

回音壁模式光学微腔特性及研究进展

李 轩, 方 铤

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年4月3日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月19日

摘 要

近年来, 高品质因子(Quality Factor, Q值)回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)光学微腔的研究呈现快速发展态势, 已成为光学与物理学领域的重点研究方向。光学微腔作为一类微型化光学功能元件, 能够同时实现极高的品质因子与极小的模式体积。WGM光学微腔作为光学微腔的典型构型之一, 具有体积紧凑、传感灵敏度优异及光子寿命长等突出优势, 当前其应用研究主要聚焦于多领域传感系统、微型激光器及高性能光学滤波器等关键技术领域。然而, 当前WGM光学微腔的研究尚未迈入规模化量产阶段, 仍局限于实验室层面的原理验证与性能优化, 其工业化落地进程面临制备成本高昂、微纳加工工艺复杂度高等核心技术瓶颈。本文重点综述了WGM光学微腔的最新研究进展, 系统阐述了回音壁模式支撑材料的物理化学特性对微腔Q值的调控机制, 详细梳理了近年来WGM光学微腔在传感检测、激光发射及光学滤波等领域的应用成果, 并对未来WGM光学微腔面临的技术挑战及潜在研究方向进行了展望。

关键词

回音壁模式, 品质因子, 光学微腔

Characteristics and Research Progress of Whispering Gallery Mode Optical Microcavities

Xuan Li, Xuan Fang

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: April 3, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 19, 2026

Abstract

In recent years, the research on Whispering Gallery Mode (WGM) optical microcavities with high Quality Factor (Q-factor) has been developing rapidly and has become a key research direction in the fields

of optics and physics. As a type of miniaturized optical functional component, optical microcavities can simultaneously achieve extremely high Q-factors and extremely small mode volumes. WGM optical microcavities, as one of the typical configurations of optical microcavities, have outstanding advantages such as compact volume, excellent sensing sensitivity, and long photon lifetime. Currently, the application research of WGM optical microcavities mainly focuses on key technical fields such as multi-domain sensing systems, miniature lasers, and high-performance optical filters. However, the research on WGM optical microcavities has not yet entered the stage of large-scale mass production and is still limited to the principle verification and performance optimization at the laboratory level. The industrialization process of WGM optical microcavities faces core technical bottlenecks such as high preparation costs and complex micro-nano processing techniques. This paper focuses on reviewing the latest research progress of WGM optical microcavities, systematically expounds the regulation mechanism of the Q-factor of the microcavity by the physical and chemical properties of the WGM supporting materials, and comprehensively sorts out the application achievements of WGM optical microcavities in the fields of sensing detection, laser emission, and optical filtering in recent years. It also looks forward to the technical challenges and potential research directions that WGM optical microcavities will face in the future.

Keywords

Whispering Gallery Modes, Quality Factor, Optical Microcavity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 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形腔内而形成的谐振模式,具有品质因子(Q值)高、模式体积小[1]和能量密度高等优势。其核心优势在于能够同时实现极高的品质因子与极小的模式体积,从而在腔内形成巨大的能量密度。这一特性为增强光与物质的相互作用提供了理想平台,可高效地激发诸如二次谐波产生、受激拉曼散射等非线性光学过程[2]。鉴于WGM谐振对腔体材料、几何参数及外界环境扰动具有高度敏感性,该特性已被成功转化为高灵敏度的传感应用,覆盖了生物化学检测[3]、温度监测[4]及电磁场感知[5]等多个前沿领域。尽管WGM光学微腔在制备工艺与应用拓展方面已取得显著突破,但针对不同构型(如球形、环形、盘形等)WGM微腔的性能优劣及其在特定场景下的适用性评估,仍有待系统性的深入研究与比较。

本文主要介绍了WGM光学微腔的特性参数、材料的选择对Q值的影响、研究趋势以及在各个领域的重要应用,总结了WGM光学微腔的发展历程和现状。在此基础上,深入剖析了当前研究面临的主要挑战,并对未来的发展趋势与前沿方向进行了展望,旨在为该领域的后续研究提供理论参考与方向指引。

2. WGM 光学微腔概念

本回音壁模式的最初发现源于对特定声学现象的物理解释。1910年, Lord Rayleigh [6]在英国 St. Paul's 大教堂的圆形穹顶下,首次从理论上描述并观测到了一种声学共振现象,这便是回音壁模式的雏形。其基本物理原理在于声波或光波在具有特定几何结构的波导或腔体中,通过连续的全反射进行传播。在此过程中,由于能量泄漏被抑制到极低的水平,波在传播时的能量损耗极小,从而显著增加了其有效传播距离。这一原理在光学领域得到了直接的推广和应用。

在光学微腔中, 光波被约束在折射率较高的介质中传播。当光波传播至与折射率较低介质的界面时(如图 1(a)所示), 若其入射角大于由两种介质折射率决定的临界角, 光波将发生全反射, 从而被有效地限制在微腔内部[7]。当满足光波在微腔内绕行一周的光程等于其在介质中波长的整数倍的特定的谐振条件时, 将产生相长干涉, 其行波传输示意图如图 1(b)所示。这种干涉效应使得特定波长的光场在腔内得到显著增强, 并形成稳定的驻波或行波场分布。这种因几何约束和全内反射而形成的高品质因子光学谐振模式, 被正式命名为“回音壁模式”(Whispering Gallery Mode, WGM)。

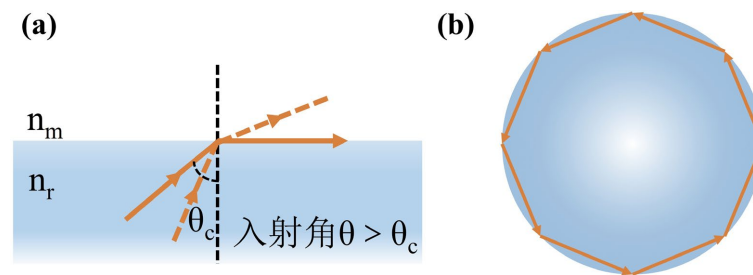


Figure 1. Schematic diagram of the whispering gallery mode. (a) Schematic diagram of total reflection of light on the inner surface of the microcavity; (b) Wave propagation transmission diagram

图 1. 回音壁模式原理图。(a) 微腔内表面全反射光线示意图; (b) 行波传输示意图

WGM 光学微腔是一类具有特殊几何结构与高光学品质因子的谐振腔, 其作为光学器件主要的特征参数包括微腔品质因子(Q 值)、微腔谐振波长(λ)、自由光谱范围(Free Spectral Rang, FSR) [8]。微腔的损耗是评价其光学性能与应用潜力的关键参数之一, 在实验与理论研究中, 通常采用品质因子(Quality Factor, Q 值)来定量描述微腔的损耗特性, 品质因子的定义为:

$$Q = 2\pi \times \frac{W}{W_{Loss \text{ per cycle}}} \quad (1)$$

其中, W 表示微腔内储存的光场能量, $W_{Loss \text{ per cycle}}$ 表示光在微腔内传输一圈过程中所损耗的能量。当光通过适当方式耦合进入微腔后, 将沿着微腔的内壁以全内反射的形式进行传播, 并最终在腔内形成稳定的回音壁模式。该光场的传播路径如图 2 所示, 呈现出典型的环形或近圆形轨迹。谐振波长满足以下表达式:

$$2\pi R n_{\text{eff}} = m\lambda_m \quad (2)$$

式中, R 表示微腔的几何半径, n_{eff} 表示 WGM 的模式有效折射率, m 为正整数代表 WGM 的波数, λ 代表波数为 m 的 WGM 的谐振波长。自由光谱范围(FSR)可通过两个相邻谐振模式的共振波长由上式推导而出[9]:

$$FSR_{\lambda} = |\lambda_{m+1} - \lambda_m| = \frac{\lambda^2}{2\pi R n_{\text{eff}}} \quad (3)$$

可以看出 WGM 的 FSR 是和谐振频率无关的常数, 与微腔的尺寸和微腔的折射率成反比。图 2 对自由光谱范围与共振模式线宽进行了说明。此外, 光学微腔内共振模式的电场空间分布, 是表征其光学特性的一个核心物理量。该参数不仅为设计滤波器、传感器与低阈值激光器[10]等高性能光学器件提供了理论依据, 亦在研究腔内光与物质相互作用的物理过程中扮演着关键角色。与此同时, 光学微腔的有效模式体积是另一个至关重要的参数, 它直接决定了光场与物质相互作用的强度以及微腔的品质因子。

因此, 对回音壁模式光学微腔特性参数的系统性研究, 不仅可以提高品质因数、灵敏度等[11]器件性

能, 更直接推动了其在前沿应用领域的突破性进展, 涵盖了生化传感[12]、光通信网络[13]以及低阈值激光器[14]等核心技术方向。

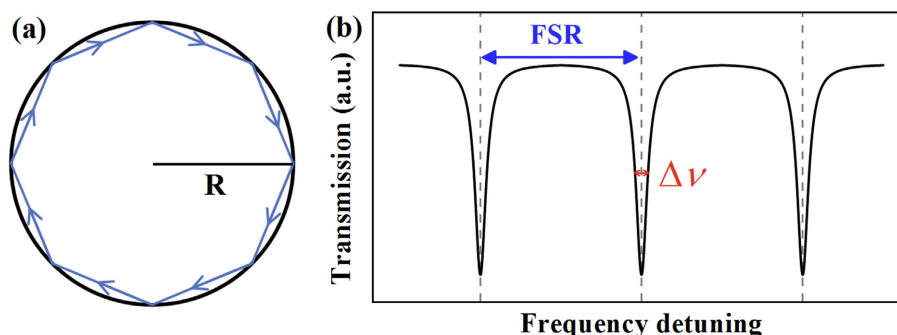


Figure 2. (a) Schematic diagram of total reflection of WGM [9]; (b) The FSR in the microcavity and $\Delta\nu$
图 2. (a) WGM 全反射示意图[9]; (b) 微腔中的 FSR 与 $\Delta\nu$

在构型选择上, WGM 微腔主要包含微球、微盘、微环与微瓶四类典型构型, 其性能与适用性由几何结构直接决定。微球腔具有超高 Q 值、极低损耗与光滑表面, 适用于高灵敏传感, 但三维结构难以实现片上集成。微盘腔兼顾较高 Q 值与平面特性, 制备工艺相对成熟, 适合片上滤波与微腔激光, 然而侧壁粗糙度相对限制其损耗水平。微环腔完全兼容 CMOS 工艺, 易于阵列化与波导集成, 是光通信与片上光子系统的优选, 但其散射损耗导致 Q 值上限较低。微瓶腔依托光纤基底制备, 可调谐性与光纤耦合性优良, 适用于传感器的制备, 但是难以用于片上集成系统。综合来看, 各类 WGM 微腔在 Q 值、损耗、可调谐性与集成性之间存在一定权衡, 需依据应用场景进行构型与性能的匹配设计, 后文将对不同材料和构型微腔的影响及应用展开详细的介绍。

3. WGM 常用材料选取对 Q 值的影响

品质因子(Q 值)是衡量回音壁模式光学微腔性能的核心指标, 直接决定了微腔内光子寿命及光与物质相互作用的强度[15]。材料的选取直接影响了 Q 值的大小, 其决定了微腔的固有吸收损耗, 从而设定了 Q 值的理论上限。为系统说明这一关键影响, 下文将分别对半导体、玻璃、聚合物及晶体四类典型材料进行分析, 论述其自身材料属性对微腔的 Q 值影响。

3.1. 半导体材料

WGM 的激发依赖于光在介质界面通过全内反射被约束在腔内, 根据全内反射条件, 介质的折射率越高, 其与空气或低折射率包层等周围介质的折射率对比就越大, 光被更紧密地束缚在微腔的边界附近。而半导体材料的折射率可以通过外部物理手段进行动态调控, 通过电注入或光泵浦的方式改变半导体中的电子和空穴浓度从而改变折射率, 在设计上具有可调谐性。且半导体材料种类丰富, 可通过调节化合物半导体各元素组分实现发光波长、带隙宽度等精确调控[16]。因此, 半导体材料为 WGM 光学微腔带来的不仅仅是高 Q 值的可能性, 它将一个被动的光学容器转变为一个主动的、可大规模集成的光学功能单元。正是这些综合优势, 使得半导体 WGM 微腔在片上光互连、高灵敏度传感和非线性光学[17]等前沿领域中, 展现出无与伦比的潜力和广阔的应用前景。

2024 年, Kai Xu 等[18]研究了一种新型的电泵浦 WGM 微激光二极管(如图 3(a)所示), 该二极管基于 n-AlGaIn/n-ZnO:Ga 微米线/Pt/MgO/p-GaN 双异质结结构, 器件具有 12.5 mA 的低阈值电流, 品质因子可达 1943。器件实现了 WGM 激光发射, 激光波长位于紫外区域, 并表现出多模特性。双异质结结构有效

地提高了载流子注入效率和光场限制, 从而实现了低阈值激光发射。

2025年, Jianqi Dong 等[19]设计并制备了一种基于 InGaN/GaN 量子阱的核壳微盘器件(如图 3(b)所示), 通过在微盘侧面沉积 SiO₂ 层来构建核壳结构。通过微光致发光光谱和数值模拟, 证明了核壳微盘激光器能够分别在紫外和蓝光波段同时实现 1128 和 882 的高 Q 值 WGM 激光发射。与未涂覆 SiO₂ 层的微盘相比, 核壳微盘的紫外激光阈值降低了 1.6 倍, Q 值提高了 21.7%, 并成功实现了蓝光激光发射。

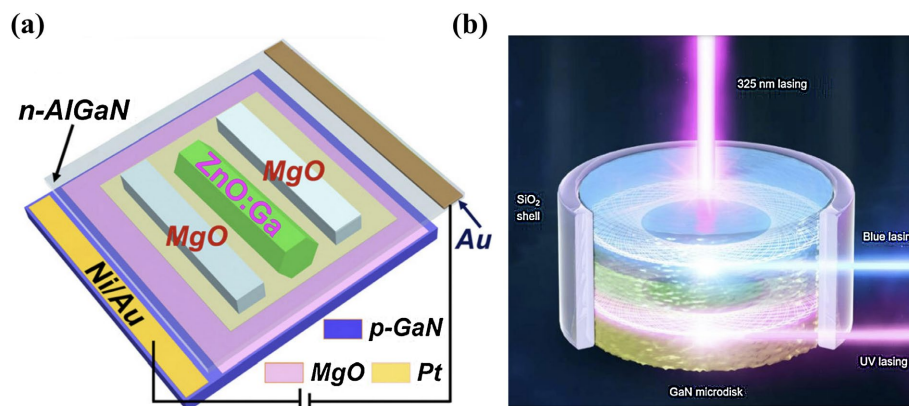


Figure 3. (a) Structural schematic diagram of dual heterojunction devices [18]; (b) Schematic diagram of the core-shell microcavity of WGM laser [19]

图 3. (a) 双异质结器件的结构原理图[18]; (b) WGM 激光的核壳式微盘腔原理图[19]

3.2. 玻璃材料

玻璃材料具备高折射率、易加工等综合优势, 非常契合 WGM 谐振腔对材料性能的要求。2024年, Yantang Huang 等[20]设计制备了一种基于全光调谐的 Yb³⁺/Er³⁺共掺二氧化硅微球腔的回音壁模式激光器。其创新点在于使用 1 μm 波段放大自发辐射宽带光源同时作为泵浦光和调控光, 避免了传统单频激光泵浦下需要同步调整耦合条件的难题, 并通过对微球顶部镀铜膜实现了激光频率的线性调谐, 该研究为可调谐微型激光器的实际应用提供了一种新颖且实用的解决方案。2025年, Chuazhen Zhao 等[21]采用中红外具有低损耗特性的掺铥氟化物, 即 Tm³⁺掺杂的 ZrF₄-BaF₂-YF₃-AlF₃ (ZBYA)玻璃作为制备微瓶的材料, 成功实现了接近 2 μm 波长的稳定单模激光发射, 且成功制备的氟化物微瓶谐振腔的 Q 因子均大于 10⁷, 为实现高性能激光奠定了基础。

3.3. 晶体材料

晶体材料制备的回音壁模式光学微腔通常可实现 10⁸ 量级甚至更高的品质因子。晶体材料高纯度的单晶结构极大地减少了材料内部由杂质和缺陷引起的光子吸收与散射损耗, 从而显著降低了微腔的损耗。然而, 此类微腔的制备加工方法相对单一, 主要依赖于超精密机械研磨抛光、聚焦离子束雕刻等技术, 这些工艺难度大、效率较低, 导致制备成本居高不下。尽管如此, 凭借其卓越的性能, 氟化钙(CaF₂)、氟化镁(MgF₂)以及石英晶体(SiO₂)等低损耗、宽透波段的晶体材料, 仍然是构建高性能 WGM 微腔的常用选择。2024年, Florian Sedlmeir 等[22]从实验上全面论证了晶体 MgF₂ WGM 微腔作为水相环境高灵敏度传感平台的应用潜力, 理论预测了 MgF₂ 相较于熔融石英在灵敏度和双折射效应上的优势, 并从实验验证了 MgF₂ 微腔在水环境中能保持超过 10⁸ 的超高 Q 值。2025年, Shuo Fan 等[23]成功制备了高 Q 值的亚毫米 Yb:CaF₂ 晶体 WGM 微腔, 在 1550 nm 处 Q 值可达 2.8 × 10⁸, 且 1064 nm 处 Q 值可达 3 × 10⁶, 获得了 3 mW 低阈值、斜率效率 13.4% 的高效率和毫瓦级输出的 1064 nm 激光。

3.4. 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。2024 年, Charlie Kersuzan 等[24]设计了一种新型配体, 将巯基琥珀酸与 SU-8 反应, 并将其交换到量子点表面, 成功将 CdSe/CdS/ZnS 量子点的发射可以有效地耦合到聚合物微盘腔的 WGM 中。Soh Kushida 等[25]利用共轭聚合物本身自组装形成微球。由于共轭聚合物兼具高吸收系数、高荧光效率和高折射率等优点, 能同时作为微腔和增益介质, 利用金属衬底的镜面效应, 将激光阈值进一步降低至 $0.37 \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 激光线宽约 0.4 nm , 对应的 Q 因子约为 1200。Zhang Zhang 等[26]提出了一种简单且低成本的表面张力自组装方法, 能够高产率地制备高 Q 值 SU-8 微腔, 并实现了单个微腔的精准转移和片上集成, 最终封装成稳定可靠的器件, 其自组装过程显微照片如图 4 所示。器件在 1540.79 nm 波长处, 测得共振峰的半高全宽为 0.44 nm , 计算得到的负载 Q 因子为 3.5×10^3 。该值与同类聚合物微腔相当, 具备高灵敏度传感的潜力。

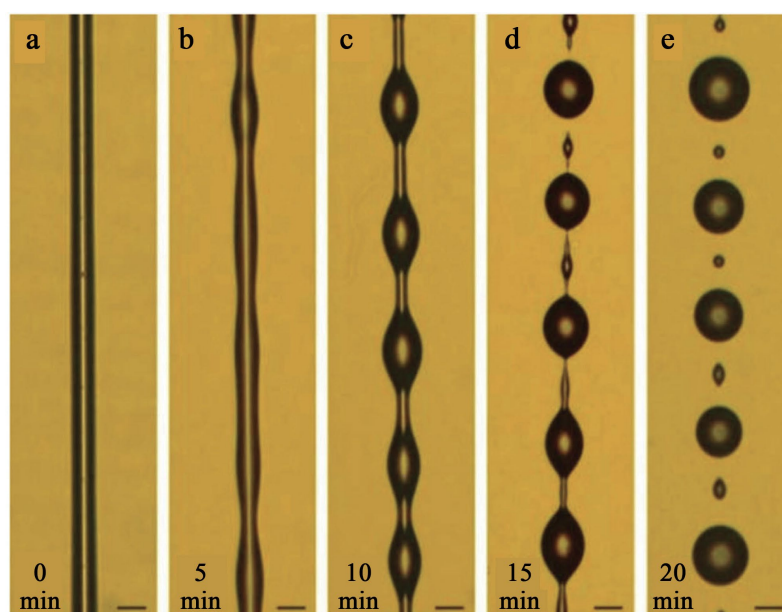


Figure 4. Microscopic photographs of the self-assembly process of the SU-8 hemispherical structure [26]
图 4. SU-8 半球自组装形成过程的显微照片[26]

回音壁模式光学微腔的品质因子受多重因素制约, 包括材料本身损耗、微纳加工工艺[8]以及外界环境扰动等。其中, 微腔的材料选择是决定其性能上限的最直接因素。当前, WGM 微腔材料体系主要体现在权衡 Q 值域制备工艺上, 其中玻璃与聚合物材料虽具备成本低廉、工艺兼容性与制备周期短的优势, 但其损耗通常高于晶体与半导体材料, 导致所能实现的 Q 值有限; 反之, 晶体与半导体材料虽能凭借极低的本征损耗获得极高的 Q 值, 却面临加工技术单一、成本高昂的挑战。因此, 未来的研究核心在于突破上述权衡, 探索能够在维持高 Q 值的前提下, 实现低成本、高效率制备的新材料或新型加工方式。

4. 基于 WGM 光学微腔的应用

WGM 光学微腔在高精度传感领域的规模化应用依赖于其对外部环境的高灵敏响应特性及基底材料本身所具备的固有物理化学属性。当 WGM 光学微腔所处的外部环境产生细微波动, 或其腔壁表面与微量外源粒子发生界面相互作用时, 在腔体内形成的倏逝波场将出现扰动, 最终导致谐振峰值产生偏移效应。基于这一独特物理机制, WGM 光学微腔成为当代传感技术领域的重要研究热点。目前已在生物分子

特异性检测、温湿度多参数协同监测、应力应变精准传感等多个实际应用场景中凸显出显著的技术优势与广阔的产业化前景。本文后续将全面梳理近年来 WGM 光学微腔在传感技术研发、激光功能器件制备及高性能滤波系统构建等关键领域的最新研究成果。

4.1. 生物传感器

Jianli Sun 等[27]开发了一种集成双模式的微流控传感芯片, 将不同 pH 值的 PBS 缓冲液注入微流控芯片, 观察到激光波长发生红移。该方法相比商用 pH 试纸条具有更高的灵敏度, 能够实现更精确的定量分析, 检测范围覆盖 pH 3.6~7.8, 涵盖了人体尿液的正常和异常范围。实现了对人体尿液 pH 值的无标记、高灵敏检测和对尿素、尿酸、肌酐的检测时间小于一分钟且检测限低至 0.02%肌酐的高灵敏度的定量分析。Hongdan Wan 等[28]成功设计并制备了基于 DTN 探针功能化空心微瓶腔的新型 DNA 生物传感器, 成功实现了 260 aM 的超低检测限, 该方法利用了单碱基错配的高特异性识别比传统方法提升了 3 个数量级。该类传感器在早期病毒感染诊断和病原体监测等领域具有巨大的应用潜力。

Ru-Lei Xia 等[29]成功设计、制备并功能化了一种基于 WGM 的圆柱形光学微谐振器生物传感器。在 1607 nm 处测得谐振器的 FWHM 为 0.0284 nm, 计算得出 Q 因子为 5.66×10^4 , 表明谐振器具有较高的光学质量。传感器表现出了 72.48 nm/RIU 的高折射率灵敏度和 2.9×10^{-4} RIU 的低理论检测限。实现了对 SARS-CoV-2 N 蛋白的特异性、无标记检测, 检测限低至 0.23 $\mu\text{g/mL}$ 。这项技术在 COVID-19 的即时检测中具有巨大潜力, 也为其他疾病生物标志物的检测提供了理论支撑。

4.2. 温度传感器与湿度传感器

早在 2006 年, G. Guan 等[30]便将 WGM 微球谐振器的频率漂移原理应用于温度传感。Zhihai Liu 等[31]设计并实验验证了首个基于液态微谐振器的 WGM 温度传感器, 得益于液体较大的热膨胀系数, 其灵敏度达到 0.377 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 远超固态传感器。实验中利用双光纤光镊技术成功解决了液态谐振器的捕获、稳定和定位难题, 表征了传感器在荧光模式下 0.726 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 的灵敏度和激光模式下 0.377 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 的性能, 激光模式具有更高的可靠性。Zhihai Liu 等人指出, 如果能找到热膨胀系数更高的液体材料, 将进一步大幅提升传感器的灵敏度。

Liyuan Zhao 等[32]在 2017 年使用胆甾相液晶(CLC)微滴作为 WGM 激光谐振腔和传感单元。CLC 具有更大的热光系数, 理论上能提供更高的温度灵敏度。采用微毛细管尖端束缚的方式固定 CLC 微滴, 并结合锥形光纤尖端进行光学泵浦, 实现了稳定和可控的激发与测量。实现的 0.96 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 的灵敏度, 这是当时已知的液晶微滴 WGM 温度传感器中的最高值, 相比其他微滴灵敏度提高近一倍。

2025 年, Jiaying Gao 等[33]首次将 Pound-Drever-Hall (PDH)闭环跟踪技术与高阶 WGM 微球谐振器相结合, 其结构如图 5 所示, 主要用于温度传感。通过控制锥形光纤与微球的耦合, 选择性激发高阶 WGM 模式, 其平均 Q 因子超过 10^7 。实现了 1.78×10^{-6} $^{\circ}\text{C}$ 的超高温分辨率和 2.32×10^{-5} $^{\circ}\text{C}$ 的准确度以及实现了 9.2376 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 的温度灵敏度, 这是目前已报道的 WGM 温度传感器中的最佳性能。该项工作代表了光学温度传感领域的一个重大突破, 将温度测量的分辨率推向了新的高度。

4.3. 其他类型传感器

WGM 微腔不仅在生物、温度传感方面有应用, 也可以用于光流体传感及浓度传感。2016 年, Alexandre François 等人[34]在 800 nm 厚涂层毛细管中实现了 WGM 激光发射, 毛细管本身可作为微流通道, 使器件可直接探测内部样品。其制备的激光毛细管灵敏度为 2.9 nm/RIU, 远低于非激光毛细管 23.0 nm/RIU 的灵敏度, 但其超高的 Q 因子使其检测限从 10^{-2} RIU 提升到 10^{-3} RIU, 提升了一个数量级。通过使用更高

效的增益介质, 有望进一步降低激光阈值, 从而可能在更薄的涂层, 例如 400 nm 中也实现激光。

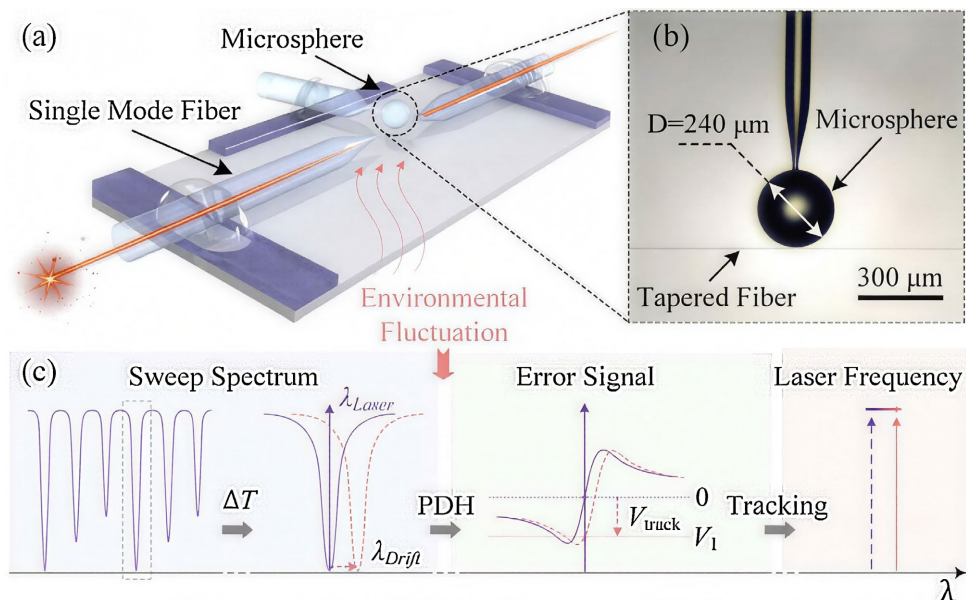


Figure 5. (a) The structure of the optical fiber microsphere WGM sensor; (b) The microscope image of the optical fiber microsphere WGM sensor; (c) The process of characterizing the WGM thermometer using PDH technology [33]

图 5. (a) 光纤微球 WGM 传感器的结构; (b) 光纤微球 WGM 传感器的显微镜图像; (c) 利用 PDH 技术表征 WGM 温度计的过程[33]

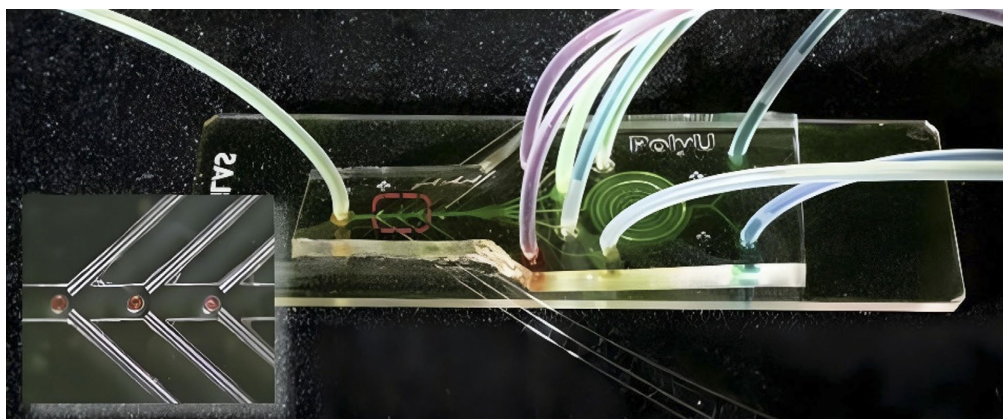


Figure 6. The physical image of the fabricated optical fluid chip [35]

图 6. 制备的光学流体芯片实物图[35]

2020 年, Xia Ouyang 等人[35]开发了一种集成了聚合物 WGM 微激光传感器的光流体芯片, 如图 6 所示。阈值最低 25 nJ/mm², 并首次将其应用于片上酶联免疫吸附测定(ELISA), 实现了对疾病标志物血管内皮生长因子(VEGF)的超高灵敏度检测, 在低泵浦能量下, 计算得出对 VEGF 的检测限低至 17.8 × 10⁻¹⁵ g/mL, 比当前商业 ELISA 试剂盒的性能提高了两个数量级与基于昂贵表面增强拉曼光谱技术的传感器性能相当。

二氧化硅表面疏水, 且湿度变化几乎不引起折射率和尺寸变化, 如前文所述其材料特性显著降低了微腔的损耗, 因此 Md Ashadi Md Johari 等人[36]设计制备了一种基于聚乙烯醇(PVA)涂层的微瓶谐振器, 用于乙醇液体浓度传感。利用 WGM 的光学原理, 通过分析透射光谱功率变化和谐振波长漂移来实现对

乙醇浓度的高灵敏度检测。所有聚乙烯醇涂层的微瓶谐振器均表现出大于 10^4 的品质因子, 其中最大尺寸谐振器的 Q 值最高约为 2.78×10^4 。

4.4. 低阈值激光器

得益于回音壁光学微腔的高品质因子、小模式体积以及腔内损耗低等优势, 其在低阈值激光器的设计制备中也有广泛应用。其中 FAPbI_3 、 MAPbBr_3 等钙钛矿材料, 具备超高室温光学增益, 通过宽发光谱及带隙可调的特点, 能够匹配 WGM 谐振, 因此被广泛应用于低阈值激光器。Xiaoyu Tian 等人[37]采用热共蒸发法在石英衬底上沉积 FAPbI_3 薄膜并利用飞秒激光对预先沉积的 FAPbI_3 薄膜进行精确刻蚀以制备多种多边形微腔。研究了激光阈值随微腔周长的变化关系, 发现在约 $48\sim 108 \mu\text{m}$ 的范围内, 随着周长增加, 激光阈值先降低后升高。其中以六边形的微腔性能最优, 阈值最低约 $4.0 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, 线宽最窄可达 0.62 nm 。2022 年, Junhan Guo 等人[38]成功开发了一种基于马兰戈尼流诱导的“部分溶解-再结晶”机制的一步溶液自组合法, 用于可控制备高取向、高均匀性的 MAPbBr_3 方形微盘阵列, 制备的微盘阵列如图 7(a) 所示, 且制备的微盘具有单晶质量和粗糙度小于 0.6 nm 的光滑表面。微盘作为 WGM 激光器表现出低阈值 $43.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 和 2072 的高品质因子的优异性能, 其单个微盘吸收光谱和光致发光光谱如图 7(b) 所示。

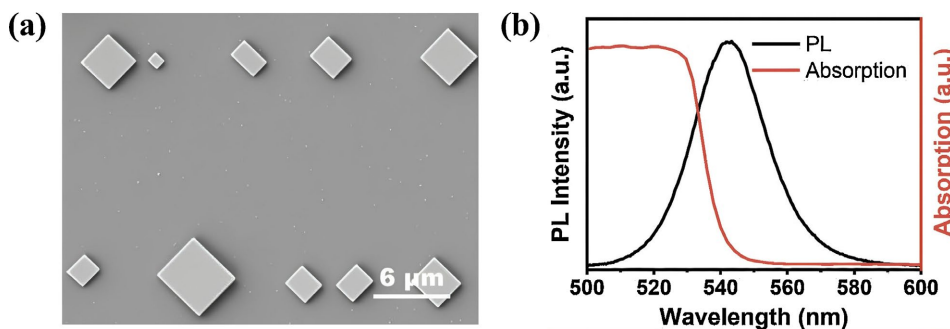


Figure 7. (a) Scanning electron microscope image of the MAPbBr_3 micro-disc array (b) Absorption spectrum and photoluminescence spectrum of a single MAPbBr_3 micro-disc [38]

图 7. (a) MAPbBr_3 微盘阵列的扫描电子显微镜图像; (b) 单个 MAPbBr_3 微盘的吸收光谱和光致发光光谱[38]

4.5. 滤波器

对于滤波器器件, 获得极窄谐振峰、低损耗、稳定带宽调谐的器件是主要的实验目标, 钙钛矿材料损耗大且不稳定, 而成本较低且本征 Q 值较大的熔融二氧化硅是合适的选择。2021 年, Jiwei Li 等人[39]围绕基于 WGM 微腔理想准临界耦合(QCC)态的带宽可调分插滤波器展开系统研究, 搭建基于单模锥形光纤(TF)与微球 WGM 谐振器耦合的实验系统, 采用直径约 $100 \mu\text{m}$ 、本征 Q 值高达 10^8 的微球和直径 $1 \mu\text{m}$ 的 TF, 通过 3D 纳米平台精确调控耦合间隙, 偏振控制器与偏振分束器优化模式偏振态。与此前基于 LP 标量模式的 QCC 滤波器相比, 该滤波器在性能上实现了多项突破, 其调谐范围更宽, Through 端口最小带宽为 6.6 MHz , 比传统方案的 4.8 MHz 更窄, 两端口最大带宽分别是 720.6 MHz 和 775.8 MHz , 远超传统方案的 327.1 MHz 。并且效率更稳定, Drop 端口转换效率大于 95% , 显著高于传统方案的 37% , 且插入损耗波动更小。其结构依赖性更低, 无需额外物理通道提取下拉模式, 避免了传统方案因多通道耦合导致的结构不稳定问题, 进一步强化了其实际应用价值。

近年来, 光学微腔领域发展迅速, 在生物检测等实际应用场景, 对微腔传感器的实用性提出了诸多挑战, 也孕育了广阔的发展机遇。微腔在激光器、滤波器等光学器件中的成功应用, 进一步印证了其在光学领域的核心地位与重要价值。随着微纳加工技术的不断进步, 回音壁模式微腔在实际应用中面临的

各类技术瓶颈有望逐步得到解决, 进而推动其从实验室研究走向规模化的实际应用。

5. 结论

回音壁模式光学微腔凭借其独特的光场限制能力可以实现高的品质因子、小的模式体积和较低的光学损耗。WGM 腔在低阈值激光器的设计与实现、高性能光学滤波器的构建等方面亦展现出广泛的应用潜力。若未来光通信技术成为信息传输的主流方案, 全光信息处理系统将高度依赖于低损耗、高性能的光子器件。WGM 腔所具备的高 Q 值和小模式体积特点, 可集成于硅光、氮化硅等各类高性能光电器件中, 强化片上集成能力, 进而在全光通信领域带来突破性进展。同时, WGM 微腔可继续深化与腔光力学的研究, 利用 WGM 微腔的光学谐振和机械振动耦合, 发展灵敏传感、压力传感等方向。

目前, WGM 谐振腔的相关研究仍主要处于实验室探索阶段, 尚未实现规模化与产业化制备。其工业化推广面临制备成本高、工艺复杂度大等现实挑战, 其中超光滑表面加工技术及高深宽比刻蚀技术是主要的工艺优化方向。为实现 WGM 腔从实验室走向实际应用, 未来研究需着力解决以下诸多关键问题。首先, 需开发成本更低、周期更短且具备高精度与高重复性的制备工艺。其次, 必须优化 WGM 腔与波导、光纤等的高效耦合方案, 提升耦合效率并增强其对外部扰动的能力。最后, 应着力改善 WGM 腔对外部环境因素的敏感性, 以确保其在滤波器、传感器等器件中具备良好的工作稳定性与可靠性。

参考文献

- [1] Chen, Y., Yin, Y., Ma, L. and Schmidt, O.G. (2021) Recent Progress on Optoplasmonic Whispering-Gallery-Mode Microcavities. *Advanced Optical Materials*, **9**, Article ID: 2100143. <https://doi.org/10.1002/adom.202100143>
- [2] Wu, X., Wang, K., Wang, H., Lu, B., Gao, Y. and Wang, C. (2023) The Nonlinear Effects and Applications of Gain Doped Whispering-Gallery Mode Cavities. *Europhysics Letters*, **141**, Article ID: 25001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/acaac5>
- [3] Yu, D., Humar, M., Meserve, K., Bailey, R.C., Chormaic, S.N. and Vollmer, F. (2021) Whispering-Gallery-Mode Sensors for Biological and Physical Sensing. *Nature Reviews Methods Primers*, **1**, Article No. 83. <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00079-2>
- [4] Liao, J. and Yang, L. (2021) Optical Whispering-Gallery Mode Barcodes for High-Precision and Wide-Range Temperature Measurements. *Light: Science & Applications*, **10**, Article No. 32. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00472-2>
- [5] Jia, T., Xing, E., Li, J., Rong, J., Yue, H., Zhang, Y., et al. (2025) High-Precision Quasi-Static Sensing Method Based on WGM Resonator Self-Modulation. *Photonics Research*, **13**, 1375-1384. <https://doi.org/10.1364/prj.549972>
- [6] Rayleigh, L. (1910) CXII. The Problem of the Whispering Gallery. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **20**, 1001-1004. <https://doi.org/10.1080/14786441008636993>
- [7] 赵宏春. 回音壁模式光学微腔传感原理及性能研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [8] Yuan, G., Li, H., Luo, X., Lu, L. and Zhu, L. (2023) Microtubule WGM Sensor: Applications and Key Technologies. *Bio-Chip Journal*, **17**, 192-217. <https://doi.org/10.1007/s13206-023-00106-2>
- [9] 周权. 高 Q 值回音壁模式微腔传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [10] Wang, Z., Zhou, B. and Zhang, A.P. (2024) High-Q WGM Microcavity-Based Optofluidic Sensor Technologies for Biological Analysis. *Biomicrofluidics*, **18**, Article ID: 04150. <https://doi.org/10.1063/5.0200166>
- [11] He, L., Özdemir, Ş.K. and Yang, L. (2013) Whispering Gallery Microcavity Lasers. *Laser & Photonics Reviews*, **7**, 60-82. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100032>
- [12] Guo, Y., Liang, Y., Li, Y., Tian, B., Fan, X., He, Y., et al. (2024) Optical Microcavities Empowered Biochemical Sensing: Status and Prospects. *Advanced Devices & Instrumentation*, **5**, Article ID: 0041. <https://doi.org/10.34133/adi.0041>
- [13] Yang, S., Wang, Y. and Sun, H. (2015) Advances and Prospects for Whispering Gallery Mode Microcavities. *Advanced Optical Materials*, **3**, 1136-1162. <https://doi.org/10.1002/adom.201500232>
- [14] Ge, K., Ruan, J., Cui, L., Guo, D., Tong, J. and Zhai, T. (2022) Dynamic Manipulation of WGM Lasing by Tailoring the Coupling Strength. *Optics Express*, **30**, 28752-28761. <https://doi.org/10.1364/oe.467945>
- [15] Savchenkov, A.A., Borri, S., Siciliani de Cumis, M., Matsko, A.B., De Natale, P. and Maleki, L. (2018) Modeling and

- Measuring the Quality Factor of Whispering Gallery Mode Resonators. *Applied Physics B*, **124**, Article No. 171. <https://doi.org/10.1007/s00340-018-7033-7>
- [16] Mokhtara, F. (2023) Study of the Optoelectronic Properties of Antennary Semiconductor Alloy. Faculty of Science and Technology, Univ. BBA.
- [17] Stegeman, G.I. and Stegeman, R.A. (2012) *Nonlinear Optics: Phenomena, Materials and Devices*. John Wiley & Sons.
- [18] Xu, K., Wan, P., Liu, M., Shi, D., Kan, C. and Jiang, M. (2024) An Electrically-Pumped WGM Microlaser Realized in an n-AlGaIn/n-ZnO:Ga microwire/Pt/MgO/p-GaN Double-Heterojunction Device. *Journal of Materials Chemistry C*, **12**, 17818-17828. <https://doi.org/10.1039/d4tc03377a>
- [19] Dong, J., Liang, Z., He, C., Liu, N., Chen, Z., Wang, Q., *et al.* (2026) Core-Shell Microdisk with InGaIn/GaN Quantum Wells for Dual-Band WGM Lasing. *Chip*, **5**, Article ID: 100150. <https://doi.org/10.1016/j.chip.2025.100150>
- [20] Huang, Y., Liao, S., Tu, B., Xu, Q., Zeng, Z. and Xu, C. (2024) All-Optical Tuning of the Frequency of Yb³⁺/Er³⁺ Co-Doped Microsphere WGM Laser Pumped by 1 μm ASE Light Source. *Optics & Laser Technology*, **169**, Article ID: 109907. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109907>
- [21] Zhao, C., Tian, K., Sun, X., Sun, X., Li, X., Yin, Y., *et al.* (2025) Near 2 μm Singlemode Laser Emission from a Fluoride Microbottle Resonator by Loss Engineering. *Journal of Lightwave Technology*, **43**, 7351-7356. <https://doi.org/10.1109/jlt.2025.3569946>
- [22] Sedlmeir, F., Zeltner, R., Leuchs, G. and Schwefel, H.G.L. (2014) High-Q MgF₂ Whispering Gallery Mode Resonators for Refractometric Sensing in Aqueous Environment. *Optics Express*, **22**, 30934-30942. <https://doi.org/10.1364/oe.22.030934>
- [23] Fan, S. and Lin, G. (2025) Whispering Gallery Mode Lasing in a Fiber-Coupled Sub-Millimeter Yb:CaF₂ Crystalline Microcavity. *Journal of Luminescence*, **287**, Article ID: 121479. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2025.121479>
- [24] Kersuzan, C., Celaj, S., Daney de Marcillac, W., Pons, T. and Maitre, A. (2024) Photolithographed Whispering Gallery Mode Microdisk Cavities Coupled to Semiconductor Quantum Dots. *ACS Photonics*, **11**, 1715-1723. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.4c00023>
- [25] Kushida, S., Okada, D., Sasaki, F., Lin, Z., Huang, J. and Yamamoto, Y. (2017) Low-Threshold Whispering Gallery Mode Lasing from Self-Assembled Microspheres of Single-Sort Conjugated Polymers. *Advanced Optical Materials*, **5**, Article ID: 1700123. <https://doi.org/10.1002/adom.201700123>
- [26] Zhang, Z., Yao, N., Pan, J., Zhang, L., Fang, W. and Tong, L. (2019) A New Route for Fabricating Polymer Optical Microcavities. *Nanoscale*, **11**, 5203-5208. <https://doi.org/10.1039/c8nr10007a>
- [27] Sun, J., Mao, W., Xia, C., Wang, W., Cui, Q., Shi, Z., *et al.* (2023) Plasmon-Coupled GaN Microcavity for WGM Lasing and Label-Free SERS Sensing of Biofluids. *Advanced Optical Materials*, **12**, Article ID: 2301989. <https://doi.org/10.1002/adom.202301989>
- [28] Wan, H., Zhang, S., Gu, Y., Xiong, J., Xu, J., Wan, C., *et al.* (2023) Label-Free, Ultra-Low Detection Limit DNA Biosensor Using High Quality Optical Microcavity Functionalized by DNA Tetrahedral Nanostructure Probes. *Nanophotonics*, **12**, 3323-3331. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0238>
- [29] Xia, R., Liu, B., Hu, Y., Liu, J., Fu, Y., He, X., *et al.* (2023) Rapid Detection of SARS-CoV-2 Nucleocapsid Protein by a Label-Free Biosensor Based on Optical Fiber Cylindrical Micro-resonator. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 12511-12518. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3274110>
- [30] Guan, G., Arnold, S. and Otugen, M.V. (2006) Temperature Measurements Using a Microoptical Sensor Based on Whispering Gallery Modes. *AIAA Journal*, **44**, 2385-2389. <https://doi.org/10.2514/1.20910>
- [31] Liu, Z., Liu, L., Zhu, Z., Zhang, Y., Wei, Y., Zhang, X., *et al.* (2016) Whispering Gallery Mode Temperature Sensor of Liquid Microresonator. *Optics Letters*, **41**, 4649-4652. <https://doi.org/10.1364/ol.41.004649>
- [32] Zhao, L., Wang, Y., Yuan, Y., Liu, Y., Liu, S., Sun, W., *et al.* (2017) Whispering Gallery Mode Laser Based on Cholesteric Liquid Crystal Microdroplets as Temperature Sensor. *Optics Communications*, **402**, 181-185. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.06.008>
- [33] Gao, J., Jin, W., Zhang, Y., Sun, J., Li, S., Mou, J., *et al.* (2025) Ultrahigh-Resolution High-Order WGM Microsphere Temperature Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **74**, 1-7. <https://doi.org/10.1109/tim.2025.3612558>
- [34] François, A., Riesen, N., Gardner, K., Monro, T.M. and Meldrum, A. (2016) Lasing of Whispering Gallery Modes in Optofluidic Microcapillaries. *Optics Express*, **24**, 12466-12477. <https://doi.org/10.1364/oe.24.012466>
- [35] Ouyang, X., Liu, T., Zhang, Y., He, J., He, Z., Zhang, A.P., *et al.* (2020) Ultrasensitive Optofluidic Enzyme-Linked Immunosorbent Assay by On-Chip Integrated Polymer Whispering-Gallery-Mode Microlaser Sensors. *Lab on a Chip*, **20**, 2438-2446. <https://doi.org/10.1039/d0lc00240b>
- [36] Ashadi Md Johari, M., Hafiz Bin Jali, M., Helmi Bin Mohd Yusof, H., Rafis Bin Abdul Rahim, H., Binti Ahmad, A., Imran

- Mustafa Abdul Khudus, M., *et al.* (2021) Polyvinyl Alcohol Coating Microbottle Resonator on Whispering Gallery Modes for Ethanol Liquid Sensor. *Optics & Laser Technology*, **143**, Article ID: 107379.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107379>
- [37] Tian, X., Wang, L., Li, W., Lin, Q. and Cao, Q. (2021) Whispering Gallery Mode Lasing from Perovskite Polygonal Microcavities via Femtosecond Laser Direct Writing. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 16952-16958.
<https://doi.org/10.1021/acsami.0c21824>
- [38] Guo, J., Tang, Y., Li, L., Liu, B., Li, L., Meng, F., *et al.* (2022) Fabrication of Discontinuous Dendritic CH₃NH₃PbBr₃ Perovskite Microdisk Arrays for Microlasers. *Advanced Optical Materials*, **10**, Article ID: 2201519.
<https://doi.org/10.1002/adom.202201519>
- [39] Li, J., Hu, Y., Gan, X., Gao, F., Zhang, W., Huang, L., *et al.* (2021) Bandwidth Tunable Filter Based on Ideal Quasi-Critical Coupling State in WGM Cavity. *Journal of Lightwave Technology*, **39**, 6547-6552.
<https://doi.org/10.1109/jlt.2021.3104397>