

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250323.

专题:纪念创刊50周年

王梦宇. 氟化镁微腔光频梳研究进展[J]. 光通信研究, 2025(6): 250323.

Wang M Y. Research Progress on MgF₂ Microcavity Optical Frequency Combs[J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250323.

氟化镁微腔光频梳研究进展

王梦宇

(南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室,南昌 330063)

摘要:微腔光频梳(OFCs)凭借其小型化、功耗低、可集成和高相干性的优势,在双梳光谱学、相干光通信、激光雷达和光钟等领域具有显著的应用价值。文章首先概述了微腔 OFCs 的研究意义,然后对微腔 OFCs 进行了介绍;接着简述了氟化镁(MgF₂)微腔的制备和封装技术;然后阐述了 MgF₂微腔 OFCs 的产生和调控方法;最后重点介绍了 MgF₂微腔 OFCs 的应用,包括微波光子、光通信和精密计量等。

关键词:氟化镁微腔;光频梳;光学非线性;微波光子;光通信

中图分类号:TN248 **文献标志码:**A

Research Progress on MgF₂ Microcavity Optical Frequency Combs

WANG Mengyu

(Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Microcavity Optical Frequency Combs (OFCs) have significant application value in dual-comb spectroscopy, coherent optical communication, laser radar, optical clocks, and other fields due to their advantages of miniaturization, low power consumption, integration, and high coherence. The article first outlines the research significance of microcavity OFCs, then briefly describes the preparation and packaging of Magnesium Fluoride (MgF₂) microcavities. Next, the article introduces the microcavity OFCs and focuses on the generation and regulation methods of MgF₂ microcavity OFCs. Finally, it highlights the applications of MgF₂ microcavity OFCs, including microwave photonics, optical communication, and precision measurement.

Key words: MgF₂ microcavity; OFCs; optical nonlinearity; microwave photonics; optical communication

0 引言

光学频率梳,简称光频梳(Optical Frequency Combs, OFCs),是由一系列离散和等间隔的频率成分组成的宽带光谱^[1],可产生一系列具有相等频率间隔的光学频率,就像一把梳子的梳齿。OFCs 可以用来精确测量光的频率,从而实现超高精度的时间和长度标准,以及对原子和分子的精密光谱分析^[2]。OFCs 频域上覆盖百 THz 带宽,频率测量精度可溯源至时间频率基准,有效地提供了微波到光频的相干互联^[3]。因其输出信号具备高质量、高重频和宽光谱范围等颠覆性的特性,结合现有各类应用场景均有跨越式的进步,该技术获得 2005 年诺贝尔物理学奖。

OFCs 的产生是继超短脉冲产生之后又一重大意义的激光技术。早期的 OFCs 是由锁模激光器产生^[4],但锁模激光器体积大且价格昂贵,因而限制

了 OFCs 的发展。随着新一代集成芯片技术、新型光电子集成技术等新兴领域的发展,光电子器件趋于小型化,集成度越来越高,功能越来越强。光学微腔频率梳,简称微腔 OFCs,是一种新型的 OFCs 技术^[5],与传统锁模激光器产生的 OFCs 相比,其大大减小了系统的体积和功耗。微腔 OFCs 具有小尺寸、低功耗和可单片集成等优势^[6],而且在控制群速度色散上相对更加灵活,更易获得倍频程 OFCs。随着微加工技术的逐渐成熟,微腔 OFCs 频率间隔可以轻松覆盖 GHz 到 THz 量级。尤其,微腔 OFCs 是如今唯一有望实现芯片级的 OFCs 系统,大大推动了 OFCs 的小型化,有望作为下一代集成光源,在相干光通信、微波信号产生、气体探测、光谱学、雷达和量子密钥分发等方面展现前所未有的优势,成为科研和产业界研究热点^[7]。

目前多种材料微腔平台已实现微腔 OFCs,如二氧化硅(SiO₂)^[8]、高折射率二氧化硅(Hydex)^[9]、

收稿日期:2025-10-08; 修回日期:2025-10-27; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62465014); 赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人资助项目(20232BCJ23096); 江西省自然科学基金资助项目(20232BAB212016, 20224BAB202006)

作者简介:王梦宇(1992-),男,江西丰城人。副教授,博士,主要研究方向为光学微腔和微腔光频梳。

通信作者:王梦宇,副教授。E-mail: mengyu@nchu.edu.cn

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

氟化钙(CaF_2)^[10]、氟化镁(MgF_2)^[11]、氟化钡(BaF_2)^[12]、氮化硅(Si_3N_4)^[13]、氮化铝(AlN)^[14]、砷化铝镓(AlGaAs)^[15]和铌酸锂(LiNbO_3)^[16]等。其中, MgF_2 材料微腔具备吸收常数小、缺陷少、纯度高和透明窗口广的特点,并且相比 SiO_2 材料微腔, MgF_2 材料微腔对周围环境湿度更不敏感,还兼顾半导体微腔可集成的优势。 MgF_2 微腔一方面可实现超高品质因子 Q 值^[17],提高了OFCs转换效率;另一方面具有天然负色散的优势,可实现孤子OFCs^[11],为微腔OFCs的发展带来了诸多契机。

本文主要介绍了基于超高品质因子 Q 值 MgF_2 微腔的制备工艺与封装技术,然后介绍了微腔OFCs的产生原理、激发阈值与演化过程,随后介绍了 MgF_2 微腔OFCs的产生和调控方法,最后介绍了 MgF_2 微腔OFCs的应用前景。同时,本文还对当前 MgF_2 微腔OFCs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 微腔 OFCs

OFCs在频域上表现为具有相等频率间隔的光学频率序列,在时域上表现为具有飞秒量级时间宽度的电磁场振荡包络,其光学频率序列的频谱宽度与电磁场振荡慢变包络的时间宽度满足傅里叶变换关系,相邻光谱线的频率间隔由OFCs的脉冲重复频率决定。微腔OFCs的产生原理基于微腔内的四波混频(Four Wave Mixing, FWM)效应^[18],FWM效应来源于微腔中3阶非线性效应,是两个光子或者3个光子相互作用,产生新的光子的过程。根据两个泵浦光子频率不同将FWM分为两种,分别为简并四波混频(Degenerate FWM)效应和非简并四波混频(Non-Degenerate FWM)效应。考虑泵浦功率 P_{in} ,泵浦阈值 $P_{\text{in}}^{\text{th}}$ 公式可表示为

$$P_{\text{in}}^{\text{th}} = \left[\frac{\Delta\nu^2}{4} + \left(\frac{\pi\nu_{\text{p}}}{Q} \right)^2 \right] \cdot \frac{4\pi^2 n_0^2 V}{\Delta\nu \cdot n_1 \cdot \eta_{\text{ext}} \cdot c \cdot Q}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\nu$ 为微腔半高全宽; ν_{p} 为泵浦光频率; V 为微腔内模式体积; n_0 为空气折射率; n_1 为微腔的材料折射率; η_{ext} 为功率耦合系数; c 为光速。在满足频率匹配和泵浦功率所需阈值条件下,这些频率转换过程得以发生,也正是由于简并FWM和非简并FWM效应,使光学微腔能得到宽范围OFCs。如图1上半部分所示,用连续波激光束泵浦一个 MgF_2 微腔产生参数频率转换。微腔OFCs基本原

理就是FWM参量的转换过程,泵浦光进入腔内后,在非简并FWM和简并FWM效应作用下光谱得到展宽。如图1下半部分所示,首先在简并FWM作用下泵浦光附近会出现第1对边带,这对边带也通常被理解为是由于泵浦光调制不稳定性所产生。接着由于非简并FWM,第1对边带与泵浦光之间产生更多新梳齿,梳齿之间频率间隔通常为 $N \times f_r$, N 为整数, f_r 为自由光谱范围。

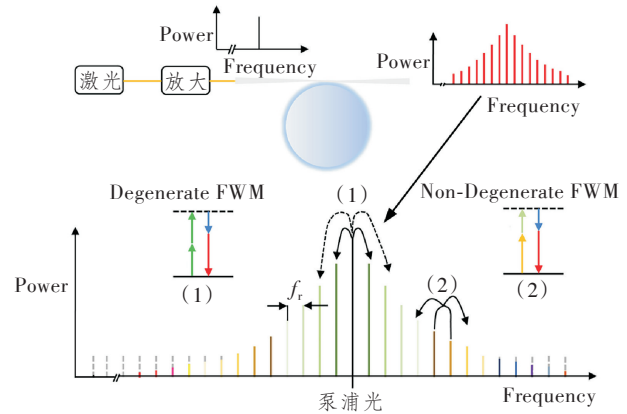


图1 微腔FWM效应产生OFCs原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of the principle of generating OFCs through microcavity FWM effect

研究微腔OFCs的理论如今已比较成熟,研究微腔OFCs常见的方法有从频域角度出发描述腔内各频率模式互相耦合的耦合模方程(Coupled-mode Equation)^[19]和从时域演化角度出发描述腔内光场包络的Lugiato-Lefever方程(Lugiato-Lefever Equation, LLE)^[20]。LLE用微腔内部的方位角作为参照系,研究整体振幅和方位角之间的关系,这个方程的优点是不用单独考虑微腔中的每个模式,而是整体宏观把握。LLE可以在单横模传输条件下,用微腔内的光场非线性薛定谔方程(Non-Linear Schrodinger Equation, NLSE)结合微腔在传输过程的边界条件推导出。LLE^[20]可表示为

$$t_{\text{R}} \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = \left[-\epsilon - i\delta_0 + iL \sum \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + i\zeta L |E|^2 \right] E + \sqrt{K} E_{\text{in}},$$

式中: E 为微腔中的光场; τ 和 t 分别为快时间和慢时间; t_{R} 为微腔环程时间; i 为虚数单位; ϵ 为腔内的总能量损耗; δ_0 为腔内特定谐振模式与泵浦间的失谐量; L 为微腔的腔长; β_k 为泵浦频率处的 k 阶色散量; ζ 为有效非线性系数; K 为强度耦合系数; E_{in} 为连续光泵浦场。

归一化LLE可表示为

$$\frac{\partial \tilde{E}(\tilde{t}, \theta)}{\partial \tilde{t}} = \left[-l - i\Delta + i \sum \frac{\xi_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \theta} \right)^k + i |\tilde{E}|^2 \right] \tilde{E} + S, \quad (2)$$

式中： \tilde{E} 为微腔中的归一化光场； \tilde{t} 、 θ 、 l 、 Δ 、 ξ_k 和 S 分别为归一化后的快时间、慢时间、损耗、失谐量、色散量和泵浦量。

由式(2)可知，归一化后的 LLE 中仅存在 3 个自由参量，即归一化失谐量 Δ 、色散量 ξ_k 和泵浦量 S 。且归一化后的自由参量均为无量纲量，这使得在分析时不用考虑具体微腔相关参数的单位换算，归一化后的 LLE 为研究微腔 OFCs 提供了很大的便利。采用分步傅里叶法 (Split-Step Fourier Method) 对式(2)归一化 LLE 进行求解。通过结合图灵环态、混沌态和孤子态 OFCs 的参数区间分布，参照选取合适的归一化失谐和泵浦功率，可分析反常色散在克尔 OFCs 演变过程中的影响。

通过代入 MgF_2 微腔的参数，针对图灵环 OFCs、混沌态 OFCs、孤子 OFCs 和呼吸孤子 OFCs 等几种类型的 OFCs 及其特性进行分析。图灵环 OFCs 是 OFCs 开始形成的初始不稳定状态^[21]。当泵浦光耦合进入微腔且处于蓝失谐区域时，在正向调谐过程中增加泵浦功率，若微腔色散满足 OFCs 产生要求，泵浦功率达到参量振荡阈值^[22]，此时会有梳齿间隔比较大的梳齿产生，即为图灵环 OFCs，其典型特征是梳齿间隔为多倍自由频谱范围 (Free Spectrum Range, FSR)，其梳齿间隔 Δl 可由

微腔的色散和非线性系数计算得到

$$\Delta l = \sqrt{\frac{2}{\beta}(\alpha - 2\rho)}, \quad (3)$$

式中： β 特指二阶色散； α 为只考虑二阶色散的失谐值； ρ 为平衡态时的腔场强度。

图 2 所示为在反常色散条件下对应的图灵环 OFCs 仿真结果，对于图灵环 OFCs 而言，其梳齿间隔为多少倍 FSR，其时域上也表现为几个卷状分布，图 2(a) 为具有 7 倍 FSR 梳齿间隔的图灵环 OFCs，其时域为 7 个卷状分布，结合仿真参数通过式(3)计算 Δl 约为 7，这与梳齿间隔 7 倍 FSR 相吻合。为了得到 LLE 的稳定解，即稳定状态的孤子 OFCs，这时候需要改变失谐量和增加泵浦值，在泵浦值增加的过程中，会出现介于图灵环 OFCs 和孤子 OFCs 之间的调制不稳定态的混沌态 OFCs^[23]。图 2(b) 所示为仿真得到的混沌态 OFCs，其时域分布表现为杂乱无章的噪声，光谱结构会随着时间的变化而变化，在实际演化的过程中，图灵环 OFCs 向混沌态 OFCs 转化是一个渐变的过程，二者没有明显的界限。

由于孤子 OFCs 的产生既要满足色散和非线性之间的平衡，又要满足增益与损耗之间的平衡，所以很难通过调谐某一个参数得到。无论是实验还是仿真，都需要对参数不断进行调试，才能最终得到孤子 OFCs。图 2(c) 是使用分步傅里叶算法对 LLE 求得的孤子 OFCs，腔内光场强度和归一化失谐值

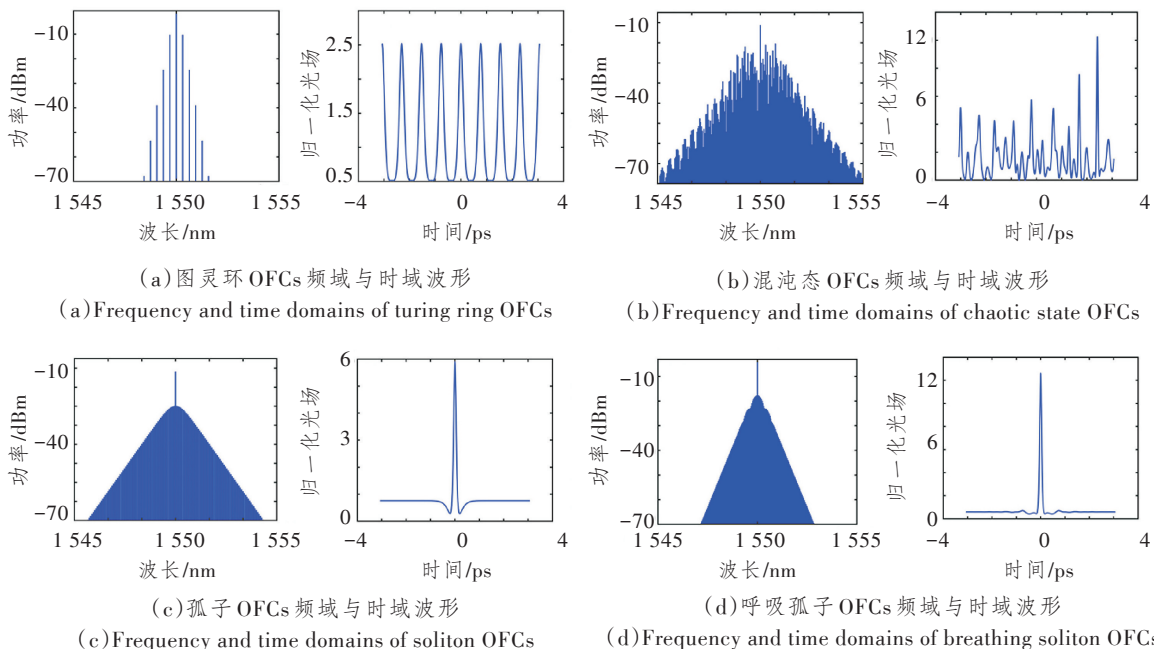


图 2 微腔 OFCs 演化过程

Figure 2 Evolution process of microcavity OFCs

在数值上相等时即可产生孤子 OFCs。针对具有其他色散值的微腔,在实验和理论仿真中可以在孤子存在区域进行参数调试从而得到孤子 OFCs。孤子 OFCs 的时域波形表现为一个窄脉冲,中心位置以外区域均为低功率直流背景,整个波形呈轴对称,其光谱波形为标准的平滑正割包络形状,其波形关于泵浦梳齿对称,对比混沌态 OFCs 可以发现,孤子 OFCs 具有极低的噪声特性。孤子 OFCs 还有一种特殊的形态,即呼吸孤子,其一般是由于极高的泵浦功率产生,图 2(d)所示为仿真得到的呼吸孤子,虽然呼吸孤子在外形上仍然具有双曲正割包络特性,但是其幅度会随着慢变时间变化,而且时域波形底部会有一定程度的起伏,从这个角度也能看出呼吸孤子是一种不稳定的孤子状态。

2 MgF₂ 微腔

MgF₂ 作为一种晶体材料,具有优越的光学特性,如高热稳定性、高透明度和低吸收率。这使得 MgF₂ 微腔能够在保持高品质因子的同时,实现高效的光与物质相互作用。光学微腔品质因子 Q 值对微腔 OFCs 的产生有着非常重要的意义,因为 Q 值表征的是微腔对光能量的存储能力, Q 值越大,腔内光子寿命就会越长,光物质相互作用越强,产生的 OFCs 阈值越低,因此,研制超高 Q 值光学微腔一直是研究者们目标。高品质 MgF₂ 晶体微腔的制备加工难度极高,对材料加工技术和设备要求较

高。但是, MgF₂ 晶体微腔不能采用刻蚀或者熔融方法进行制备,这对超精密加工提出了很大难题。针对高 Q 值 MgF₂ 微腔的制备,科研人员已经提出了多种可行性方案和技术。2006~2007 年,美国加州理工学院喷气推进实验室 Grudin^[24] 与 Savchenkov^[25] 等人利用单点金刚石车削与抛光工艺制备出了品质因子高达 6.3×10^{10} 的 GaF₂ 晶体微腔。2011~2012 年,美国 OEwaves 公司^[11]、德国马克斯·普朗克量子光学研究所^[26] 和洛桑联邦理工学院^[27] 分别利用单点金刚石车削与抛光工艺制备出了品质因子优于 10^9 的 MgF₂ 晶体微腔,验证了制备 MgF₂ 晶体微腔的有效性。

加工表面的粗糙度会限制微腔的 Q 值,降低表面粗糙度和相关长度的可能方法是优化切削参数。日本庆应义塾大学^[28] 为了研究单点金刚石车削方法中的临界切削深度,对单晶 MgF₂ 进行了正交切削实验。制备过程中,采用超精密加工和带有测力仪的工件夹头来检测加工过程中的切削力,如图 3 所示。对于加工工件,使用预抛光的 MgF₂ 单晶衬底,用真空卡盘将其固定在工件夹头上。将 MgF₂ 工件固定在黄铜夹具上,然后安装在真空卡盘上。超精密车削分以下 3 个步骤进行:最初进行粗车削以形成所需的直径;接下来,进行预精切,去除脆性模式切削时产生的大裂纹,去除厚度为 $8 \mu\text{m}$;最后,在韧性模式下,在精加工下完成超精密车削。值得一提的是,使用刀具切割晶体材料,沿着相同的刀具

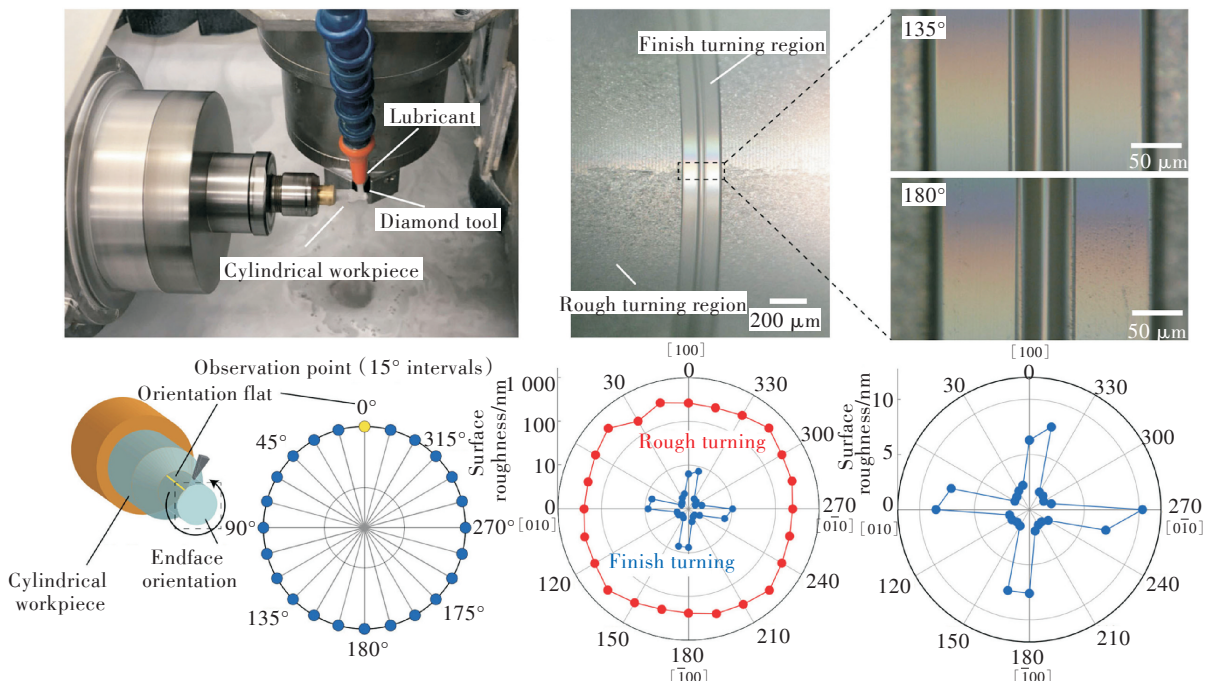


图 3 MgF₂ 微腔超精密圆柱车削与单点金刚石刀具^[28]

Figure 3 Ultra-precision cylindrical turning and single-point diamond tooling of MgF₂ microcavities^[28]

路径移动,其形状可以基于所需来定向设计,且制作的微腔没有裂纹或划痕^[29]。此外,在超精密切削机床制备过程中,可充分利用计算机控制切割技术,以精确地设计制造微腔^[30]。

近年来,国内对 MgF_2 微腔的研究也如火如荼,从 2021 年开始,南昌航空大学^[31](2021)、哈尔滨工业大学^[32](2021)、中国科学技术大学^[33](2022)、北京邮电大学^[34](2022)、上海大学^[35](2022)、江苏师范大学^[36](2022)、北京理工大学^[37](2023)和华中光电技术研究所^[38](2023)先后报道了用精密切削和光学抛光的方法制备超高 Q 值 MgF_2 晶体微腔。图 4 所示为近年来南昌航空大学制备得到的不同腔型 MgF_2 微腔,不同腔型的模式特征不同,具有各自的特性。结合精密抛光的方法,利用磨削和多级抛光等工艺能够充分发挥晶体材料优越的光学特性。

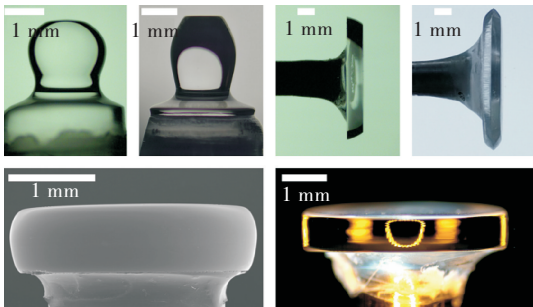


图 4 不同腔型的 MgF_2 微腔(南昌航空大学制备)
Figure 4 MgF_2 microcavities with different shapes (prepared by Nanchang Hangkong University)

高稳定性的集成封装平台是 MgF_2 微腔走向实用化的关键,设计封装方案时除了需要考虑晶体微腔耦合系统可便携化外,同样需要考虑如何在保证系统鲁棒性前提下实现长时间稳定运行。微腔中的模式是被束缚在腔体内部的,需用光纤波导器件通过倏逝场与微腔进行耦合,形成标准化封装集成器件,如图 5 所示。光纤波导器件与 MgF_2 微腔采用接触方式实现光耦合,以提高耦合系统的鲁棒性。封装器件可实现微腔与光纤波导的完美耦合,设计

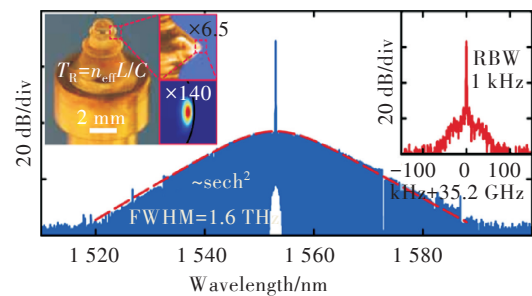


图 5 封装的 MgF_2 微腔器件
Figure 5 Packaging MgF_2 microcavity device

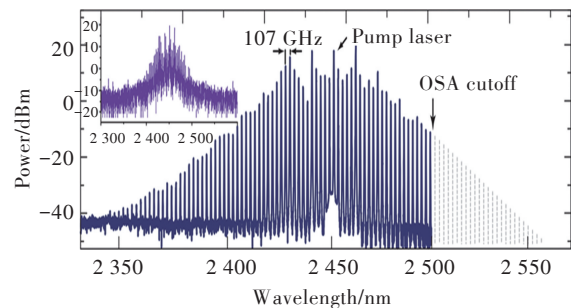
了单独光纤接头,可与其他光纤系统集成。集成封装平台既可以为集成化的微腔 OFCs 提供实验平台,也便于集成于其他的光纤实验中。

3 MgF_2 微腔 OFCs

微腔 OFCs 的研究最早追溯到 2004 年, Kippenberg 等人利用 SiO_2 微芯圆环腔实现了 FWM 效应^[22];2007 年, Del'Haye 等人通过将连续光泵浦石英微芯圆环腔,实现了微腔 OFCs^[39],并观察到了超过 500 nm 宽 OFCs 输出,首次实验上验证了微腔 OFCs 的可行性;2011 年,美国 OEwaves 公司 Liang 所在团队仅用泵浦功率为 2 mW 的连续波光泵浦就在 MgF_2 晶体腔中实现了带宽为 30 nm OFCs 的产生^[17],实现了低阈值功率激发微腔 OFCs。但是,初期产生的 OFCs 通常处于调制不稳定状态,相干性不高、稳定性不好,时域波形无法形成稳定的锁模超短脉冲。2014 年, Herr 等人在 MgF_2 晶体微腔中观察到了高相干性和强稳定性孤子 OFCs^[11],如图 6(a)所示,完美解决了这一问题。这项工作是在 MgF_2 微腔以及微腔 OFCs 中首次泵浦出孤子 OFCs,是 MgF_2 微腔 OFCs 研究领域的一个重要里程碑,此成果成功开启了微腔孤子 OFCs 的研究。



注:RBW 为分辨率带宽。
(a)近红外 OFCs
(a)Near-infrared OFCs



注:OSA 为光学频谱分析仪。
(b)中红外 OFCs
(b)Mid-infrared OFCs

图 6 MgF_2 微腔 OFCs^[11, 40]

Figure 6 MgF_2 microcavity OFCs^[11, 40]

微腔 OFCs 产生光谱范围主要分布在 C 和 L 等通信波段,由于材料吸收等原因将其频谱拓展到可见光以及中红外波段较为困难,通过选择新材料体系等方法将微腔光梳频谱拓展至可见和中红外波段,对于分子光谱学以及光钟等方面应用意义重大。2013年,Wang 等人将 MgF_2 微腔与中红外量子级联激光器结合首次在强反常色散区产生了 OFCs^[40],如图 6(b)所示,为新颖、简单和紧凑的中红外 OFCs 开辟了道路;2015年,OEwaves 公司 Savchenkov 等人使用超精密切割法得到了品质因子为 10^8 的超高 Q 值 MgF_2 微腔^[41],并在 GaF_2 和 MgF_2 微腔中首次实验得到红外波段的长波长 OFCs,采用量子级联激光器作为泵浦源,在 MgF_2 微腔中产生了中心波长位于 $4.5 \mu\text{m}$ 的 OFCs,这项工作激发出的红外波段的长波长 OFCs 对微腔 OFCs 在光谱学中的应用具有一定的推动作用;2022年,中国科学院西安光学精密机械研究所 Wu 等人^[42]使用硫化砷(As_2S_3)锥形光纤耦合 MgF_2 微腔,基于中心波长位于 $4.78 \mu\text{m}$ 的小型化量子级联激光器构建了产生中红外微腔 OFCs 的实验系统,实现了光谱范围在 $3\ 380\sim 7\ 760 \text{ nm}$ 的超宽带中红外光学参量振荡过程,是目前已知波长最长的中红外微腔 OFCs。

孤子 OFCs 是具备高稳定性的一种 OFCs,其脉冲形状和幅值在传播过程中可以长距离保持不变,在微腔中维持着非线性与色散、耗散和增益的双重平衡。 MgF_2 微腔孤子 OFCs 稳定性强的优势增加了其在各领域应用的可能性,不同类型的孤子 OFCs 也通过实验在微腔中逐渐被激发出来,2017年,Lucas 等人在 MgF_2 微腔中激发出不稳定的呼吸孤子 OFCs^[43],相比于时间孤子,呼吸孤子的稳定性较差,这种孤子的脉冲宽度以及孤子数量都会周期性变化,并且随着呼吸强度的增强,孤子外包络呈现三角形的现象更明显;2019年,瑞士洛桑联邦理工学院物理研究所在 MgF_2 微腔中观察并解释了一种导致反向传播孤子群速度对称破缺的新机制^[44],这为色散波在多孤子态形成中的作用提供了新的思路;2022年,加州大学 Taheri 等人通过将两个具有任意大频率分离的独立激光器同时自注入锁定到两个同族腔模式和耗散克尔孤子 OFCs^[45],在 MgF_2 微腔中报道了离散时间孤子实验观察和理论研究,这为芯片级时间晶体铺平了道路。

基于 MgF_2 微腔 OFCs 的实现目前已取得了巨大进展,但在实现微腔 OFCs 的完全集成潜力之

前,仍有许多工作要做,因为微腔 OFCs 仍然需要片上激光器、放大器和其他光纤耦合元件组合才能完成全集成。尤其是集成在芯片上的 OFCs 需要复杂的频率和功率调控系统才能使集成 OFCs 正常运行。美国加利福尼亚大学戴维斯分校联合 OEwaves 公司研究者研制出了 Q 值高达 1.9×10^9 的 MgF_2 集成微腔^[46],如图 7 所示,基于该微腔与分布式反馈(Distributed Feedback,DFB)激光器、对准透镜和驱动电路等其他器件,采用蝶形封装方式封装在单个模块中,可以实现超小尺寸集成封装的 Kerr OFCs 源。 MgF_2 微腔 OFCs 具有紧凑型的结构,易于集成到光电子系统中。这种集成化的特点使得 MgF_2 微腔 OFCs 在器件化方面有着显著的优势,能够满足现代光学系统对高集成度和高性能的需求。

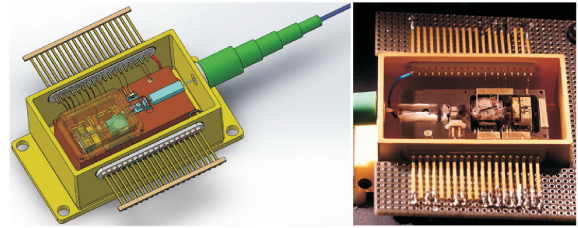


图 7 微腔 OFCs 封装结构^[46]

Figure 7 Microcavity OFCs packaging structure^[46]

4 MgF_2 微腔 OFCs 调控方法

随着 MgF_2 微腔孤子 OFCs 研究的不断开展,激发孤子 OFCs 的实验方法也趋于多样,Herr 等人^[11]通过正向扫频法在 MgF_2 微腔中得到孤子 OFCs,即从微腔谐振频率的蓝失谐向红失谐扫频的方法,产生的具体过程如图 8 所示。这也是目前比较常用的方法,这种方法操作起来简单,而且在调谐过程中可以清晰地看到孤子 OFCs 的演化过程。在泵浦激光从腔模的蓝失谐向红失谐扫频的过程中,首先会进入“初级梳”,随后光谱会不断展宽,同时时域波形发生剧烈变化,对应腔内功率也会有较大的扰动,系统进入调制不稳定或者混沌态。随着扫频的继续进行,腔内功率会陡降并呈现台阶状变化,此时标志着进入孤子态。系统从混沌态进入孤子态产生的孤子数量是随机的,腔内功率台阶状变化对应的则是扫频过程中孤子湮灭的过程。继续扫频,孤子最终会由于失谐过大而消失,孤子台阶的长度与泵浦功率密切相关。

孤子 OFCs 调控中当扫过谐振峰进入红移失谐处时,进入孤子态产生的孤子数量是随机的。由

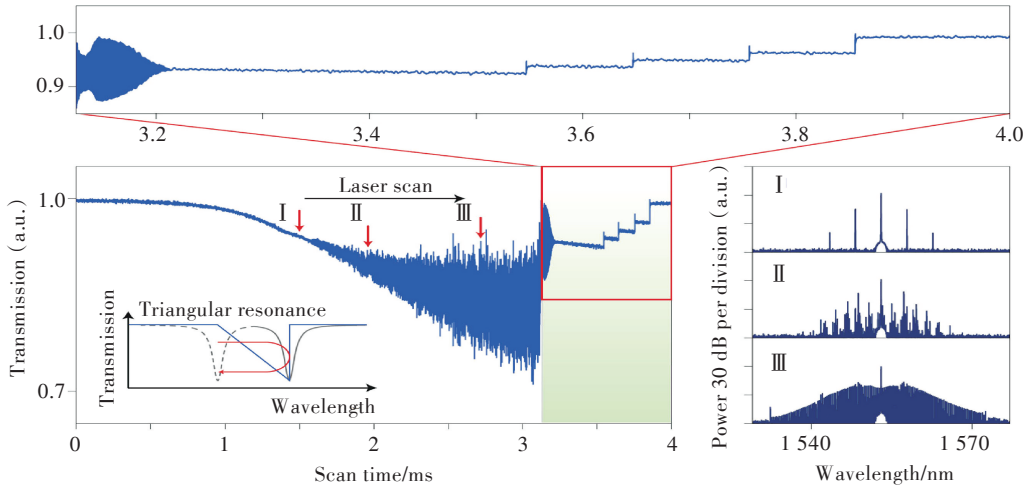
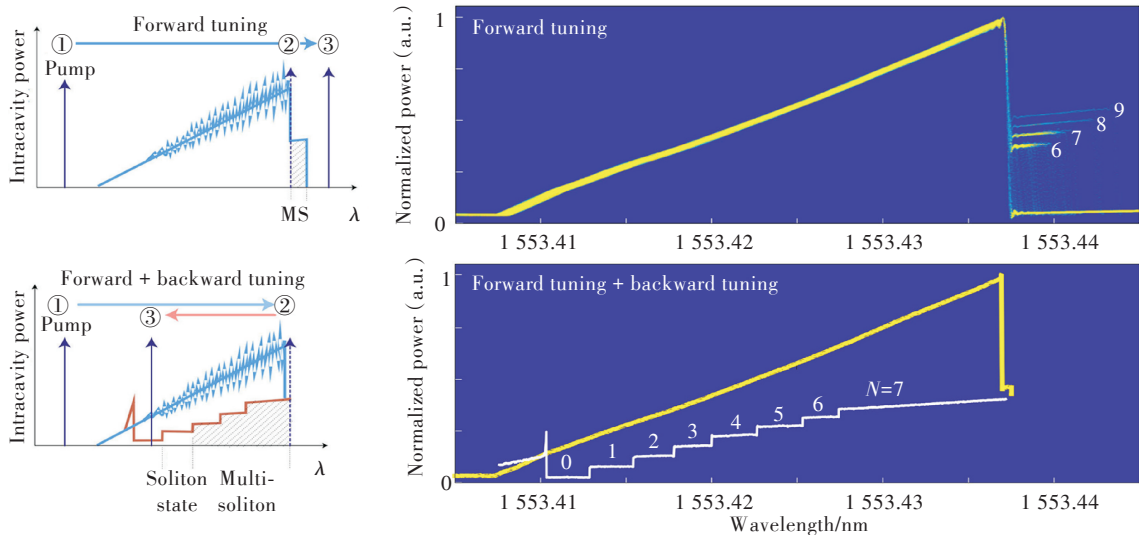


图 8 MgF₂ 微腔透射谱振荡、孤子台阶及 OFCs 演化过程^[11]

Figure 8 Transmission spectrum oscillations, soliton steps, and OFCs evolution of MgF₂ microcavity^[11]

于微腔的迟滞效应和快速克尔非线性,腔内谐振模式被移动并锁定到泵浦光上,而当泵浦光进一步正向扫频时,其进入有效的红失谐状态,在该状态下容易形成多孤子态,而不是直接产生具有平滑谱包络的单孤子。因为正向扫频过程中,孤子 OFCs 产生需经历调制不稳定态,导致产生的孤子数目随机不可控,大概率产生多孤子。反向扫频法也是调控孤子 OFCs 的有效方法^[47],如图 9 所示,可逐渐从多孤子切换到单个孤子。这种方法是建立在正向扫频法的基础上的,即先正向扫频至孤子被激发,此时微

腔中会有双谐振现象出现,即 s 谐振和 c 谐振,其中 s 谐振是与孤子有关的谐振,而 c 谐振是与泵浦激光相关的谐振,c 谐振的强度要明显高于 s 谐振,多孤子出现后,再将微腔谐振频率由红失谐向蓝失谐反向,在扫频过程中,c 谐振会向 s 谐振靠近,靠近至双谐振重合后立即分开,每重合一次,c 谐振的强度都会降低,并且孤子数减少一个,直至单孤子出现,这个方法为单孤子的激发提供了一个很大的指导。要注意反向扫频过程中必须是绝热的,以诱导孤子数的连续减少。



注:λ 为波长。

图 9 正向扫频法与反向扫频法微腔透射功率曲线^[47]

Figure 9 Power curves of microcavity during forward and backward tuning^[47]

正向扫频法和反向扫频法是基于微腔自身的克尔效应和热效应进行调谐从而产生孤子 OFCs 的方法。但是微腔的热效应在调谐过程中会影响 OFCs 的产生,因此克服微腔热效应也是很有必要

的,目前在 OFCs 调控研究中常用的克服热效应的方法是温控调谐^[48],即改变微腔实验环境的外部温度从而抵消微腔热效应的影响,进而控制孤子锁模频率,这种方法无需调整泵浦激光波长即可实现单

孤子 OFCs 或多孤子 OFCs 的锁模状态。双泵浦热辅助光方案^[49]是对腔模热效应进行补偿的理想方案,在泵浦光相反的方向打入一束辅助光,辅助光处于另一个腔模的蓝失谐位置,此时将泵浦光调至谐振,调谐过程腔模也会发生红移。辅助光附近模式红移使腔内功率降低从而抵消泵浦附近模式红移的升温。

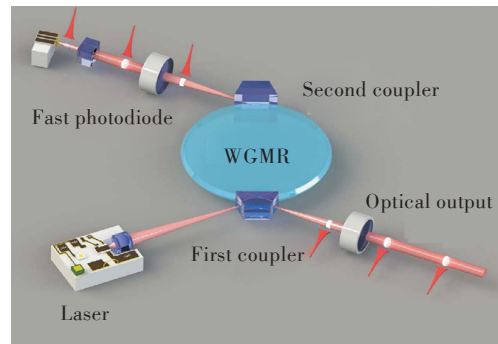
除了扫频法,自注入锁定法也可以直接产生孤子 OFCs,在自注入锁定方案中,激光器和微腔之间没有光隔离器,入射到微腔的光场会在微腔侧壁上经过瑞利散射形成背向传播的光场沿原路返回,经腔内光场反馈至激光器。当激光器在一定范围内初始失谐且满足相应的反馈相位条件时,系统会自动达到孤子态。孤子需在“红失谐”区域生成,但传统方案中调谐激光会导致 MgF_2 微腔冷却(腔内功率下降),引发热折射/热膨胀效应,导致谐振频率漂移、孤子丢失;而自注入锁定的反馈速度快于微腔热弛豫时间,可实时补偿热致频率漂移,抑制热不稳定性。2018年,俄罗斯量子中心莫斯科物理与技术研究所^[50]使用法布里-珀罗二极管自注入锁定到 MgF_2 微腔,实现了单频率、窄线宽输出,线宽压缩至自由运行状态的 $1/1\,000$ 以下,测得锁定后激光的洛伦兹线宽为 370 Hz 。提高功率后,法布里-珀罗激光二极管产生的激光有效地转换为强大的单频、超窄线宽相干孤子 OFCs 光源。自注入锁定法在无需额外稳频设备的情况下,稳定生成了重复频率为 12.5 GHz 的孤子 OFCs,重复频率信号线宽约为 1 kHz ,通过逆傅里叶变换测得孤子脉冲宽度为 220 fs 。

利用光学微腔的机械形变与弹光效应也可实现 OFCs 的调控,这种压电调控方式不仅可逆,易于调谐,而且可实现定向调制。日本庆应义塾大学通过将超高 Q 值 MgF_2 微腔附着压电陶瓷($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$, PZT)元件^[51],首次实现了压电驱动的微腔孤子 OFCs,实现了 OFCs 的直接启动、长期稳定及重复频率动态调制,获得了 15.24 GHz 重复频率的 OFCs,压电调谐效率达 27 MHz/V ,稳定带宽 1.5 kHz ,还实现了正弦/三角/方波等任意重复频率调制($2.5\sim 4.0\text{ kHz}$ 动态变化),为微腔 OFCs 的调控提供了高精度、快速响应、紧凑型和低成本的有效解决方案。

5 MgF_2 微腔 OFCs 应用进展

微腔 OFCs 作为新一代光梳源给一系列应用

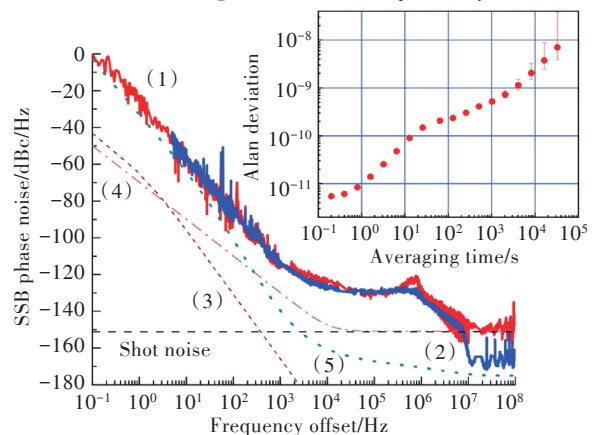
带来了新的方向, MgF_2 微腔 OFCs 最早提出的应用为微波光子方面应用。OFCs 合成微波的一个优势是易于合成高载波频率的微波信号,目前无线通信带宽瓶颈问题不断显现,而传统的电学手段很难合成高载波频率微波,微腔 OFCs 合成高频微波信号则提供了一种解决办法^[27]。由于 MgF_2 微腔具有超高品质因子 Q 值,其合成的微波信号具有噪声低的优势。2015年,OE Waves 公司 Liang 等人^[52]首次在 MgF_2 微腔上进行了微波光子实验,首先由连续光泵浦 MgF_2 微腔产生 OFCs,如图 10(a)所示,然后将该 OFCs 源输入光电探测器中进行拍频,可用于产生频谱纯净、低相位噪声的微波信号。拍频后得到了 9.9 GHz 超高纯度的射频信号,其单边带相位噪声谱如图 10(b)所示,达到了 $-22\text{ dBc/Hz}@1\text{ Hz}$ 、 $-125\text{ dBc/Hz}@10\text{ kHz}$ 和 $-130\text{ dBc/Hz}@1\text{ MHz}$ 。



注:WGMR为回音壁模式谐振腔。

(a)微波光子系统结构图

(a) Structure diagram of microwave photon system



注:SSB为单边带。

(b)相位噪声谱图

(b) Phase noise spectrum

图 10 MgF_2 微腔 OFCs 微波光子应用^[52]

Figure 10 MgF_2 microcavity OFCs for microwave photonic application^[52]

2020年,瑞士洛桑联邦理工学院 Lucas 等人^[53]

通过进一步优化 MgF_2 微腔和系统性能,使相位噪声达到了 $-110 \text{ dBc/Hz}@200 \text{ Hz}$ 、 $-135 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 和 $-150 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ MHz}$,其微波信号在低频难以达到量子极限,主要是由于谐振腔的热噪声,以及激光幅度噪声转化到射频信号的相位噪声;2022年,北京邮电大学戴键等人^[54]通过将激光注入 MgF_2 晶体微腔,形成稳定的孤子状态,得到了 15.38 GHz 的射频信号,这种自修复特性能有效抑制噪声干扰,生成低相噪的微波信号,可达

表 1 MgF_2 微腔 OFCs 微波信号源性能分析Table 1 Performance analysis of OFCs microwave signal source based on MgF_2 microcavity

	射频信号/GHz	低频	相位噪声/ dBc/Hz@10 kHz	相位噪声/ dBc/Hz@1MHz
OEwaves 公司,2015 ^[52]	9.90	$-22 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$	-125	-130
瑞士洛桑联邦理工学院,2020 ^[53]	14.90	$-110 \text{ dBc/Hz}@200 \text{ Hz}$	-135	-150
北京邮电大学,2022 ^[54]	15.38	/	-120	-132
日本庆应义塾大学,2025 ^[57]	15.24	/	-122	-134

随着微腔 OFCs 研究的不断发展,其应用领域也迅速拓展开来,从光学通信的核心需求出发,高速、大容量且稳定可靠的数据传输始终是追求的目标,微腔 OFCs 正是实现这一目标的理想工具。其卓越的频率特性使得 OFCs 能够在密集的光谱中精确地定位并控制各个频率成分,从而实现高效的数据编码和解码。这不仅能够显著提升通信系统的传输效率,还能够有效增强数据传输的稳定性,为高速光通信的建设提供强有力的技术支持。在高速数据传输方面, MgF_2 微腔 OFCs 的优异性能得以充分体现。通过精确控制 OFCs 的梳齿间距和线宽,可以实现高密度和低误码率的数据传输,在高速光通信中具有广泛的应用潜力。2015年,德国卡尔斯鲁厄理工学院 Pfeifle 等人^[58]通过理论与实验证明,在相同泵浦功率下,利用 MgF_2 微腔生成的图灵环模式 OFCs,对应光谱域“主梳”,相干性显著优于孤子模式和混沌模式,对泵浦激光频率抖动及放大自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 噪声的鲁棒性最强。并基于该模式下的 OFCs 实现了单梳线 144 Gbit/s 的高速数据传输(采用 16 正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM)),聚合速率达 432 Gbit/s ,且在 80 km 单模光纤传输中(正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 调制)仍保持误码率低于 10^{-7} ,为超高速光纤通信的紧凑型多波长相干光源提供了关键技术支撑。

立足当前数据时代对高速率通信的要求,微腔

$-120 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ kHz}$ 。由于孤子 OFCs 的低重频特性优势使得其很适合作为微波信号源,与传统电子振荡器相比,该技术具有更低的相位噪声和更高的频率稳定性,表现出小型化和低相噪的应用优势,而基于布里渊效应^[55]的孤子 OFCs 微波信号研究有望在孤子 OFCs 的基础上,进一步压缩线宽,达到更低的相位噪声^[56],有望成为未来集成化高性能微波信号源发展的重要技术支撑。表 1 所示为对 MgF_2 微腔 OFCs 微波信号源的性能分析。

孤子 OFCs 的重复频率与当前商用的波分复用系统或者密集波分复用系统具有很好的兼容性,因此可显著增大通信容量。2022年,日本庆应义塾大学 Fujii 等人^[59]在 MgF_2 微腔中通过失谐稳定技术去抵消微腔的热补偿得到了低噪且稳定的孤子 OFCs,此研究产生的 10 GHz 梳齿间隔孤子 OFCs 演示了极其密集的数据传输,通信速率达 1.45 Tbit/s ,这为微腔 OFCs 在通信领域的应用提供了方向。随着光通信技术的快速发展和应用领域的不断拓展,对 OFCs 技术的集成化和智能化也提出了更高的要求。还需要加强 OFCs 与其他光电子器件的集成技术研究,以实现更高效、更紧凑的光通信系统。

在精密计量方面,2023年,北京理工大学 Zhang 等人^[60]创新性地提出了一种基于 MgF_2 微腔孤子 OFCs 辅助微环腔的光子温度计方案,他们以 Si_3N_4 微环腔作为传感元件, MgF_2 微腔孤子 OFCs 作为宽带频率基准,通过测量微腔模式与微腔 OFCs 的拍频信号实现了 $58 \mu\text{K}$ 的超高分辨率;同时,创新性地提出基于反馈电压梯度的解模糊方法并结合锁频技术,在验证实验中实现了 45 K 的宽测量范围,解决了传统回音壁模式微腔追求高品质因子 Q 值时牺牲 FSR 与测量范围的矛盾,为芯片级精密计量相关传感应用提供了关键技术支撑。

MgF_2 微腔 OFCs 的理论与实验都逐渐走向成熟,并且如今在微波光子、光通信和精密计量系列领域中也得到了比较广泛的应用验证。我们将 MgF_2 微腔 OFCs 和其他形式 OFCs 的关键指标进行了

对比,如表2所示。综合来看,MgF₂材料微腔相比于其他材料微腔的品质因子Q值更高,光子在腔内传输的损耗极低,增加了光子的振荡时长,从而使

OFCs 激发阈值大大降低,提高了非线性产生效率。此外,MgF₂微腔透光窗口广,在中红外 OFCs,甚至于远红外 OFCs 有着重要的应用前景。

表2 不同类型微腔 OFCs 关键指标对比

Table 2 Comparison of key performance indicators for different types of microcavity OFCs

材料类型	结构	品质因子 Q	重复频率/GHz	光谱范围/nm	参考文献
MgF ₂	微棒	4.3×10 ⁸	35.2	1 520~1 590	[11]
MgF ₂	微盘	~10 ⁹	12.5	1 526~1 548	[50]
Si ₃ N ₄	微盘	~10 ⁸	~20.0	1 025~1 120 和 760~790	[61]
Si ₃ N ₄	微棒	3.7×10 ⁸	50.0	1 530~1 590	[62]
Si ₃ N ₄	微环	~5.0×10 ⁵	189.0	1 330~2 000	[13]
Si ₃ N ₄	微环	1.4×10 ⁶	1 000.0	1 420~1 700	[63]
AlN	微环	6.5×10 ⁷	> 500.0	1 400~1 700	[64]
LiNbO ₃	微环	> 1.1×10 ⁶	~200.0	1 830~2 130	[65]
Si	微环	2.0×10 ⁶	127.0	2 800~3 800	[66]

如今,尽管 MgF₂ 微腔 OFCs 的性能不断被优化,也取得了丰硕的应用成果,但其研究仍面临一些挑战,在实际应用中,MgF₂ 微腔 OFCs 的研究仍有许多问题有待解决。目前仍存在如下问题:

频谱宽度:目前 MgF₂ 微腔 OFCs 产生的孤子 OFCs 展宽范围不宽,只有 60 nm 左右^[11, 50],相比于其他微腔平台,尤其是 Si₃N₄ 微腔平台^[63]要窄不少,加州理工大学 Grudinin 等人^[67]通过设计精确的微结构来调控色散,虽然大幅扩大了 MgF₂ 微腔 OFCs 的频谱宽度,但仍未实现宽光谱的孤子 OFCs。

模式:模间串扰^[35]是 MgF₂ 微腔中普遍存在的现象,MgF₂ 晶体微腔通常在数个毫米量级,激发的谐振模式会很多,模式精细度不高,激发的 OFCs 易引起跳模,跳模可能破坏 OFCs 的稳定性。

转换效率:在微腔 OFCs 生成过程中,单孤子 OFCs 转换效率通常小于 1%,而多孤子 OFCs 转换效率通常小于 5%,存在转换效率不高的问题,这是目前包括 MgF₂ 微腔在内微腔 OFCs 的共有问题,如何提高 MgF₂ 微腔孤子 OFCs 的转换效率是如今需解决的共性问题。

此外,怎样使 MgF₂ 微腔在易于激发 OFCs 的条件下具有极高的稳定性、用更加简化的实验系统激发 OFCs、提升 MgF₂ 微腔 OFCs 的集成度以及 MgF₂ 微腔 OFCs 的锁定等问题也是目前需要探索和优化的问题。

6 结束语

综上所述,MgF₂ 微腔是一种具有独特优势的研究领域,其结合了 MgF₂ 材料特性和微腔光学原

理,为实现高性能和高集成度的 OFCs 系统提供了可能。MgF₂ 微腔 OFCs 优秀的时频性质和低噪声特性使得其在微波光子、光通信和精密计量学等领域具有潜在的应用前景。本文综述了 MgF₂ 微腔的制备工艺与封装技术,介绍了微腔 OFCs 的产生原理、激发阈值与演化过程,介绍了 MgF₂ 微腔 OFCs 的产生、调控方法及其在微波光子、光通信和精密计量的应用前景。

如今,微腔 OFCs 已在各种材料平台中得到验证与产生,但 MgF₂ 微腔 OFCs 具有天然负色散的特性,作为首次被证明可产生孤子 OFCs 的微腔平台,一直保持着多方面的优势。首先,MgF₂ 晶体材料缺陷少、纯度高,性能稳定,为 OFCs 仪器化提供了潜力;此外,MgF₂ 微腔 OFCs 在中红外 OFCs,甚至于远红外 OFCs 中有着重要的应用前景。随着相关技术的不断发展和完善,MgF₂ 微腔 OFCs 在频谱宽度、模式和转换效率等方面不断被优化,MgF₂ 微腔 OFCs 未来有望在微波光子、光通信和精密计量中发挥更加重要的作用,甚至于在更多新兴领域发挥价值。

参考文献:

- [1] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. 60 - Fsec Pulse Generation from a Self-Mode-Locked Ti: Sapphire Laser[J]. Optics Letters, 1991, 16(1): 42-44.
- [2] Diddams S A, Vahala K, Udem T. Optical Frequency Combs: Coherently Uniting the Electromagnetic Spectrum[J]. Science, 2020, 369(6501): eaay3676.
- [3] Diddams S A. The Evolving Optical Frequency Comb[J]. Journal of the Optical Society of America

- B, 2010, 27(11): B51.
- [4] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, et al. 77-fs Pulse Generation from a Stretched-Pulse Mode-Locked All-Fiber Ring Laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080–1082.
- [5] Wang W, Wang L, Zhang W. Advances in Soliton Microcomb Generation[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 1.
- [6] Shen B, Chang L, Liu J, et al. Integrated Turnkey Soliton Microcombs[J]. *Nature*, 2020, 582(7812): 365–369.
- [7] Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr Solitons in Optical Microresonators[J]. *Science*, 2018, 361(6402): eaan8083.
- [8] Cui W, Yi Z, Ma X, et al. High Energy Efficiency Soliton Microcomb Generation in High Coupling Strength, Large Mode Volume, and Ultra-High-Q Micro-Cavity[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(10): 101902.
- [9] Lu Z, Chen H J, Wang W, et al. Synthesized Soliton Crystals[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3179.
- [10] Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, et al. Tunable Optical Frequency Comb with a Crystalline Whispering Gallery Mode Resonator[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(9): 093902.
- [11] Herr T, Brasch V, Jost J D, et al. Temporal Solitons in Optical Microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(2): 145–152.
- [12] Lin G, Diallo S, Dudley J M, et al. Universal Nonlinear Scattering in Ultra-High Q Whispering Gallery-Mode Resonators[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14880–14894.
- [13] Brasch V, Geiselmann M, Herr T, et al. Photonic Chip based Optical Frequency Comb Using Soliton Induced Cherenkov Radiation [C]//CLEO. San Jose, California: OSA, 2015: STh4N.1.
- [14] Weng H, Liu J, Ali Afridi A, et al. Octave-Spanning Kerr Frequency Comb Generation with Stimulated Raman Scattering in an AlN Microresonator[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 540–543.
- [15] Chang L, Xie W, Shu H, et al. Ultra-Efficient Frequency Comb Generation in AlGaAs-on-Insulator Microresonators[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1331.
- [16] Feng H, Ge T, Guo X, et al. Integrated Lithium Niobate Microwave Photonic Processing Engine[J]. *Nature*, 2024, 627(8002): 80–87.
- [17] 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.
- [18] Kippenberg T J, Holzwarth R, Diddams S A. Microresonator-based Optical Frequency Combs[J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555–559.
- [19] Chembo Y K, Yu N. Modal Expansion Approach to Optical-Frequency-Comb Generation with Monolithic Whispering-Gallery-Mode Resonators [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033801.
- [20] Coen S, Randle H G, Sylvestre T, et al. Modeling of Octave-Spanning Kerr Frequency Combs Using a Generalized Mean-Field Lugiato-Lefever Model[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 37–39.
- [21] Godey C, Balakireva I V, Coillet A, et al. Stability Analysis of the Spatiotemporal Lugiato-Lefever Model for Kerr Optical Frequency Combs in the Anomalous and Normal Dispersion Regimes [J]. *Physical Review A*, 2014, 89(6): 063814.
- [22] Kippenberg T J, Spillane S M, Vahala K J. Kerr-Nonlinearity Optical Parametric Oscillation in an Ultrahigh-Q Toroid Microcavity [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(8): 083904.
- [23] Matsko A B, Liang W, Savchenkov A A, et al. Chaotic Dynamics of Frequency Combs Generated with Continuously Pumped Nonlinear Microresonators [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 525–527.
- [24] Grudinin I S, Matsko A B, Savchenkov A A, et al. Ultra High Q Crystalline Microcavities [J]. *Optics Communications*, 2006, 265(1): 33–38.
- [25] Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, et al. Optical Resonators with Ten Million Finesse[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6768–6773.
- [26] Alnis J, Schliesser A, Wang C Y, et al. Thermal-Noise-Limited Crystalline Whispering-Gallery-Mode Resonator for Laser Stabilization [J]. *Physical Review A*, 2011, 84(1): 011804.
- [27] Herr T, Hartinger K, Riemensberger J, et al. Universal Formation Dynamics and Noise of Kerr-Frequency Combs in Microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 480–487.
- [28] Fujii S, Hayama Y, Imamura K, et al. All-Precision-Machining Fabrication of Ultrahigh-Q Crystalline Optical Microresonators [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 694–701.
- [29] Nakagawa Y, Mizumoto Y, Kato T, et al. Dispersion Tailoring of a Crystalline Whispering Gallery Mode Microcavity for a Wide-Spanning Optical Kerr Frequency

- Comb[J]. Josa B, 2016, 33(9): 1913–1920.
- [30] Hayama Y, Fujii S, Tanabe T, et al. Theoretical Approach on the Critical Depth of Cut of Single Crystal MgF_2 and Application to a Microcavity [J]. Precision Engineering, 2022, 73: 234–243.
- [31] 王梦宇, 范乐康, 吴凌峰, 等. 基于超高Q值氟化镁晶体微腔的克尔光频梳产生研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210481.
Wang M Y, Fan L K, Wu L F, et al. Research on Kerr Optical Frequency Comb Generation based on MgF_2 Crystalline Microresonator with Ultra-High-Q Factor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210481.
- [32] Zhang X, Lin G, Sun T, et al. Dispersion Engineering and Measurement in Crystalline Microresonators Using a Fiber Ring Etalon[J]. Photonics Research, 2021, 9(11): 2222–2229.
- [33] 杨煜, 张磊, 王克逸. 基于氟化镁晶体微腔产生宽光谱范围克尔光频梳及色散调控研究[J]. 光学精密工程, 2022, 30(4): 403–410.
Yang Y, Zhang L, Wang K Y. Research on Generating Broad-Spectrum Kerr Optical Frequency Comb and Dispersion Control based on Magnesium Fluoride Crystal Micro-Resonator[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(4): 403–410.
- [34] 戴键, 侯迎港, 高司达, 等. 超高品质氟化镁晶体微腔的制备与测试[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1923004.
Dai J, Hou Y G, Gao S D, et al. Fabrication and Test of Ultra-High Q Magnesium Fluoride Microdisk Resonator [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(19): 1923004.
- [35] Liu T, Sun S, Gao Y, et al. Optical Microcombs in Whispering Gallery Mode Crystalline Resonators with Dispersive Intermode Interactions [J]. Photonics Research, 2022, 10(12): 2866–2875.
- [36] Ji J, Wang H, Ma J, et al. Narrow Linewidth Self-Injection Locked Fiber Laser based on a Crystalline Resonator in Add-Drop Configuration[J]. Optics Letters, 2022, 47(6): 1525–1528.
- [37] Qu Z, Liu X, Zhang C, et al. Fabrication of an Ultra-High Quality MgF_2 Micro-Resonator for a Single Soliton Comb Generation[J]. Optics Express, 2023, 31(2): 3005–3016.
- [38] 刘军汉, 曲天良, 张铨, 等. 超高Q值mm级晶体回音壁微腔加工[J]. 应用光学, 2023(4): 742–747.
Liu J H, Qu T L, Zhang X, et al. Fabrication of Ultra-High Q Factor and Millimeter-Scale Crystal Echo Wall Microcavity [J]. Journal of Applied Optics, 2023(4): 742–747.
- [39] Del'Haye P, Schliesser A, Arcizet O, et al. Optical Frequency Comb Generation from a Monolithic Microresonator[J]. Nature, 2007, 450(7173): 1214–1217.
- [40] Wang C Y, Herr T, Del'Haye P, et al. Mid-Infrared Optical Frequency Combs at 2.5 μm based on Crystalline Microresonators [J]. Nature Communications, 2013, 4: 1345.
- [41] Savchenkov A A, Ilchenko V S, Di Teodoro F, et al. Generation of Kerr Combs Centered at 4.5 μm in Crystalline Microresonators Pumped with Quantum-Cascade Lasers[J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3468–3471.
- [42] Wu W, Sun Q, Wang Y, et al. Mid-Infrared Broadband Optical Frequency Comb Generated in MgF_2 Resonators[J]. Photonics Research, 2022, 10(8): 1931–1936.
- [43] Lucas E, Karpov M, Guo H, et al. Breathing Dissipative Solitons in Optical Microresonators [J]. Nature Communications, 2017, 8: 736.
- [44] Weng W, Bouchand R, Lucas E, et al. Polychromatic Cherenkov Radiation Induced Group Velocity Symmetry Breaking in Counterpropagating Dissipative Kerr Solitons[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(25): 253902.
- [45] Taheri H, Matsko A B, Maleki L, et al. All-Optical Dissipative Discrete Time Crystals[J]. Nature Communications, 2022, 13: 848.
- [46] Liu G, Ilchenko V S, Su T, et al. Low-Loss Prism-Waveguide Optical Coupling for Ultrahigh-Q Low-Index Monolithic Resonators[J]. Optica, 2018, 5(2): 219–226.
- [47] Guo H, Karpov M, Lucas E, et al. Universal Dynamics and Deterministic Switching of Dissipative Kerr Solitons in Optical Microresonators [C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC). Munich, Germany: IEEE, 2017: 8087531.
- [48] Joshi C, Jang J K, Luke K, et al. Thermally Controlled Comb Generation and Soliton Modelocking in Microresonators [J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2565–2568.
- [49] Ng V, Qureshi P C, Azeem F, et al. Magnesium Fluoride Photonic-Belt Resonators for Generating Broadband Frequency Combs [C]//2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC). Munich, Germany: IEEE, 2023: 10232164.

- [50] Pavlov N G, Koptyaev S, Lihachev G V, et al. Narrow - Linewidth Lasing and Soliton Kerr Microcombs with Ordinary Laser Diodes [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 694–698.
- [51] Fujii S, Wada K, Kogure S, et al. Mechanically Actuated Kerr Soliton Microcombs [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(9): 2301329.
- [52] Liang W, Eliyahu D, Ilchenko V S, et al. High Spectral Purity Kerr Frequency Comb Radio Frequency Photonic Oscillator [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7957.
- [53] Lucas E, Brochard P, Bouchand R, et al. Ultralow - Noise Photonic Microwave Synthesis Using a Soliton Microcomb-based Transfer Oscillator [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 374.
- [54] 戴键, 李鑫敏, 刘安妮, 等. 基于氟化镁微腔孤子光频梳的低相噪微波信号产生 [J]. *光学学报*, 2022, 42(20): 2007001.
- Dai J, Li X M, Liu A N, et al. Low Phase Noise Microwave Signal Generation based on Soliton Frequency Comb in MgF_2 Microresonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(20): 2007001.
- [55] Lei J, Wang M, Kuang Q, et al. Brillouin Microcomb Multiplexing in Magnesium Fluoride Microbottle Resonators [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 188: 112922.
- [56] Bai Y, Zhang M, Shi Q, et al. Brillouin - Kerr Soliton Frequency Combs in an Optical Microresonator [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(6): 063901.
- [57] Murakami T, Wada K, Kogure S, et al. Architecture for Coherent Dual - Comb Spectroscopy and Low - Noise Photonic Microwave Generation Using Mechanically Actuated Soliton Microcombs [J]. *Optics Letters*, 2025, 50(4): 1417–1420.
- [58] Pfeifle J, Coillet A, Henriot R, et al. Optimally Coherent Kerr Combs Generated with Crystalline Whispering Gallery Mode Resonators for Ultrahigh Capacity Fiber Communications [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(9): 093902.
- [59] Fujii S, Tanaka S, Ohtsuka T, et al. Dissipative Kerr Soliton Microcombs for FEC-Free Optical Communications over 100 Channels [J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 1351–1364.
- [60] Zhang C, Wang J, Kang G, et al. Soliton Microcomb-Assisted Microring Photonic Thermometer with Ultra-High Resolution and Broad Range [J]. *Photonics Research*, 2023, 11(10): A44–A53.
- [61] Lee S H, Oh D Y, Yang Q F, et al. Towards Visible Soliton Microcomb Generation [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 1295.
- [62] Zhang S, Silver J M, Del Bino L, et al. Sub-Milliwatt-Level Microresonator Solitons with Extended Access Range Using an Auxiliary Laser [J]. *Optica*, 2019, 6(2): 206–212.
- [63] Bao C, Xuan Y, Jaramillo - Villegas J A, et al. Direct Soliton Generation in Microresonators [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2519–2522.
- [64] Gong Z, Bruch A, Shen M, et al. High-Fidelity Cavity Soliton Generation in Crystalline AlN Micro - Ring Resonators [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4366–4369.
- [65] Gong Z, Liu X, Xu Y, et al. Soliton Microcomb Generation at 2 μm in Z - Cut Lithium Niobate Microring Resonators [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(12): 3182–3185.
- [66] Yu M, Jang J K, Okawachi Y, et al. Breather Soliton Dynamics in Microresonators [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14569.
- [67] Grudinin I S, Yu N. Dispersion Engineering of Crystalline Resonators via Microstructuring [J]. *Optica*, 2015, 2(3): 221–224.