306.
- [21] McCall S L, Levi A F J, Slusher R E, et al. Whispering-gallery Mode Microdisk Lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(3): 289–291.
- [22] Reitzenstein S, Heindel T, Kistner C, et al. Low Threshold Electrically Pumped Quantum Dot-micropillar Lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(6): 061104.
- [23] Shitikov A E, Bilenko I A, Kondratiev N M, et al. Billion Q -factor in Silicon WGM Resonators[J]. *Optica*, 2018, 5(12): 1525–1528.
- [24] Pöllinger M, O'Shea D, Warken F, et al. Ultrahigh- Q Tunable Whispering-gallery-mode Microresonator[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(5): 053901.
- [25] Fang Z, Chormaic S N, Wang S, et al. Bismuth-doped Glass Microsphere Lasers[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(6): 740–744.
- [26] Grossmann T, Schleede S, Hauser M, et al. Direct Laser Writing for Active and Passive High- Q Polymer Microdisks on Silicon[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11451–11456.
- [27] Tu X, Chen S L, Song C, et al. Ultrahigh Q Polymer Microring Resonators for Biosensing Applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1–10.
- [28] 王亚平, 王秀翊, 王璞. 回音壁模式光学微腔识别细胞类型[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207028.
- Wang Y P, Wang X H, Wang P. Identification of Cell Types Using Whispering Gallery Mode Optical Microcavities[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207028.
- [29] Garrett C G B, Kaiser W, Bond W L. Stimulated Emission into Optical Whispering Modes of Spheres[J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1807.
- [30] Lin J, Yu S, Ma Y, et al. On-chip Three-dimensional High- Q Microcavities Fabricated by Femtosecond Laser Direct Writing[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10212–10217.
- [31] Liang W, Savchenkov A A, Matsko A B, et al. Generation of Near-infrared Frequency Combs from a MgF₂ Whispering Gallery Mode Resonator[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(12): 2290–2292.
- [32] Li Y H, Jiang X F, Zhao G M, et al. Whispering Gallery Mode Microresonator for Nonlinear Optics[J]. *arXiv*, 2018, 1809:04878.
- [33] Kim E, Baaske M D, Vollmer F. Towards Next-generation Label-free Biosensors: Recent Advances in Whispering Gallery Mode Sensors[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 17(7): 1190–1205.
- [34] 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.
- [35] Zhi Y, Yu X C, Gong Q, et al. Single Nanoparticle Detection using Optical Microcavities[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(12): 1604920.
- [36] Vollmer F. Single Virus Detection from the Reactive Shift of a Whispering-gallery Mode[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(52): 20701–20704.
- [37] Shao L, Jiang X F, Yu X C, et al. Detection of Single Nanoparticles and Lentiviruses using Microcavity Resonance Broadening[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(39): 5616–5620.
- [38] Dantham V R, Holler S, Barbre C, et al. Label-free Detection of Single Protein using a Nanoplasmonic-photon Hybrid Microcavity[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(7): 3347–3351.
- [39] Wang Y P, Wang X H, Wang P. Identifying Single Cell Types via Whispering Gallery Mode Optical Microcavities[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207028.
- [40] Wang Z, Liu Y, Gong C, et al. Liquid Crystal-amplified Optofluidic Biosensor for Ultra-highly Sensitive and Stable Protein Assay[J]. *Photonix*, 2021, 2(1): 1–16.

- [41] Nawrocka M S, Liu T, Wang X, et al. Tunable Silicon Microring Resonator with Wide Free Spectral Range [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(7): 071110.
- [42] Wu Y, Rao Y J, Chen Y, et al. Miniature Fiber-optic Temperature Sensors based on Silica/polymer Microfiber Knot Resonators[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18142–18147.
- [43] Muñoz-Hernandez T, Reyes-Vera E, Torres P. Temperature Sensor based on Whispering Gallery Modes of Metal-filled Side-hole Photonic Crystal Fiber Resonators[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9170–9178.
- [44] Liang L, Li M, Liu N, et al. A High-sensitivity Optical Fiber Relative Humidity Sensor based on Microsphere WGM Resonator[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 45: 415–418.
- [45] Liu W, Li W, Wang R, et al. Magnetic Sensor based on WGM Hollow Microbubble Resonator Filled with Magnetic Fluid [J]. *Optics Communications*, 2021, 497: 127148.
- [46] Yacoby E, London Y, Meshorer Y, et al. Whispering Gallery Modes Silica Resonators: A Platform for Optical Sensing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151(108019): 181–188.
- [47] Johari M A M, Jali M H B, Yusof H H B M, et al. Polyvinyl Alcohol Coating Microbottle Resonator on Whispering Gallery Modes for Ethanol Liquid Sensor [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107379.
- [48] 周权, 陈瑶, 韩丰恺, 等. 高Q值薄壁液芯毛细管微腔电场传感器[J]. *光子学报*, 2020, 49(2): 0223002. Zhou Q, Chen Y, Han F K, et al. High-Q Thin-walled Liquid-core Capillary Microcavity Electric Field Sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0223002.
- [49] Li G H, Zhou B L, Hou Z, et al. Transfer Printing of Perovskite Whispering Gallery Mode Laser Cavities by Thermal Release Tape [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2022, 17(1): 1–7.
- [50] Savchenkov A A, Ilchenko V S, Matsko A B, et al. Tunable Filter based on Whispering Gallery Modes[J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(4): 389–391.
- [51] Pandit N, Jaiswal R K, Pathak N P. Microwave Multi-Bandnotch Filter using Spoof Surface Whispering Gallery Mode (SS - WGM) Resonator [C]//2021 IEEE MTT - S International Microwave and RF Conference (IMARC). KANPUR, India :IEEE, 2021: 1–3.