

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.02.02

微腔光频梳的应用研究进展

冯梁森¹, 李维^{1*}, 陈少武^{2,3*}, 武腾飞¹, 李新良¹

(1. 航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095;

2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 3. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100083)

摘 要: 微腔光频梳作为一种频率的测量工具, 具有高准确度、可集成化的优势, 将在深空探测、精密计量等领域发挥巨大作用。本文系统全面地介绍了微腔光频梳在非线性激发产生和器件研制方面的技术现状, 阐述了微腔光频梳在光钟、测距成像、光谱分析、频率合成器、低信噪微波源和相干通信等方面的研究进展, 对光频梳未来的技术研究热点和应用前景进行了预测, 为微腔光频梳在计量、测试、通信等领域的应用发展起到推动作用。

关键词: 微腔光频梳; 品质因子; 孤子态; 自注入锁定; 小型化光钟; 测距; 频率合成器; 微波源; 相干通信
中图分类号: TB96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)02-0013-11

Progress in application research of microresonator frequency comb

FENG Liangsen¹, LI Wei^{1*}, CHEN Shaowu^{2,3*}, WU Tengfei¹, LI Xinliang¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China; 2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. College of Material Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Microresonator frequency comb (MFC) is a tool for frequency measurement with high precision and integration potential. It will play a great role in deep space exploration and precise metrology. In this paper, the nonlinear optical generation and the device development of MFC are introduced. Especially, the status of application development of MFC including optical clock, range measurement, spectroscopy, optical-frequency synthesizer, low noise photonic microwave synthesis and coherent communication are elaborated. The future research hotspots and application prospects of optical frequency comb are predicted, which may promote the application development of optical frequency comb in metrology, measurement and communications.

Key words: microresonator frequency comb; quality factor; soliton; self-injection locking; optical clock; range measurement; optical-frequency synthesizer; photonic microwave synthesis; coherent communication

0 引言

光频梳在时域上是超短飞秒光脉冲, 在频域上是等间隔分布的光学频率组成的梳状光谱, 且各频率分量具有稳定的相位关系。它的光谱覆盖范围极广, 可达百太赫兹带宽^[1], 且单个梳齿线

宽极窄(千赫兹量级), 兼具 Hz 量级的频率稳定性和飞秒量级的时间分辨率, 可为微波频标、光学频标等多种频率标准提供载体, 也为长度、时间频率等参数提供了理想的测量工具。

由于受限于半导体微纳器件加工技术和材料生长技术, 最初的光频梳的产生大多是基于钛宝

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(62175229)

引用格式: 冯梁森, 李维, 陈少武, 等. 微腔光频梳的应用研究进展 [J]. 计测技术, 2022, 42 (2): 13-23.

Citation: FENG L S, LI W, CHEN S W, et al. Progress in application research of microresonator frequency comb [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (2): 13-23.



石或掺杂稀土元素晶体的全固态飞秒激光器光梳,或是基于非保偏光纤构建的光纤光梳,这些光梳需要频繁维护,体积较大,且产生的光频梳存在光谱范围窄、重复频率低等局限性问题。随着微腔制造工艺的进步,品质因子(Quality Factor, Q)较高的微盘、微环或微球等微腔结构被制作出来,为光频梳实现芯片化提供了可能。以微环谐振腔结构为例,该结构以硅片为衬底、氮化硅为波导层、二氧化硅为上下包层,利用全反射原理将光限制在波导层传播。微环结构包括一个环形波导以及一条或两条条形波导,波导截面尺寸一般为微米量级。激光进入波导并耦合进谐振腔中,在谐振腔结构中往返传输,并具有极小的模式体积,使器件具备较强的光局域能力和高增益,腔内较强的光场导致材料的三阶非线性效应——克尔效应增强并产生参量振荡,结合一定的控制手段,可获得微腔克尔光频梳。2003年,加州理工学院(Caltech)的Vahala课题组^[2]在硅衬底上制作出 Q 值大于 10^8 的二氧化硅微盘腔,于2004年观察到微腔内的光参量振荡现象^[3]。2007年,瑞士洛桑理工学院(EPFL)的Kippenberg课题组^[4]利用连续光泵浦方式,在二氧化硅微盘腔中首次实现多种形态的克尔光频梳。此后,科研人员先后制备出多种材料微腔并实现了克尔光频梳,使该技术得到飞速发展。

微腔光频梳与其他光频梳相比,具有重复频率高、光谱覆盖范围广的特点,可应用于对超快测量、宽光谱测量以及高精度测量有需求的场景,包括高精度时频计量、高分辨光谱分析、分子指纹探测、双光梳高精度快速测距、多波长并行超高带宽光通信、天文光谱校准和类地行星探测等^[5]。微腔光频梳还具有体积小、可芯片集成的优点,能够为光钟、雷达等系统的小型化提供重要技术支撑。

本文重点聚焦于微腔光频梳的应用研究进展,首先阐述微腔光频梳的国内外技术研究现状,然后从技术发展的角度详细介绍微腔光频梳的应用发展趋势,最后对其前景进行展望。

1 微腔光频梳技术研究现状

1.1 微腔光频梳产生

微腔光频梳的产生依赖于微腔介质的三阶非线性效应——克尔效应。三阶非线性效应主要包

含三个非线性光学过程,其中自相位调制(Self-phase Modulation, SPM)和交叉相位调制(Cross-phase Modulation, XPM)共同作用来平衡介质中的材料色散,四波混频(Four-wave Mixing, FWM)用来产生新的频率分量^[6],当腔内达到色散与克尔效应以及增益与损耗的双重平衡后,即可输出孤子形态的微腔光频梳^[7]。微腔光频梳的单孤子态是应用中最重要的一种状态,具有低噪声、相位稳定的特点,其调制过程具有一定的难度。孤子态光频梳的调制先后经历了快速调谐法^[8-10]、热调谐法^[11-12]和辅助激光法^[13-14]等,借助窄线宽可调谐激光器、电光调制器等外部设备使腔内的热效应达到被动抑制的效果,从而进入孤子态。然而这些方法本质上背离了微腔光频梳可芯片化集成的初衷,一方面调制微腔需要庞大的光学系统,另一方面针对这套系统的稳频锁频系统的小型化仍是亟待解决的问题。

研究人员在对分立光学元器件如何进行芯片化集成的思考过程中发现,利用自注入锁定的方案可以很好地实现光频梳的主动孤子输出。2019年,EPFL的Raja等人^[15]通过研究激光器与微腔的自注入锁定现象,发现由于微腔内背向散射引起的谐振模式分裂反馈到激光器可以引起激光自注入锁定现象。通过调控激光二极管驱动电流,可以在微腔内自发产生耗散克尔光孤子,整个模块电功耗小于1 W,体积小于1 cm³。2020年,在由Caltech、加州大学圣芭芭拉分校(UCSB)以及EPFL三方研究团队^[16]的共同努力下,成功实现微腔孤子光梳“启钥”运行,只需打开激光器的开关,就能自动寻找锁模状态并保持稳定运行。电驱动的集成微腔光频梳芯片结构如图1所示,其核心器件为一个商用的分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器芯片与一个高 Q 氮化硅微腔芯片,对接耦合后与制冷器一起封装,能够维持几个月的可靠运行。“启钥”运行实现的关键在于微腔必须具有超高的品质因子,该报道中所用到的氮化硅微腔 Q 值达到 1.6×10^7 ,是当时报道的最高水平。

2021年,Kippenberg课题组^[17]首次发表自注入锁定完整的理论模型,如图2所示,揭示了基于半导体激光器自注入锁定实现芯片化光梳的原理,即利用在微谐振腔内的体积和表面的背向瑞利散

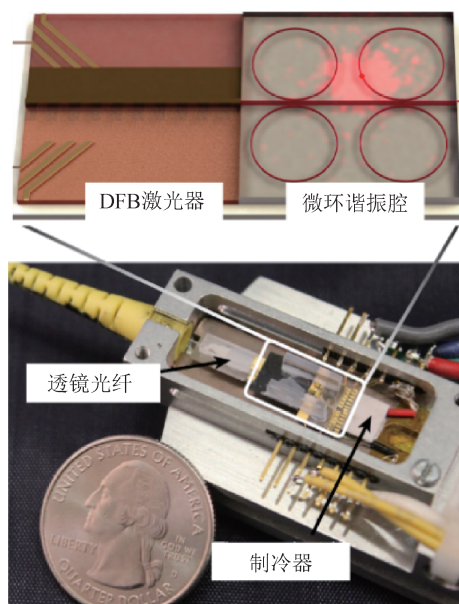


图1 电驱动集成微腔光频梳芯片结构图

Fig.1 Electrically pumped integrated soliton microcomb chip

射形成激光二极管的外腔光反馈，并将激光二极管的激光频率自注入锁定到微腔谐振频率上。这种机制为激光器提供了微腔谐振频率上的选择性光反馈，激光线宽被急速压窄的同时对微腔的热效应进行自补偿，从而实现孤子态光频梳。

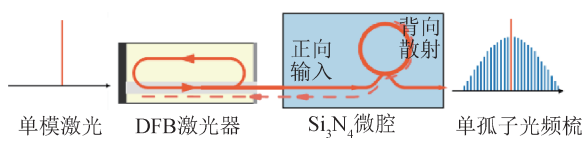


图2 自注入锁定原理图

Fig.2 Schematic representation of laser injection-locked soliton

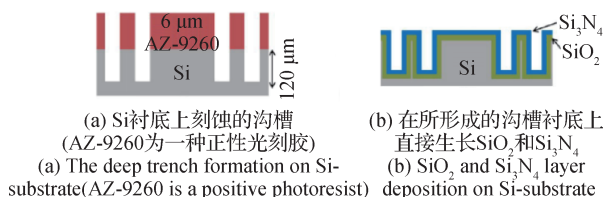
1.2 微腔光频梳器件制备

所有材料都具有三阶非线性效应^[18]。选择三阶非线性系数大、光局域能力强和增益高的材料体系，是产生光频梳的关键。目前实现光频梳的材料体系有 SiO_2 ^[9-10]， MgF_2 ^[8]， Si_3N_4 ^[19-21]， AlN ^[22-26]， LiNbO_3 ^[27-28]和 AlGaAs ^[29-30]材料的微盘、微环或微球等微腔结构。其中 Si_3N_4 微腔最具光电子集成的潜力，有广阔的应用前景和价值。

氮化硅是集成电路和微机电系统（Microelectro Mechanical Systems, MEMS）中常用的绝缘介质。用于光频梳的氮化硅波导需满足一定的厚度和严格的化学计量比，以符合光频梳输出所需的波导条件。一般采用低压力化学气相沉积仪（Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD）薄膜生长

工艺制备 Si_3N_4 薄膜。研究人员采用热循环法^[31]、位错阻挡法^[32-33]和晶向扭曲法^[34]来获得质量较好的 Si_3N_4 薄膜，并结合优化的制备工艺获得高 Q 的微腔器件。早在2009年，康奈尔大学的Lipson课题组^[35]，采用热循环法实现了744 nm厚的 Si_3N_4 制备，先在高温条件下生长一层400 nm Si_3N_4 ，然后把温度降到室温，再继续生长 Si_3N_4 到所需厚度，测试结果为波导损耗0.12 dB/cm， Q 值为 3×10^6 。他们还在制备工艺的细节上进行处理，在电子束刻蚀过程中，曝光完成后进行5 min的145 °C抗蚀剂回流，以此来减少侧壁损耗；刻蚀时将背面的氮化硅刻掉，防止因应力过大导致出现碎片。

2016年，普渡大学的课题组^[36]提出采用环形沟槽（trench）结构可以防止膜破裂。硅衬底上刻蚀出宽10 μm 、深120 μm 的沟槽，如图3所示，再进行 SiO_2 、 Si_3N_4 等的沉积，电子束曝光采用HSQ（一种负性光刻胶），HSQ与氮化硅刻蚀选择比为3:1。显影和刻蚀后的侧壁非常陡直。研究表明，高温退火3 h，可去除残留在 Si_3N_4 中的N-H键，品质因子提高一个数量级，但是更高温度不会带来 Q 值的提升。



(c) 刻蚀形成的 Si_3N_4 波导的陡直的侧壁
(c) Cross-sectional views of Si_3N_4 waveguide with almost vertical sidewalls

图3 普渡大学的微腔制备工艺

Fig.3 Fabrication process of microresonator in Purdue University

以上方法对 Q 值的提升空间有限，2016年，Kippenberg课题组^[37]采用大马士革工艺^[37-39]，将 Q 值提升了一个数量级。利用 α -Si作为硬掩模先将图形转移到 SiO_2 上，去掉硬掩模，然后一次生长 Si_3N_4 到所需的厚度，采用化学机械抛光（Chemical Mechanic Planarization, CMP）将多余的 Si_3N_4 磨掉，露出波导层的上表面，工艺制备流程如图4所

示。测试结果表明：当 Si_3N_4 厚度不超过刻蚀深度100 nm时，能够得到无裂纹的上表面。在1550 nm处，吸收损耗0.01 dB/cm， Q 值为 2×10^7 。

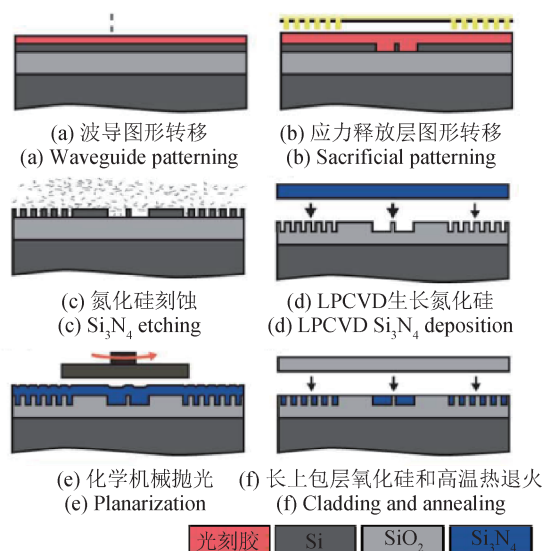


图4 大马士革工艺制备微腔工艺流程图

Fig.4 Photonic Damascene process for Si_3N_4 microresonator

1.3 微腔光频梳技术发展趋势

1.3.1 新型材料体系

探究新型材料体系光频梳的意义在于：一方面可以获得多种光频梳平台，拓展光频梳的光谱覆盖范围和应用领域；另一方面可以为激光器与微腔光电集成提供更多可能性。

目前已经实现光频梳的材料体系包括 SiO_2 、 MgF_2 、 Si_3N_4 、 AlN 和 LiNbO_3 等，此外 AlGaAs 也被报道具备实现孤子态光频梳的潜力。 AlGaAs 相比其他材料具有更高的三阶非线性系数，且对三元化合物的带宽调制可避免通信波段的双光子吸收。2020年NIST研究人员^[30]利用 Q 大于 10^6 的 AlGaAs 微腔，在超低温的实验环境中（绝对温度小于20 K），采用正向扫频法成功实现相位稳定的孤子态光频梳。2021年上海微系统与信息研究所^[40]在 Q 值 7.1×10^6 的 SiC 平台上观察到光谱范围1300~1700 nm的宽带克尔频率梳。除此之外，新的材料平台还包括 Ge 、 SiGe 、 GaP 、 GaN 、 Diamond 、 $\alpha\text{-Si-H}$ 、 SiO_xN_y 、 SiO_xC_y 和 As_2S_3 、 As_2Se_3 等新型硫化物材料，以及 WS_2 和 MoS_2 等新型二维材料。可通过色散波（切伦科夫辐射）、二次/三次谐波产生技术对光频梳进行扩谱，实现可见光和中、远红外波段的光频梳拓展。相信随着新型材料的不断成

熟，相应体系的微腔光频梳的应用也会被报道。

1.3.2 倍频程微腔光频梳

研究倍频程光频梳的意义一方面在于可以获得更宽范围的梳齿光谱，以获得在光谱学、精密频率计量学等领域中更为广泛的应用，另一方面可利用 $f-2f$ 自参考技术实现偏置频率的锁定。

倍频程的实现主要通过色散调控技术，通过改变波导结构满足反常色散关系，获得不同光谱范围的输出。2011年，Lipson课题组^[41]通过色散调控技术在氮化硅平台上实现倍频程的光频梳，光谱范围为1170~2350 nm，重复频率为226 GHz。2017年，kippenberg课题组^[42]也利用色散调控技术将重复频率为1 THz的光频梳实现倍频程，光谱范围为860~2000 nm。2021年NIST研究人员^[43]利用 InP DFB激光器和 Si_3N_4 微腔的集成实现了倍频程的孤子光频梳（DFB激光器与 Si_3N_4 微腔结构示意图如图5右上所示），光谱范围为1090~2400 nm，光谱图如图5所示，重复频率为1 THz，实现倍频程的同时，也实现了混合集成的自注入锁定孤子光频梳。

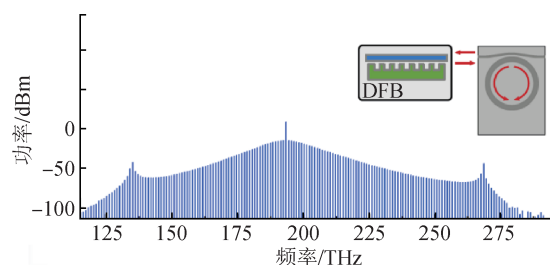


图5 DFB激光器与微腔自注入锁定实现倍频程光频梳

Fig.5 Octave-spanning soliton generation via self-injection locking of a DFB laser

目前能够实现倍频程光谱范围的只有太赫兹重复频率的光梳。然而，太赫兹超出了现有电子探测器的带宽要求，无法通过现有的测试设备进行直接测试。而重复频率在吉赫兹的光谱范围无法实现倍频程。缺乏自参考，光学标准的稳定性就无法转移到微波频段。针对这一问题，NIST研究人员提出采用双微环互锁机制^[44]，如图6所示，利用 Si_3N_4 微环产生了1 THz重复频率、倍频程的耗散克尔光频梳，用来实现 f_{ceo} 的锁定。通过锁定后的22 GHz重复频率的 SiO_2 微盘光频梳对 Si_3N_4 微环的重复频率进行测量，将22 GHz的稳定性传递给1 THz的光梳，实现光频梳重频和偏频的锁定。基

于微腔光梳的光钟架构利用此种方法,并将光频锁定到铷原子气室,最终实现微型光学原子钟。

1.3.3 微腔光频梳转换效率的提升

目前低相噪的微腔孤子态光频梳的泵浦能量转换效率(Pump-to-comb Conversion Efficiency)比较低(3%左右)。更高的转换效率可以降低驱动电源功率,以实现仅用AAA电池或小型化钮扣电池驱动的微腔光频梳模块,同时可获得单根梳齿光功率毫瓦级的高功率光频梳,对于提高光频梳痕量气体测量信噪比、提升激光雷达探测距离和生成高功率微波信号都大有裨益。研究人员^[45]通过采用正常色散波导微腔产生一种特殊的平顶光谱(Platicon)“暗孤子脉冲”光梳,可以将泵浦能量转换效率提高至30%左右。另外通过设计双微环耦合腔结构,理论上可以将泵浦能量转换效率提高至接近100%。

1.3.4 微腔光频梳重频的低相噪化

目前采用微腔光频梳梳齿拍频能够产生较高质量的低相噪微波信号,但是由于微腔本身的热噪声(包括热光噪声、热弹噪声、布朗热运动噪声、热折射率噪声、有质动力噪声等)和外部环境扰动的耦合引起的微腔光学模式和机械振动模式间光力耦合噪声等因素,拍频产生的微波信号在低频段相噪仍比较高。未来需要解决微腔光频梳重频低频段相噪较高的问题,实现全频段低噪声高质量微波信号输出。

1.3.5 微腔光频梳芯片的无热化

目前制备微腔光频梳芯片的材料(Si_3N_4 , SiO_2 , AlN , AlGaAs 等)都具有一定的正热光系数,会导致微腔孤子光频梳调制过程中出现热失稳。传统的反馈环路主动控温方式存在系统复杂、体积大、成本高、能耗高等弊端。未来可采用 LiNbO_3 , TiO_2 或者聚合物等具有负热光系数的材料构成微腔波导、波导覆盖层或狭缝复合波导填充物等结构,有效地补偿微腔谐振峰在大功率光泵浦下的热漂移,实现高温度稳定性的“无热化”微腔,为研制低成本、集成化的被动式热稳定微腔芯片提供可能。

2 微腔光频梳的应用进展

2.1 光钟

目前世界上最精准的时钟准确度可达 10^{-18} ,为探索基础物理和实现新的测量提供了可能性。然

而,庞大的体积和功耗阻止了它在便携式可移动设备中精确授时的应用。因此未来原子钟技术的发展方向主要为高精度和小型化。

输出频率的相对不确定度(fractional uncertainty)可表示为 $\Delta\vartheta/\vartheta$,其中 $\Delta\vartheta$ 为能级跃迁的线宽, ϑ 为能级跃迁频率。可以通过提高 ϑ 来改善相对不确定度。微波原子钟的原子参考跃迁处于微波波段 $10^9\sim 10^{10}$ Hz,而光波段 $10^{14}\sim 10^{15}$ Hz比微波波段高4~5个数量级,采用原子的光学跃迁作参考,可获得精度更高的原子钟。然而在光频测量方面,一般的电子设备只能测量微波频率信号,需要把光频率转化成微波频率才能进行测量。而微腔光频梳的出现可以在芯片尺度上解决光学频率和微波频率的链接问题,实现光学原子钟(即光钟)的小型化。NIST一直在小型化光钟研究领域处于领先地位。

2014年,NIST首次报道了基于微腔光频梳的光钟原理样机^[46],成功将光学频率转换到微波信号上,并保证了相位相干性。其输出频率准确度达到 10^{-9} 水平,性能主要受限于参考谱线的稳定度。该光钟原理样机系统如图6所示,其中Rb D2用于1560 nm激光器的锁定,Rb D1用于1590 nm激光器的锁定。

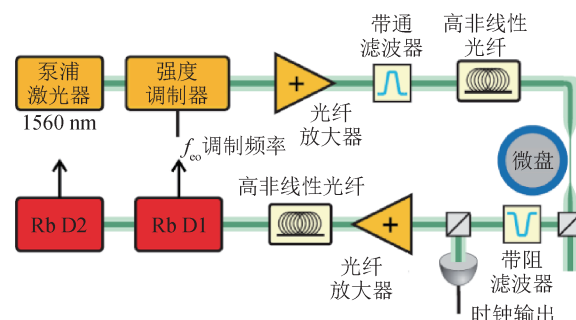


图6 NIST首次提出的基于微腔光频梳的光钟原理样机系统图

Fig.6 Optical clock based on MFC proposed by NIST

2019年,该课题组进一步提高了该系统的性能和集成度^[44],通过半径为23 μm 的氮化硅微环腔产生重复频率1 THz的倍频程光谱,实现微腔片上自参考,秒稳定性达到 10^{-12} ,成功实现小型化光钟系统,如图7所示。

2020年,NIST的研究人员实现了氧化硅微腔光梳到原子气室的直接锁定^[47]。通过将氧化硅微腔光梳中1529 nm的梳齿与 ^{85}Rb 的 $4^2\text{D}_{5/2}$ 到 $5^2\text{P}_{3/2}$ 跃

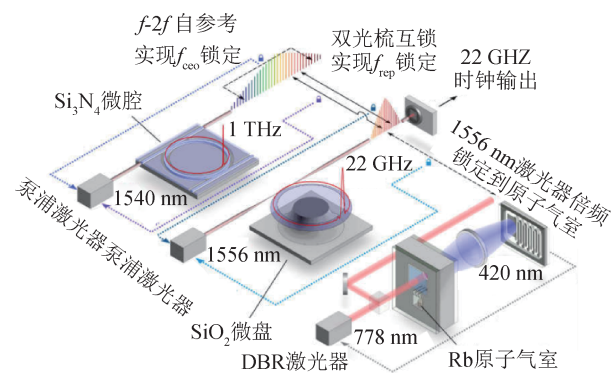


图7 NIST提出的小型化光钟系统

Fig.7 Micro optical clock proposed by NIST

迁能级所对应的发射波长锁定，从而实现整个微腔光梳频率的锁定，在几秒内，绝对频率的波动在千赫兹量级，一天内的频率波动小于1 MHz。此项技术为后期实现全芯片级的光钟研制奠定了基础。

小型化光钟发展过程中还有很多技术问题亟待解决，比如：如何保证光钟的稳定度、可靠性。另外，关键核心器件的研制和光电集成等仍需要深入研究^[48]。

2.2 测距和成像

在激光测距领域中，便携式激光测距仪、小型化激光雷达、微型无人机等对测量速度、精度以及测距系统尺寸都有非常严格的要求。微腔光频梳具有光谱范围宽、脉宽窄、重复频率稳定性高等优势，为绝对距离测量提供了新的技术手段。目前报道的基于光频梳的测距方法主要有飞行时间法、合成波干涉法、光谱干涉法等。目前NIST、哈佛大学、EPFL等研究团队都致力于开发基于微腔光梳实现的双光梳快速测距系统，国内天津大学、西安光机所、航空工业计量所等机构也在进行这方面的探索。

2018年2月，Vahala课题组^[49]首次报道了基于微腔光梳的激光雷达测距系统，利用时间飞行法进行距离测量，测距误差不高于200 nm。同年，EPFL研究团队^[50]利用微腔光频梳实现了100 MHz的采样速率（即每秒1亿次），这是迄今为止所记录的最快距离测量。在13 μs时间内，阿伦方差为12 nm。应用该激光雷达系统，该研究团队还对以150 m/s速度飞行的子弹进行了探测，成功实现了对子弹的表面结构的实时采样，横向分辨力可达2 μm。该项报道代表了未来小型化、超快速、高精度的激光雷达系统的发展方向。

2020年，Kippenberg课题组进一步探究了芯片化光频梳在相干测距领域的应用前景^[51]。基于调频连续波（Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW）的激光雷达测距可用于自动驾驶中远程三维距离测量和速度测量。将单个FMCW激光器与Si₃N₄微腔耦合，泵浦激光器的调频信号将完整地转移到产生的光频梳梳齿上，利用光学衍射技术将其分开，可创建30个独立的调频连续激光雷达通道。每个通道均能够同时测量目标的距离和速度，且不受通道串扰的影响，从而实现了大规模并行相干激光雷达测距方案。研究人员演示了每秒3 M像素采样速率的平行距离和速度测量，并提出未来相干FMCW雷达采集率可提高10倍。

2020年，天津大学和西安光机所采用基于色散干涉法（Dispersive Interferometry, DPI）的微腔光频梳测距系统^[52]（如图8所示），在户外实现了测距量程1179 m、无测距死区、35 kHz采样速率、0.2 ms艾伦方差测试为5.6 μm的高精度、长距离、超快测试系统。

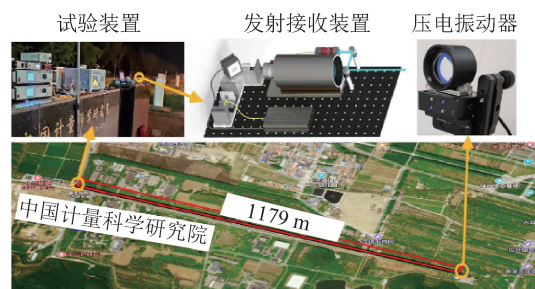


图8 基于DPI原理的激光测距户外装置

Fig.8 Experimental setup of long-distance ranging in an outdoor environment based on DPI

2.3 光谱分析

双光梳光谱可以在近红外附近的宽光学带宽上提供高信噪比，已应用于超宽带近红外光谱、亚波长空间分辨力的近场显微镜、分子线中心的精密计量、光谱激光雷达以及温室气体监测等领域，实现高分辨力、高灵敏度、高带宽、高测量速率的精密光谱测量^[53-55]。

2018年，Lipson课题组利用微腔组成的双光梳系统，对CH₂Cl₂气体进行光谱测量^[54]，如图9所示，光谱吸收展宽达到170 nm，测试时间仅为20 μs。研究人员指出，进一步提高光梳重复频率可以实现纳秒级别的光谱测试速度。

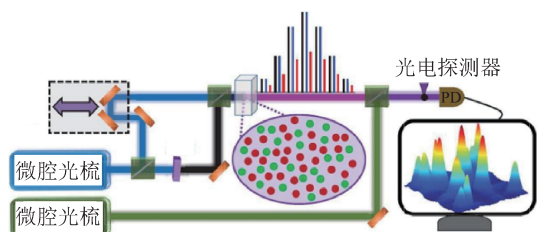


图9 双光梳测光谱的实验装置示意图

Fig.9 Schematic diagram of spectroscopy with dual-comb

2.4 频率合成器

微波频段的频率合成器是一种精密可调、频率稳定度与标准源相当的微波信号源^[56]。随着计量学、光谱学和光通信等相关学科及应用技术的发展,对相干光源的需求日益增加。并且,光学频率标准的精度要远优于微波频率,因此要想获得精度更高的微波信号源,需要对光学信号进行高精度的频率合成。光学频率合成过程一般包括参考光频、频率转换和输出光频。用于频率转换的光学分频器,是确定光频信号之间的频率比值并对其进行精密分频的核心,然而到目前为止,最终输出光和参考光的频率比值也无法精确确定^[57]。微腔光频梳可以提供10 GHz~1 THz超高重复率的光频梳,在毫米波和太赫兹波领域光分频技术中具有重大潜力。

早在2014年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)就启动了“直接片上数字光合成器”(DODOS)项目,旨在获得强大的光学频率控制能力,并在2018年取得重大进展。由NIST带领的研究团队实现了微型化的光学频率合成器^[58]。该系统由可调谐激光器芯片、微腔双光频梳的集成芯片、泵浦激光器芯片和光放大芯片组成。将一个快速可调谐、窄线宽的硅基Ⅲ-V族二极管激光器锁定至稳定的光频梳上作为频率合成器的输出。光频梳由1.014 THz的 Si_3N_4 光频梳和22 GHz的 SiO_2

光频梳组成,通过对重复频率($f_{\text{rep, THz}}$ 和 $f_{\text{rep, GHz}}$)和偏置频率($f_{\text{ceo, THz}}$)进行相位稳定,建立从10 MHz微波到光频的精确倍增因子19403904。通过编程和动态步进输出频率,可实现32 nm的调谐范围,1 s内 7×10^{-13} 的频率稳定性。

2019年,英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)研究人员报道了利用单行进载波二极管(UTC-PD)将低噪声、重频为331 GHz的孤子脉冲转化成太赫兹脉冲的光频转换技术^[59]。产生的太赫兹信号的阿伦方差为 4.5×10^{-9} ,在10 MHz的偏置频率下的相位噪声为-118 dBc/Hz,1 s内的频率稳定度为 9.6×10^{-15} 。

2.5 低信噪微波源

随着通信、电子战等微波(0.3~300 GHz)系统中处理的信号复杂度越来越高,对芯片级、低功耗、可集成的低相噪微波频率源的需求日益增加。目前基于CMOS技术的微波振荡器在尺寸和功耗方面都表现良好,唯一的不足是缺乏良好的相位噪声性能,而采用光子源则可以避免集成电路中固有的电子噪声和带宽限制。光频梳梳齿之间的拍频范围处于微波波段,可以将其作为一个微波源。

2020年,kippenberg课题组^[60]利用重复频率为14 GHz的克尔光频梳,输出绝对相位噪声低于-60 dBc的超低噪声微波参考信号,偏移频率为1 Hz时,相位噪声功率谱密度为-60 dBc/Hz;偏移频率为10 kHz时,相位噪声功率谱密度为-135 dBc/Hz。同年该团队^[61]相继报道出微波K波段(约20 GHz,用于5G)以及X波段(约10 GHz,用于雷达)的微波信号输出,如图10所示。

继EPFL报道的低噪声微波波段和NPL报道的太赫兹波段之后,IMRA America公司^[62]利用光频梳作为光子源,将低噪声GPS约束的10 GHz介电共振振荡器(DRO)通过相位调制器链接到光频梳上,获得10 kHz和1 MHz的相位噪声功率谱密

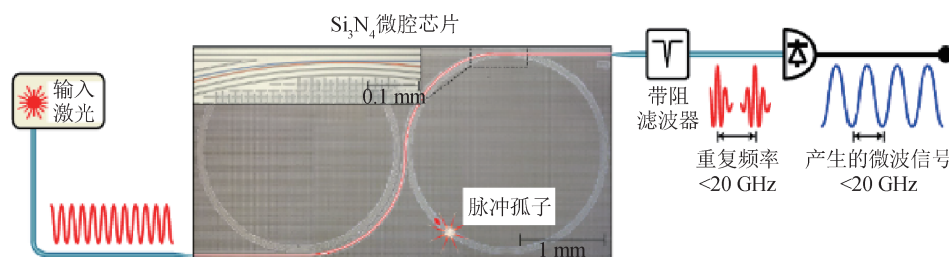


图10 氮化硅微腔光频梳产生的微波信号原理示意图

Fig.10 Concept of microwave generation using an integrated Si_3N_4 soliton microcomb

度分别为 -88 dBc/Hz 和 -105 dBc/Hz 的 300 GHz 的低噪声微波信号, 频率稳定性为 1 s 内 2×10^{-15} 。

2021 年, 该公司在噪声性能测试技术方面获得突破。研究人员利用超快单载波光电二极管(UTC-PD)对产生的低噪声信号进行测试, 产生了阿秒级的时间噪声灵敏度, 可以实现 -100 dBc/Hz 的相位噪声测试, 比现有水平低一个数量级, 体现了超高的噪声分辨力。

2.6 相干通信

光频梳的每一根梳齿都可以看作是相干的单色光光源, 利用波分复用技术将信息编码到不同

频率的载波上, 可满足大规模相干通信的要求, 不仅极大地减小了通信系统体积, 还具有载波数多、相噪低等优势。

2017 年, kippenberg 课题组^[63]进行了相关演示实验, 利用产生的孤子态光频梳中C波段和L波段的94个载波进行数据传输, 采用正交振幅调制, 实现 30.1 Tbit/s 的传输速率; 利用两个光频梳通过光交叉复用技术将载波数翻倍, 实现了 75 km 的 55 Tbit/s 传输速率(原理如图11所示), 是目前单芯光纤数据传输能实现的最高速率。采用多芯单模光纤, 数据传输速率最高可达 661 Tbit/s。

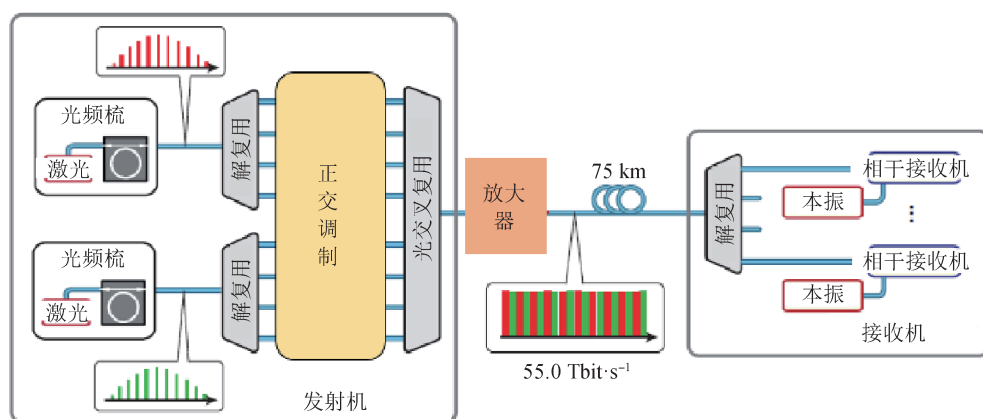


图11 双光梳交叉复用数据传输原理图

Fig.11 Principle of data transmission using a pair of interleaved DKS combs at the transmitter

随着人工智能和机器学习的计算需求呈指数级增长, 数据中心的能源消耗与日俱增, 目前的数据中心网络已经不能完全满足低延迟、高带宽和可扩展性等性能要求, 而光频梳在大规模相干通信领域体现出的巨大潜力, 激发其在通信系统中扮演更多的应用角色, 基于光频梳的超快光路交换机(Optical Circuit Switching, OSC)、集成硅光发射机等器件应运而生。

2021 年, 洛桑联邦理工学院与微软研究院合作^[64], 演示了一种基于微腔光频梳和半导体光放大器的超快全光交换机, 实现了亚纳秒(小于 520 ps)波长切换以及 25 Gbit/s 的基带传输和 50 Gbit/s 的四电平脉冲幅度调制突发模式数据传输。利用基于InP的光放大器阵列和波导光栅阵列组成的光子集成电路, 实现了亚纳秒(小于 900 ps)波长切换和 25 Gbit/s 非归零突发模式传输。

超快全光交换机模型中, 64 个不同波长的梳齿被分离出来分布在不同时间段的机架上进行数

据传输, 采用级联放大器放大单个梳齿光源的功率, 使用马赫曾德尔调制器对数据进行编码实现快速光电交换机。这种使用光信号(而非电信号)在计算节点之间传输信息的方式可以极大地降低能量消耗、增加带宽、提高容错能力并减少管理成本, 从而有效地支持动态数据中心的工作负载。

2021 年, 哥伦比亚大学研究人员^[65]首次展示了基于克尔光频梳的集成硅光发射机, 该发射机模型如图12所示, 将独立的信息通道编码到同一光纤中不同颜色的光上, 实现低能量的大规模并行数据传输。该发射机具有 32 个波长通道, 单通道带宽最高可达 16 G, 因此单根光纤传输速率最高为 512 Gbit/s。所有线路均没有前向纠错的情况下, 在 10 Gbit/s 和 16 Gbit/s 时, 直接测量的误码率均优于 10^{-9} 。研究人员称未来数据中心互连规模可发展到数百个波长通道, 兆比特每秒的片间传输工作能耗将低于 1 pJ/bit, 能够实现低功耗、太比特级链路连接。

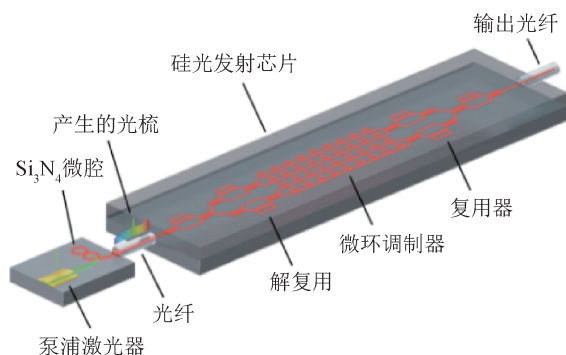


图12 基于克尔光频梳的集成硅光发射机模型

Fig.12 Model of a data center based on Kerr frequency comb-driven silicon photonic transmitter chip

3 总结与展望

从非线性光学产生和器件制备方面介绍了微腔光频梳的发展现状,通过分析技术存在的瓶颈,对未来的发展趋势进行了阐述和预测,包括新型材料体系研究、倍频程光频梳研制、光频梳转化效率提升、重频低噪化、芯片无热化等方面。根据已报道的研究资料介绍了微腔光频梳在光钟、测距和成像、光谱分析、频率合成器、低信噪微波源和相干通信等领域表现出的巨大应用价值。这些应用场景下的原理样机验证实验陆续在实验室内完成,但真正实现片上系统的应用还需在光电集成技术方面发力,包括利用先进的键合或者异质外延等技术来实现微腔光频梳芯片与泵浦光源的混合集成,另外光频梳本身的稳定性仍需深入研究,以保证应用系统的可靠性。未来,具有高精度的芯片级微腔光频梳还可应用于波长定标、系外行星搜索、宇宙膨胀速度、原子核频谱等精密测量领域中,具有十分广阔的应用前景和 market 价值。

参考文献

- [1] KIPPENBERG T J, GAETA A L, LIPSON M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators[J]. Science, 2018,361(6402).
- [2] ARMANI D K, KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, et al. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip[J]. Nature, 2003,421(6926): 925.
- [3] 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): 83904.
- [4] DEL'HAYE P, SCHLIESSER A, WILKEN T, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator via the Kerr nonlinearity[C]. Nonlinear Optics in Microresonators, 2007.
- [5] CHANG L, LIU S T, BOWERS J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. Nature photonics, 2022,16(2): 95-108.
- [6] 万帅. 片上氮化硅微环腔的制备及孤子频梳的研究[D]. 安徽:中国科学技术大学,2020.
- WAN S. Study on fabrication of on-chip silicon nitride microring resonator and generation of soliton microcomb[D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [7] KIPPENBERG T J, HOLZWARTH R, DIDDAMS S A. Microresonator-based optical frequency combs[J]. Science, 2011,332(6029): 555-559.
- [8] HERR T, BRASCH V, JOST J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. Nature photonics, 2014,8(2): 145-152.
- [9] YI X, YANG Q F, YANG K Y, et al. Active capture and stabilization of temporal solitons in microresonators[J]. Optics letters, 2016,41(9): 2037-2040.
- [10] STONE J R, BRILES T C, DRAKE T E, et al. Thermal and nonlinear dissipative-soliton dynamics in Kerr-microresonator frequency combs[J]. Physical review letters, 2018,121(6).
- [11] 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.
- [12] WANG X, XIE P, WANG W, et al. Program-controlled single soliton microcomb source[J]. Photonics research, 2021,9(1): 66-72.
- [13] ZHOU H, GENG Y, CUI W, et al. Soliton bursts and deterministic dissipative Kerr soliton generation in auxiliary-assisted microcavities[J]. Light-science and applications, 2019,8(50).
- [14] FENG L, CHEN S, LI W, et al. Optical frequency comb generation through a thermal assisted method in a Si_3N_4 microresonator[C]. Semiconductor Lasers and Applications X, 2020.
- [15] RAJA A S, VOLOSHIN A S, GUO H, et al. Electrically pumped photonic integrated soliton microcomb[J]. Nature communications, 2019,10(680).
- [16] SHEN B, CHANG L, LIU J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs[J]. Nature, 2020, 582 (7812): 365-369.
- [17] VOLOSHIN A S, KONDRATIEV N M, LIHACHEV G V, et al. Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators[J]. Nature communications, 2021, 12(1): 235-235.
- [18] 石顺祥,陈国夫,赵卫,等. 非线性光学[M]. 西安: 西

- 安电子科技大学出版社, 2012.
- SHI S X, CHEN G F, ZHAO W, et al. Nonlinear optics [M]. Xian: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [19] BRASCH V, GEISELMANN M, HERR T, et al. Photonic chip based optical frequency comb using soliton induced Cherenkov radiation [C]. 2015 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2015.
- [20] KORDTS A, PFEIFFER M H P, GUO H, et al. Higher order mode suppression in high-Q anomalous dispersion SiN microresonators for temporal dissipative Kerr soliton formation [J]. Optics letters, 2016, 41(3): 452–455.
- [21] LIU J, RAJA A S, KARPOV M, et al. Ultralow-power chip-based soliton microcombs for photonic integration [J]. Optica, 2018, 5(10): 1347–1353.
- [22] XIONG C, PERNICE W H P, TANG H X. Low-loss, silicon integrated, aluminum nitride photonic circuits and their use for electro-optic signal processing [J]. Nano letters, 2012, 12(7): 3562–3568.
- [23] JUNG H, TANG H X. Aluminum nitride as nonlinear optical material for on-chip frequency comb generation and frequency conversion [J]. Nanophotonics, 2016, 5(2): 263–271.
- [24] 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.
- [25] LIU X, SUN C, XIONG B, et al. Integrated high-Q crystalline AlN microresonators for broadband Kerr and Raman frequency combs [J]. Acs photonics, 2018, 5(5): 1943–1950.
- [26] WENG H, LIU J, AFRIDI A A, et al. Directly accessing octave-spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in an AlN microring resonator [J]. Photonics research, 2021, 9(7): 7.
- [27] FAN W C, LU Z Z, LI W, et al. Low-threshold 4/5 octave-spanning mid-infrared frequency comb in a LiNbO₃ microresonator [J]. IEEE photonics journal, 2019, 11(6): 1–7.
- [28] VILLOIS A, KONDRATIEV N, BREUNIG I, et al. Frequency combs in a microring optical parametric oscillator [J]. Optics letters, 2019, 44(18): 4443–4446.
- [29] CHANG L, XIE W, SHU H, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators [J]. Nature communications, 2020, 11(1).
- [30] MOILLE G, CHANG L, XIE W, et al. Dissipative Kerr solitons in a III–V microresonator [J]. Laser and photonics reviews, 2020, 14, 2000022.
- [31] LEVY J S, GONDARENKO A, FOSTER M A, et al. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects [J]. Nature photonics, 2010, 4(1): 37–40.
- [32] NAM K H, PARK I H, KO S H. Patterning by controlled cracking [J]. Nature, 2012, 485(7397): 221–224.
- [33] LUKE K, DUTT A, POITRAS C B, et al. Overcoming Si₃N₄ film stress limitations for high quality factor ring resonators [J]. Optics express, 2013, 21(19): 22829–22833.
- [34] EL DIRANI H, YOUSSEF L, PETIT E C, et al. Ultralow-loss tightly confining Si₃N₄ waveguides and high-Q microresonators [J]. Optics express, 2019, 27(21): 30726–30740.
- [35] GONDARENKO A, LEVY J S, LIPSON M. High confinement micron-scale silicon nitride high Q ring resonator [J]. Optics express, 2009, 17(14): 11366–11370.
- [36] XUAN Y, LIU Y, VARGHESE L T, et al. High-Q silicon nitride microresonators exhibiting low-power frequency comb initiation [J]. Optica, 2016, 3(11): 1171–1180.
- [37] PFEIFFER M H P, KORDTS A, BRASCH V, et al. Photonic Damascene process for integrated high-Q microresonator based nonlinear photonics [J]. Optica, 2016, 3(1): 20–25.
- [38] PFEIFFER M H P, LIU J, RAJA A S, et al. Ultra-smooth silicon nitride waveguides based on the Damascene reflow process: fabrication and loss origins [J]. Optica, 2018, 5(7): 884–892.
- [39] LIU J Q, HUANG G H, WANG R N, et al. High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits [J]. Nature communications, 2021, 12(1).
- [40] WANG C, FANG Z, YI A, et al. An ultrahigh-Q microresonator on 4H-silicon-carbide-on-insulator platform for multiple harmonics, cascaded Raman lasing and Kerr comb generations [J]. arXiv e-prints, 2021.
- [41] OKAWACHI Y, SAHA K, LEVY J S, et al. Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip [J]. Optics letters, 2011, 36(17): 3398–3400.
- [42] PFEIFFER M H P, HERKOMMER C, LIU J, et al. Octave-spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in Si₃N₄ microresonators [J]. Optica, 2017, 4(7): 684–691.
- [43] BRILES T C, YU S P, CHANG L, et al. Hybrid InP and SiN integration of an octave-spanning frequency comb [J]. APL photonics, 2021, 6(2): 26102.
- [44] NEWMAN Z L, MAURICE V, DRAKE T E, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock [J]. Optica, 2019, 6(5).
- [45] XUE X, WANG P H, XUAN Y, et al. Microresonator Kerr frequency combs with high conversion efficiency [J]. Laser and photonics reviews, 2017, 11(1): 1600276.

- [46] PAPP S B, BEHA K, DEL'HAYE P, et al. Microresonator frequency comb optical clock [J]. Optica, 2014, 1(1): 10–14.
- [47] STERN L, STONE J R, KANG S, et al. Direct Kerr frequency comb atomic spectroscopy and stabilization [J]. Science advances, 2020, 6(9).
- [48] 刘雅丽, 李维, 武腾飞, 等. 芯片级原子钟的研究进展 [J]. 计测技术, 2021, 41(4): 7–12.
- LIU Y L, LI W, WU T F, et al. Research progress of chip scale atomic clock [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(4): 7–12. (in Chinese)
- [49] SUH M G, VAHALA K J. Soliton microcomb range measurement [J]. Science, 2018, 359(6378): 884.
- [50] TROCHA P, KARPOV M, GANIN D, et al. Ultrafast optical ranging using microresonator soliton frequency combs [J]. Science, 2018, 359(6378): 887–891.
- [51] RIEMENSBERGER J, LUKASHCHUK A, KARPOV M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb [J]. Nature, 2020, 581(7807): 164–170.
- [52] WANG J, LU Z, WANG W, et al. Long-distance ranging with high precision using a soliton microcomb [J]. Photonics research, 2020, 8(12): 1964–1972.
- [53] SUH M G, YANG Q F, YANG K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy [J]. Science, 2016, 354(6312): 600–603.
- [54] DUTT A, JOSHI C, JI X, et al. On-chip dual-comb source for spectroscopy [J]. Science advances, 2018, 4(3): 1701858.
- [55] NIU R, WAN S, LI J, et al. Fast spectroscopy based on a modulated soliton microcomb [J]. IEEE photonics journal, 2021, (99): 1.
- [56] 蒋燕义, 毕志毅, 马龙生. 光学频率合成器 [J]. 量子光学学报, 2005, 11(3): 45–50.
- JIANG Y Y, BI Z Y, MA L S. Optical frequency synthesizer [J]. Journal of quantum optics, 2005, 11(3): 45–50. (in Chinese)
- [57] 姚远. 高精度光学频率合成技术研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- YAO Y. High precision optical frequency synthesis [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017. (in Chinese)
- [58] SPENCER D T, DRAKE T, BRILES T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics [J]. Nature, 2018, 557(7703): 81.
- [59] ZHANG S, SILVER J, SHANG X, et al. Terahertz wave generation using a soliton microcomb [J]. Optics express, 2019, 27(24): 35257.
- [60] 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(1).
- [61] LIU J, LUCAS E, RAJA A S, et al. Author Correction: Photonic microwave generation in the X- and K-band using integrated soliton microcombs [J]. Nature photonics, 2020, 14(8): 523–523.
- [62] TETSUMOTO T, AYANO F, YEO M, et al. 300 GHz wave generation based on a Kerr microresonator frequency comb stabilized to a low noise microwave reference [J]. Optics letters, 2020, 45(16): 4377–4380.
- [63] MARIN P P, KEMAL J N, KARPOV M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications [J]. Nature, 2017, 546(7657): 274.
- [64] RAJA A S, LANGE S, KARPOV M, et al. Ultrafast optical circuit switching for data centers using integrated soliton microcombs [J]. Nature communications, 2021, 12(5867).
- [65] RIZZO A, NOVICK A, GOPAL V, et al. Integrated Kerr frequency comb-driven silicon photonic transmitter [J]. arXiv e-prints, 2021.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者:冯梁森(1993—),女,工程师,博士,现主要从事微腔光学频率梳、光电器件研发、芯片化计量方面的研究。



通讯作者:李维(1986—),男,高级工程师,博士,硕士生导师,主要从事芯片化计量与传感相关研究。



通讯作者:陈少武(1968—),男,研究员,博士,博士生导师。主要从事硅基光子学、非线性光子器件、微腔光学相关研究。