

基于集成光频梳的新型微波光子应用 (特邀)

薛晓晓, 郑小平

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘要: 基于光学微腔的集成光频梳具有光谱宽、谱线间隔大、体积小等优势, 为微波光子系统带来了新的发展机遇。近年来涌现了多种基于微腔光梳的微波光子应用, 包括高质量微波信号产生、微波光子信号处理、真延时微波波束形成等, 具有相位噪声低、可重构能力强、奈奎斯特带宽大等优异性能, 展现了集成微腔光梳在微波光子领域的广阔应用前景。

关键词: 微腔光梳; 微波光子信号产生; 微波光子信号处理; 真延时波束形成

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211046

Novel microwave photonic applications based on integrated microcombs (*Invited*)

Xue Xiaoxiao, Zheng Xiaoping

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Microresonator-based frequency combs (microcombs) are very promising for microwave photonic applications for their advantages including wide bandwidth, large line spacing, and compact volume. Recently, various microcomb-based microwave photonic systems have been reported such as high-spectral-purity microwave generation, microwave photonic signal processing, true-time-delay beamforming, etc. Outstanding performances including low phase noise, high reconfigurability, and large Nyquist bandwidth have been demonstrated, showing a bright future of microcomb-based microwave photonics.

Key words: microresonator frequency comb; microwave photonic signal generation; microwave photonic signal processing; true-time-delay beamforming

收稿日期: 2021-03-11; 修订日期: 2021-04-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0701902); 国家自然科学基金 (61690192); 武汉光电国家研究中心开放基金 (2018WNLOKF011); 之江实验室 (2020LC0AD01)

作者简介: 薛晓晓, 男, 副教授, 博士, 主要从事微波光子学和非线性光学等方面的研究。

光频梳是一类特殊的宽谱相干光源,其光谱包括一系列频率等间隔排布的谱线,时域波形常常呈现为超短脉冲序列。光频梳在微波光子系统中有着广泛应用,根据其对光频梳相位特性的需求不同,可大致划分为相干应用和非相干应用两大类。其中相干应用要求光频梳的各谱线之间能够维持稳定、低噪声的相位关系,典型代表包括低相噪微波信号产生、微波光子混频、信道化接收、光采样模数转换等;而非相干应用不要求光频梳谱线维持稳定的相位关系,典型代表包括微波光子信号处理、真延时波束形成、光载无线传输等。

传统的光频梳产生技术主要包括光纤锁模激光器、固体锁模激光器、级联电光调制器等,存在谱线间隔频率低、系统体积大等不足。近年来,一种称为微腔光梳或克尔梳的新型光频梳技术逐渐发展起来^[1],具有谱线间隔频率高(可达十几 GHz 至 THz)、功耗低、体积小、可集成等突出优势,催生了一批基于新型集成光频梳的微波光子应用,包括低相噪微波信号产生、可重构信号处理、真延时波束形成等。

2015 年,美国 OEwaves 公司的 W. Liang 等人最先利用微腔光频梳开展了微波信号产生实验^[2]。其采用的微腔为基于精密抛光工艺制作的回音壁模式氟化镁微盘腔,品质因数达 10^8 。利用高速光电探测器检测光频梳谱线的拍频,即可得到高质量微波信号。图 1(a) 显示了其产生的 10 GHz 微波信号的单边带相位噪声谱,在 10 kHz、100 kHz、10 MHz 频偏处的相噪分别达到了 -125 dBc/Hz、 -130 dBc/Hz、 -170 dBc/Hz,性能超过已有的同体积集成光电振荡器。2020 年,瑞士洛桑联邦理工大学的 Kippenberg 研究组利用 CMOS 兼容工艺制备的氮化硅微环腔,实现了 X 和 K 波段低相噪微波源,并研究了泵浦激光器的线宽、微波注入锁定等因素对微波质量的影响规律^[3]。图 1(b) 展示了其产生的 10 GHz 微波信号的相位噪声谱,在 10 kHz、100 kHz、10 MHz 频偏处的相噪分别达到了 -100 dBc/Hz、 -110 dBc/Hz 和 -135 dBc/Hz。该实验的微腔品质因数在 10^7 量级,微波信号相噪与图 1(a) 结果相比要差一些,但优点是能够实现片上集成。2021 年,南京大学的姜校顺研究组实现了一种基于二级布里渊泵浦方案的低相噪光频梳^[4],采用品质因数为 10^7 的二氧化硅微盘腔,首先利用泵浦光产生布里渊

激光,再通过布里渊激光激发克尔光频梳。利用布里渊激光频率稳、线宽窄的优点极大地改善了微波信号

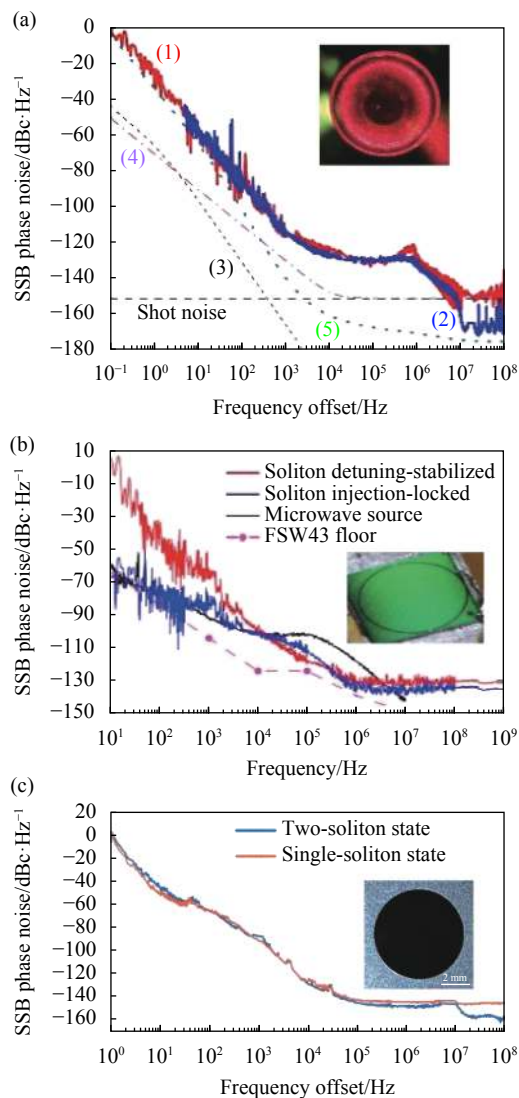


图 1 基于微腔光梳的低相噪微波信号产生。(a)~(c) 分别采用氟化镁晶体腔^[2]、氮化硅微环腔^[3]、二氧化硅微盘腔^[4]产生的 10 GHz 微波信号的相位噪声谱。内置图片展示了所采用微腔的照片。图 1(a) 中的五条曲线分别代表:(1) 无滤波器时相噪,(2) 有滤波器时相噪,(3) 热噪声理论极限,(4) 量子噪声理论极限,(5) 相噪测试仪本底

Fig.1 Microcomb-based low-phase-noise microwave generation. (a)-(c) Single-sideband phase noise of 10 GHz microwave signals generated respectively with MgF₂ toroid cavity^[2], SiN microring^[3], and SiO₂ wedge cavity^[4]. The insets show the microcavity photos. The five lines in (a) indicate the phase noise in different cases: (1) without filter, (2) with filter, (3) induced by thermal noise, (4) induced by quantum noise, (5) background of phase noise analyzer

相噪。图 1(c) 展示了 10 GHz 微波信号的相位噪声谱。在 10 kHz、100 kHz、10 MHz 频偏处的相噪分别达到了 -130 dBc/Hz、-145 dBc/Hz 和 -150 dBc/Hz。

图 2 展示了基于微腔光梳进行微波光子信号处理的代表性结果。2014 年, 笔者在美国普度大学与 A.M. Weiner 等人合作率先利用微腔光梳开展了微波光子滤波的研究^[5]。图 2(a) 展示了微波传递函数的实验结果。利用微腔光梳谱线间隔大的优势, 实现了高达 115.6 GHz 的奈奎斯特带宽。并通过光谱整形实现了传递函数任意可重构。2020 年, 瑞士洛桑联邦理工大学的 T.J. Kippenberg 和 C.-S. Brès 联合课题组利用光子晶体光梳实现了通带可调谐的微波光子滤波器^[6], 结果如图 2(a) 所示。与光谱整形方案相比, 该方

案直接通过调控微腔内孤子脉冲的数目和位置来改变微波传递函数, 而无需光谱整形器, 可以降低系统的体积和复杂度。图 2(a) 和 2(b) 所展示的微波光子滤波器均基于延时抽头结构, 属于非相干方案。2019 年, 澳大利亚斯温伯恩大学的 D. Moss 课题组实现了一种基于微腔光梳带宽缩放原理的可重构微波光子滤波器^[7], 通过对光梳的幅度和相位进行整形, 将光域传递函数转换到电域, 实验测得的微波传递函数如图 2(c) 所示。与延时抽头结构相比, 该方案的优点是不需要色散延时器件, 因此系统更加简洁。类似的实验装置还可以用于信道化滤波, 图 2(d) 展示了该课题组于 2020 年实现的信道化滤波器测试结果^[8], 信道数达到 92, 总带宽达到 8 GHz。

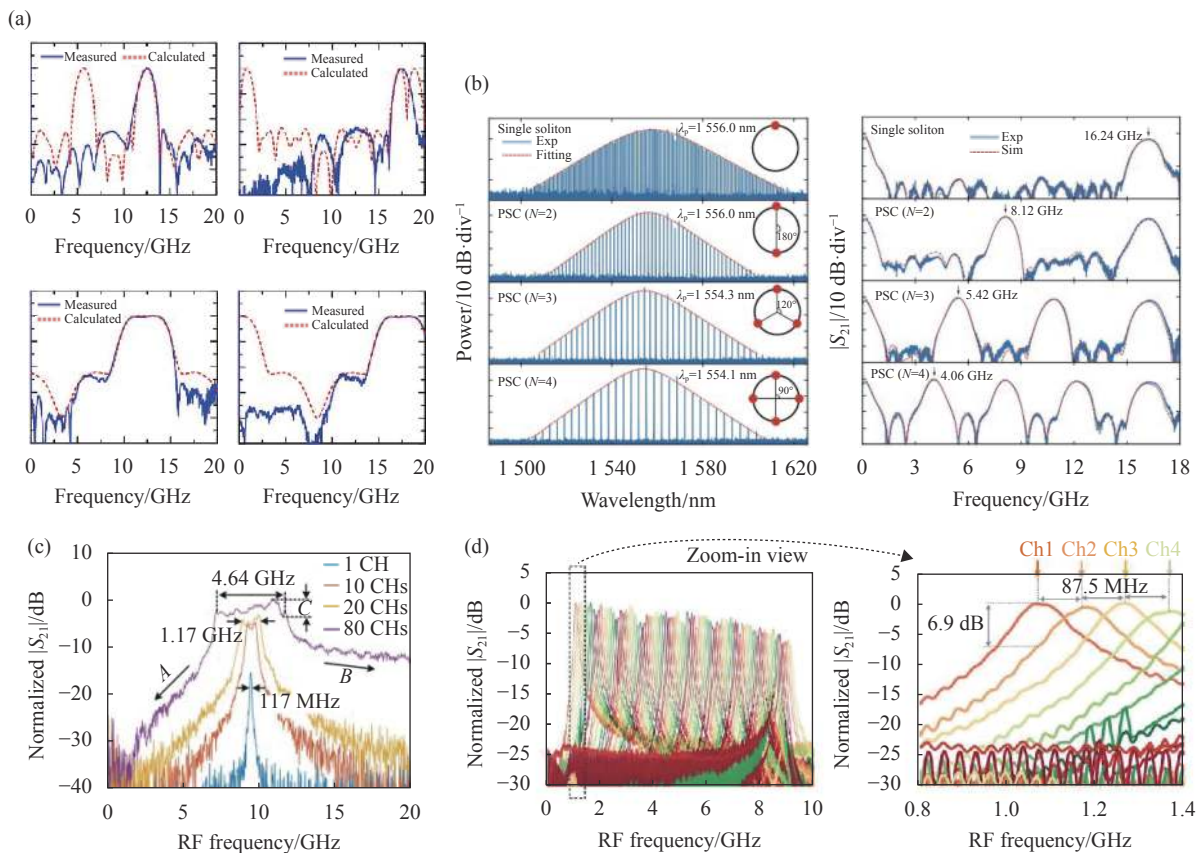


图 2 基于微腔光梳的微波光子信号处理。(a) 基于光梳整形的单通带、可重构滤波器^[5]; (b) 基于光子晶体光梳的可调谐滤波器^[6]; (c) 基于带宽缩放原理的可重构滤波器^[7]; (d) 基于光梳和线性集成微腔的信号化滤波器^[8]

Fig.2 Microcomb-based microwave photonic signal processing. (a) Single-passband and reconfigurable microwave photonic filter based on microcomb spectral shaping^[5]; (b) Tunable microwave photonic filter based on soliton crystal microcombs^[6]; (c) Reconfigurable microwave photonic filter based on microcomb bandwidth scaling^[7]; (d) Microwave photonic channelizer based on microcomb and linear microcavity filter^[8]

图 3 展示了 2018 年笔者和普度大学 A.M. Weiner 课题组合作实现的基于微腔光梳的真延时微波波束

形成结果^[9]。采用集成氮化硅微环腔产生光频梳, 作为微波信号的多波长光源, 通过二进制可调色散矩阵

对不同的梳齿引入相对延时,经光电转换得到延时后的微波信号,馈送到天线阵列。该方案具有两方面优势,一是可以通过光梳光谱整形实现对微波波束形状的可编程调控,二是天线数目直接对应光梳的梳齿

数,因此通过增加光梳谱线数即可增加阵列天线规模。当谱线间隔为 50 GHz 时,在光通信 S、C、L 波段内理论上可支持超过 400 个天线阵元。

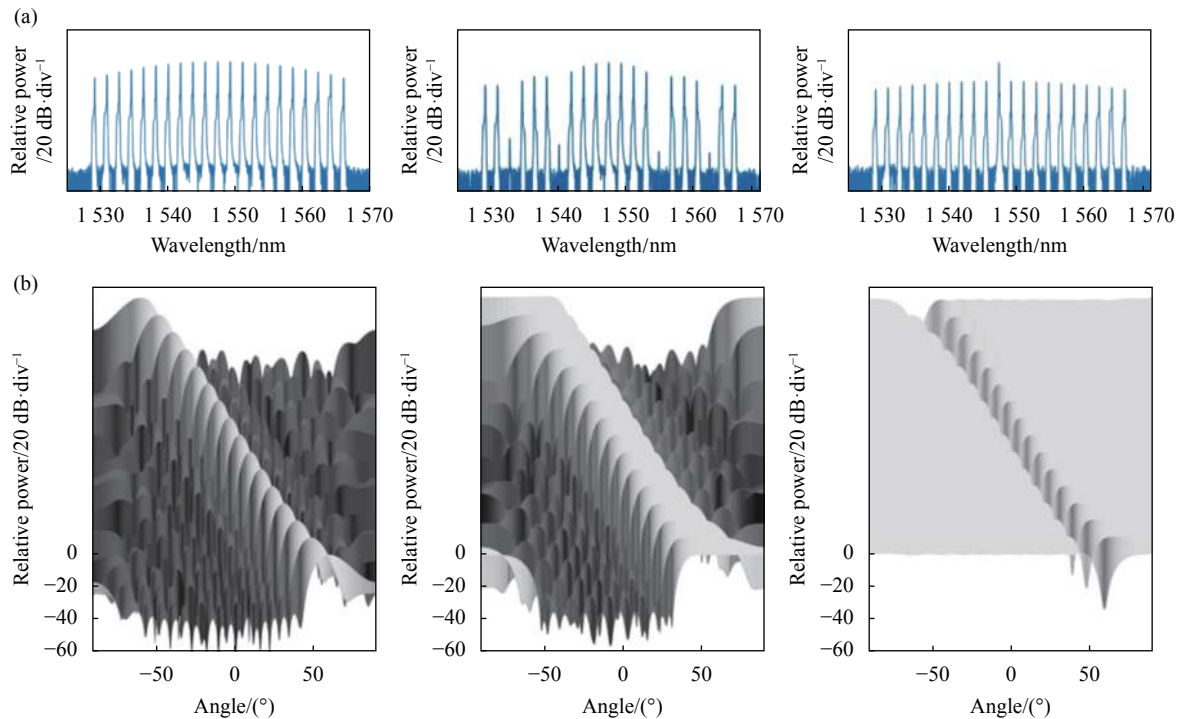


图 3 基于微腔光梳的真延时微波波束形成^[9]。(a) 光梳形状;(b) 与 (a) 对应的微波波束形状

Fig.3 Microcomb-based microwave true-time-delay beamforming^[9]. (a) Microcomb spectrum; (b) Microwave beam pattern corresponding to (a)

综上,集成微腔光梳光谱宽、谱线间隔大、体积小等众多优势为微波光子系统应用带来了新的发展机遇。除了文中介绍的典型代表性工作之外,近年来报道的研究工作还包括抗布里渊散射的光载无线传输^[10]、任意波形发生器^[11]、微分/积分器^[12-13]等,展示了集成微腔光梳在微波光子领域的广阔应用前景。

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: eaan8083.

[2] 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.

[3] Liu J, Lucas E, Raja A S, et al. Photonic microwave generation in the X- and K-band using integrated soliton microcombs [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 486-491.

[4] Bai Y, Zhang M, Shi Q, et al. Brillouin-Kerr soliton frequency combs in an optical microresonator [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126: 063901.

[5] Xue X, Xuan Y, Kim H-J, et al. Programmable single-bandpass photonic RF filter based on Kerr comb from a microring [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3557-3565.

[6] Hu J, He J, Liu J, et al. Reconfigurable radiofrequency filters based on versatile soliton microcombs [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4377.

[7] Xu X, Tan M, Wu J, et al. High performance RF filters via bandwidth scaling with Kerr micro-combs [J]. *APL Photonics*, 2019, 4: 026102.

[8] Xu X, Tan M, Wu J, et al. Broadband photonic RF channelizer with 92 channels based on a soliton crystal microcomb [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5116-5121.

[9] Xue X, Xuan Y, Bao C, et al. Microcomb-based true-time-delay network for microwave beamforming with arbitrary beam pattern control [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018,

- 36(12): 2312-2321.
- [10] Alshaykh M S, Xuan Y, Leaird D E, et al. Kerr combs for stimulated Brillouin scattering mitigation in long-haul analog optical links [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(23): 5773-5779.
- [11] Tan M, Xu X, Boes A, et al. Photonic RF arbitrary waveform generator based on a soliton crystal micro-comb source [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22): 6221-6226.
- [12] Tan M, Xu X, Corcoran B, et al. RF and microwave fractional differentiator based on photonics [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs*, 2020, 67(11): 2767-2771.
- [13] Xu X, Tan M, Wu J, et al. Photonic RF and microwave integrator based on a transversal filter with soliton crystal microcombs [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs*, 2020, 67(12): 3582-3586.