

微腔集成相干光源研究进展、通信应用及其未来展望



刘可为*, 吴冰冰, 李 芳

(中国信息通信研究院技术与标准研究所, 北京 100191)

摘要 凭借小体积、低功耗、可重构、低成本等优势, 片上集成相干光源成为光计算、自动驾驶、高速光互联、5G/6G 通信等领域极具潜力的光源方案。微腔集成相干光源结合片上集成和腔增强效应, 显著增加了腔内光场功率, 降低了泵浦阈值。该文介绍克尔光频梳、微腔受激拉曼激光、二阶非线性光梳和微腔增强电光梳四大类微腔集成相干光源的原理和研究进展, 针对谱宽、噪声、效率、功率四大关键性能指标逐一进行分析, 介绍基于微腔集成相干光源在通信应用中的研究进展, 并对其未来发展趋势进行展望。

关键词 集成相干光源; 克尔光频梳; 受激拉曼激光; 二阶非线性光梳; 微腔增强电光梳
中图分类号 TN256 **文献标志码** A **DOI** 10.12178/1001-0548.2024165

Advances in Microcavity-Integrated Coherent Light Source Research, Communication Applications and Their Future Perspectives

LIU Kewei*, WU Bingbing, and LI Fang

(Institute of Technology and Standards, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

Abstract With advantages such as small footprint, low power consumption, reconfigurability and low cost, chip-integrated coherent light sources have become a highly promising scheme, applied in optical computing, autonomous driving, high-speed optical interconnection, 5G/6G communications, etc. Combining on-chip integration and cavity enhancement effects, microcavity-based integrated coherent light sources significantly improve the intracavity light power as well as reducing the pump threshold. This paper introduces in detail the principle and research progress of four kinds of microcavity integrated coherent light sources: Kerr frequency combs, microcavity stimulated Raman lasers, quadratic combs and microcavity-enhanced electro-optical combs. The four key parameters of spectrum width, noise, efficiency and power are analyzed one by one, and the research progresses of microcavity-based integrated coherent light sources in communication applications are introduced. At last their future development trends are prospected.

Key words integrated coherent light source; Kerr frequency comb; stimulated Raman laser; quadratic comb; microcavity-enhanced electro-optical comb

以激光光频梳为代表的激光技术作为可靠的相干光源, 已广泛应用于精密测量、超快光学等领域。然而它们通常依赖庞大、复杂且昂贵的设备来产生、控制和使用, 因此大多数应用场景都受限实验室。随着近二三十年来半导体材料和微纳加工技术的发展, 片上集成光频梳等相干激光光源逐渐成为研究热点。集成相干光源具有体积小、功耗低、成本低、波段广、可重构等优势, 在诸多新兴

技术如自动驾驶^[1]、光子计算^[2]、机器学习^[3]、5G/6G 通信^[4]、高速光互联^[5-6]等领域极具潜力和价值。得益于近年来集成光子技术取得的重大进展, 片上集成相干光源技术的可行性已在众多光学材料平台上得到验证, 其主要性能指标, 如谱宽^[7]和噪声^[8]等已经可以与现有固态激光器和光纤激光器相媲美。

集成相干光源的光场被限制在尺寸较小的波导

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-08-02

基金项目: 中央级科学事业单位改善科研条件专项 (102124241330000000003)

作者简介: 刘可为, 博士, 主要从事高速光传输、集成光电子芯片、光频梳方面的研究。

*通信作者 E-mail: liukewei@caict.ac.cn

中, 可显著提高光功率密度, 降低泵浦阈值。使用微谐振腔(简称“微腔”)可以进一步提升非线性增益, 微腔从时间和空间两个维度将光场限制在腔内传播, 通过谐振作用大大增强了腔内光场功率, 其增强系数与微腔的品质因子(即 Q 值)有关, Q 值越高, 增强效果越显著, 泵浦阈值越低。早期的高 Q 微腔大多是基于回音壁模式(Whispering Gallery Mode, WGM)的微腔, 如微球腔(Microsphere)^[9]、微楔盘腔(Micro-wedge)^[10]、微螺环腔(Micro-toroid)^[11-12]、微棒腔(Micro-rod)^[13]等, 尽管这类微腔的 Q 值很高(可达 10^8 以上), 但难以集成, 且需要拉锥光纤或棱镜耦合, 受环境扰动较大。随着半导体生长和刻蚀工艺的日渐成熟, 低损耗的集成光波导得以实现, 为高 Q 值平面波导微腔(Planar Micro-cavity)的制备奠定了基础。与传统的 WGM 腔相比, 平面波导微腔的模式体积更小, 集成度更高, 且便于大规模制备。目前用于制备集成非线性相干光源的平面波导微腔 Q 值普遍在 10^6 以上, 集成 Si_3N_4 微腔的 Q 值甚至高达 10^8 ^[8]。尽管平面波导微腔的 Q 值比传统 WGM 微腔的 Q 值略低, 但得益于更小的模式体积, 可显著降低非线性阈值功率。总的来说, 微腔集成相干光源具有低泵浦阈值、小体积、高集成、批量低成本等诸多优势, 是光集成芯片中最重要的光器件之一。

1 技术方案

根据原理的不同, 微腔集成相干光源可分为 4 类: 基于三阶非线性效应的克尔光频梳和受激拉曼激光、基于二阶非线性效应的二阶非线性光频梳和微腔增强电光梳, 它们都可以工作在相干状态, 原理如图 1 所示。接下来分别对 4 种典型技术方案进行介绍。

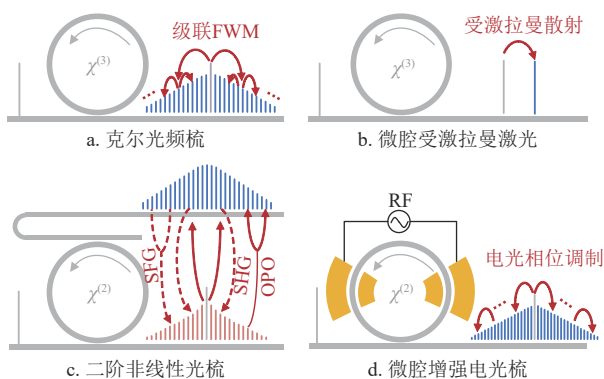


图 1 微腔集成相干光源的基本类型

1.1 克尔光频梳

克尔光频梳是目前最普遍、研究最深入的微腔集成相干光源。克尔光频梳的增益起源于克尔效应引起的参量四波混频(Four-wave Mixing, FWM), 它是一种典型的三阶非线性效应。2004 年, 文献[11]的研究使用连续光泵浦石英微腔, 首次观察到克尔效应引起的四波混频光梳。得益于高 Q 微腔的光场增强效应, 其非线性泵浦阈值仅为 $174 \mu\text{W}$, 比光纤中的参量四波混频阈值低了两个数量级^[14]。2007 年, 文献[15]的研究使用 1550 nm 连续光泵浦单片集成的高 Q 熔融石英微腔, 通过级联四波混频(Cascaded FWM)实现了梳齿间隔为 7 nm 、谱宽超过 500 nm 的克尔光频梳产生。但上述工作中的克尔光梳均为高噪声状态, 并非相干光源。实际上, 研究人员一直在探索微腔中产生相干克尔光频梳的方法。2012 年, 文献[16]在高 Q 的集成 SiO_2 微腔中观察到相位锁定的低噪声态克尔光频梳。随后在 2014 年, 文献[17]通过自注入锁定方法也观察到了相位锁定的克尔光频梳。2016 年, 文献[18]在 Si 微腔中实现了光谱覆盖 $2.4 \sim 4.3 \mu\text{m}$ 的中红外锁模相干态克尔光梳。

克尔光频梳存在一种更加引人关注的相干态——耗散克尔孤子(Dissipative Kerr Soliton, DKS), 简称“克尔孤子”。DKS 是一种典型的时域腔孤子, 它的形成依赖于微腔内损耗和参量增益、色散和非线性的双重平衡^[19], 且在单孤子状态时具有 sech^2 形的光谱包络。2014 年, 文献[20]的研究首次在晶体 MgF_2 高 Q 微腔中成功实现了 DKS 的产生(图 2a)。2015 年, 文献[21]的研究采用色散工程对高阶色散进行调控, 利用色散波有效提高了 DKS 的谱宽, 随后文献[22]的研究通过双边色散波的产生成功实现了跨倍频程的 DKS。除 DKS 之外, 研究人员还研究了产生于正常色散区的暗孤子(Dark Soliton)^[23](图 2b)、克尔效应和拉曼散射共同作用的斯托克斯孤子(Stokes Soliton)^[24](图 2c)、具有极高重复频率的孤子晶体(Soliton Crystal)^[25-26]以及包含额外增益介质注入的激光腔孤子(Laser Cavity Soliton)^[27]等, 极大地丰富了克尔相干光频梳的种类。此外, 具有 GHz 量级重频的克尔孤子^[28-30]是光学频率和微波频率的天然纽带^[31], 经高速光电探测器探测后可输出低噪声的微波信号, 其噪声水平, 尤其是中高频段(如 100 kHz 以上)的噪声相比传统微波源更低^[32-34]。

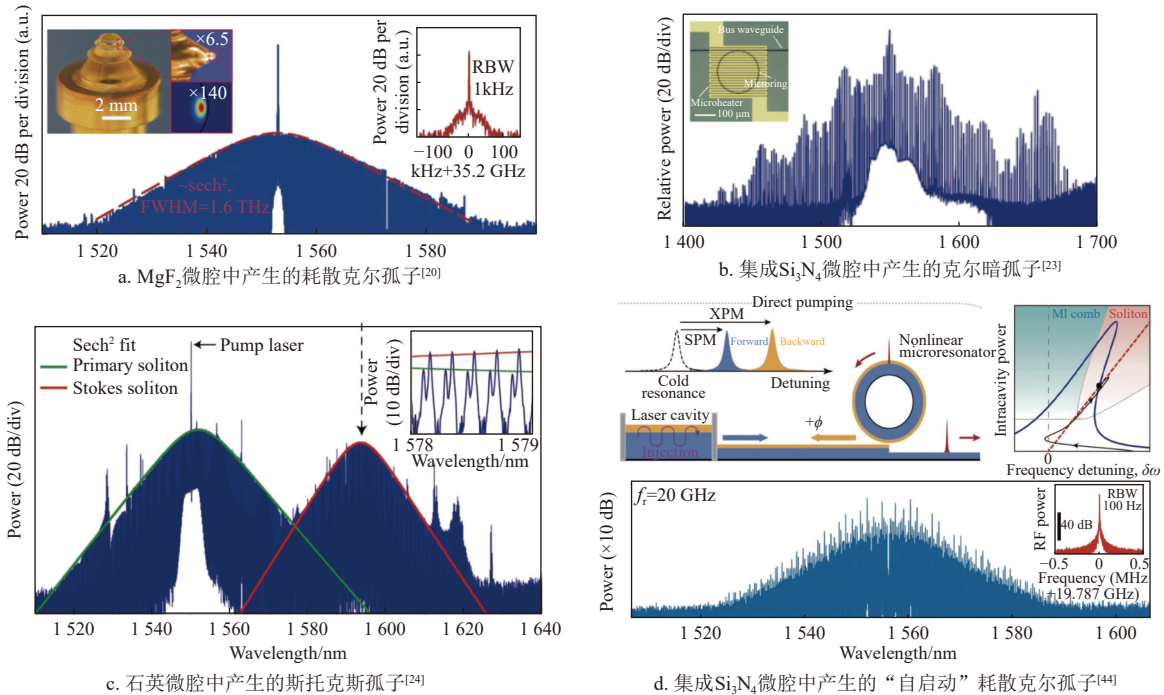


图 2 相干克尔光频梳

DKS 具有光谱宽、结构简单、噪声较低等优点，是微腔集成相干光源中最早发展成熟的技术。但由于微腔热效应导致的热不稳定性^[35-36]，DKS 自启动较为困难。当泵浦光从腔模蓝端扫描至红端停下，由于热效应导致的双稳态，造成腔模随腔内变化的温度而移动，孤子难以稳定存在。为了解决这一问题，研究人员提出了一些方法通过抑制或补偿微腔的热效应来产生稳定的 DKS，如功率调制^[37]、主动功率反馈^[38]、热调谐^[39]、快速频率扫描^[35, 40]以及辅助激光器双向泵浦^[41-42]等。2018 年，文献 [43] 的研究使用 InP 半导体激光器泵浦 MgF_2 微腔，首次采用自注入锁定机制在微腔中产生了 DKS。2020 年，文献 [44] 的研究利用自注入锁定机制，在异质集成的 DFB 半导体激光器和 Si_3N_4 微腔中实现了 DKS 自启（图 2d）；2021 年，文献 [45] 的研究实现了 CMOS 兼容的硅基单片集成“自启”克尔孤子光梳，成为未来光子集成芯片极具竞争力的光源方案。

1.2 微腔受激拉曼激光

受激拉曼散射（Stimulated Raman Scattering, SRS）同样源于三阶非线性效应，是一种非弹性散射：入射光场与介质晶格相互作用，一部分能量转移到与晶格振动相关的声子，使分子完成两个振动态之间的跃迁，另一部分则转移到光子中。受激拉曼激光需要较高功率的激光泵浦。由于小尺寸集成

波导对光场的限制，光功率密度大大提高，因此集成拉曼激光的泵浦阈值远低于体材料激发的拉曼激光阈值。微腔凭借场增强效应和较小的模式体积，使得拉曼泵浦阈值进一步降低^[46-47]。2002 年，文献 [48] 的研究使用连续光泵浦高 Q 值的石英微球腔，产生了转换效率超过 16% 的拉曼激光（图 3a），首次实现微腔受激拉曼激光。2007 年，文献 [49] 的研究在集成的硅晶体微腔中实现了泵浦阈值仅为 20 mW、斜率效率为 28% 的拉曼激光输出（图 3b）。随后，研究者在集成金刚石微腔^[50]、集成氮化铝晶体微腔^[51]以及集成铌酸锂晶体微腔^[52]（图 3c）中都实现了受激拉曼激光。

微腔受激拉曼激光作为集成相干光源的重要组成部分之一，具有以下 3 点优势：一是其激射波长与介质的增益能带结构、色散等无关，仅与拉曼声子移频量和泵浦激光波长有关，可根据此特性通过改变泵浦波长或改变激发的声子类型来灵活调整受激拉曼激光的波长，丰富了激光的工作波段；二是集成拉曼激光容易自启，无须复杂的调谐过程，可稳定存在于谐振峰的蓝失谐端，且单梳齿功率高于克尔光孤子；三是微腔拉曼激光的相干性较好，是性能优良的窄线宽的低噪声激光光源^[53]，其噪声特性，尤其是高频段的本征噪声甚至可优于泵浦光^[54]。微腔集成受激拉曼激光的局限性在于输出谱宽相对较窄，需要腔模与拉曼增益重合，且仅能在晶体微腔中产生。

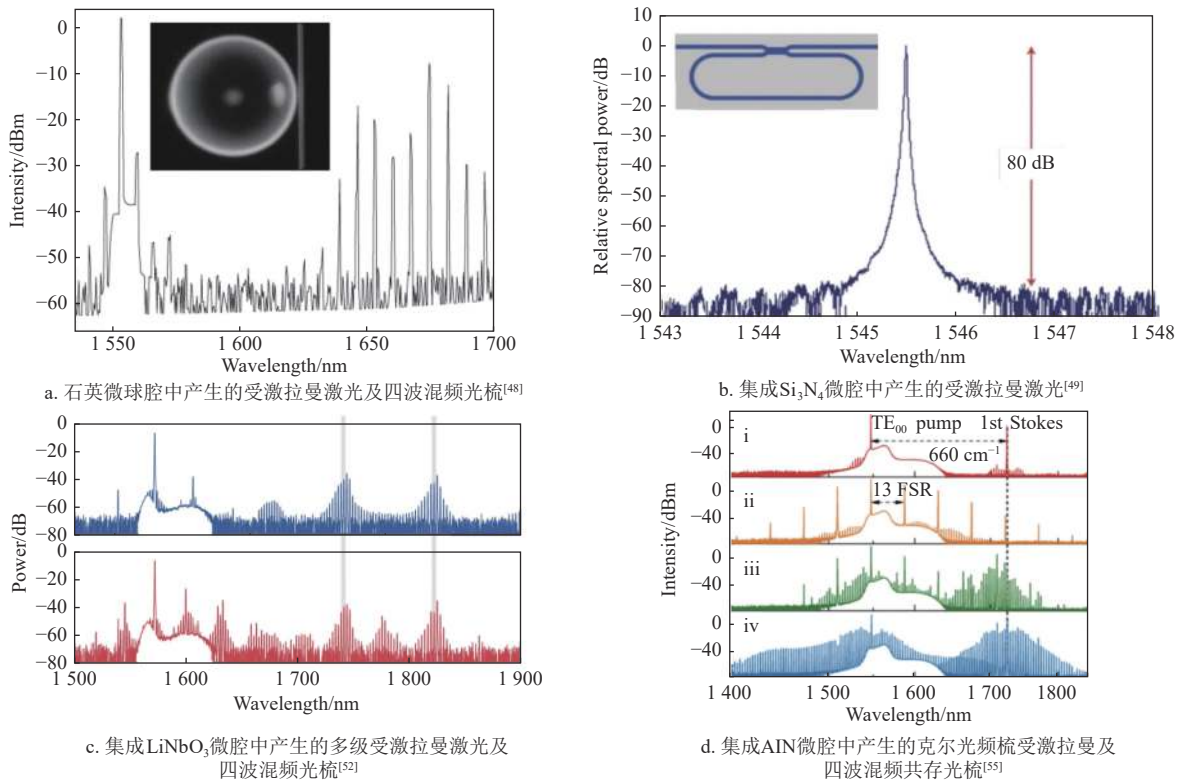


图3 微腔受激拉曼激光及光频梳

需要注意的是,微腔内的受激拉曼散射与克尔效应存在相互竞争。如在反常色散区,克尔效应可通过调制不稳效应自发形成光梳,而受激拉曼激光也会吸收泵浦能量,在拉曼波长附近产生梳齿,两者之间相互竞争,阈值更低者率先起振。不过,微腔受激拉曼激光与克尔光频梳可以同时存在(图3d),其梳齿重叠部分分别处于谐振峰的不同失谐处^[51]。更为重要的是,文献[56]指出拉曼和克尔效应的相互作用有助于产生相干态的锁模光梳,在硅微腔中产生了锁模态中红外光频梳。另一种情况是在正常色散区发生的拉曼-泵浦四波混频,此时拉曼激光和泵浦激光作为双泵浦源,通过克尔效应产生四波混频的梳齿,可增加微腔拉曼激光的谱宽,但也可能进入非相干的高噪声态^[57]。

1.3 二阶非线性光梳

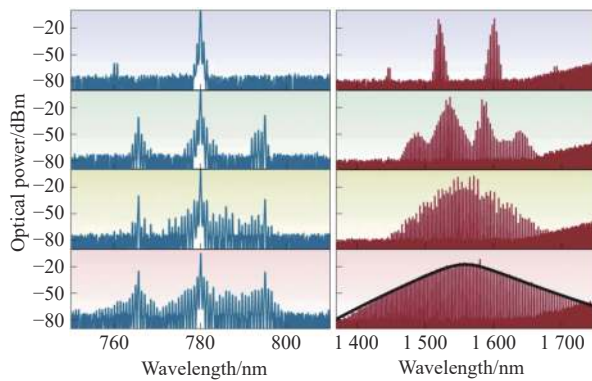
前述的克尔光频梳和微腔受激拉曼激光均是基于介质的三阶非线性效应,而基于二阶非线性效应的二阶非线性光梳也是一种十分重要的集成相干光源。通过二阶非线性效应产生光频梳的概念最早可以追溯到二十多年前,文献[58]在激光腔内放置了一个电光调制器进行相位调制,观察到了光参量振荡产生的光梳。二阶非线性效应通常强于三阶非线性,相比于克尔光梳和拉曼激光,二阶非线性光

梳具有效率高和波段跨度广两大优点,但通常需对相位匹配进行特别设计。早期的二阶光梳大多基于体材料晶体,近年来,具备灵活色散调控和相位匹配设计的集成二阶非线性光梳受到了越来越多的关注。集成二阶非线性光梳大致可以细分为3类,分别是泡克尔斯光梳、二阶参量频率转换光梳和集成电光梳。

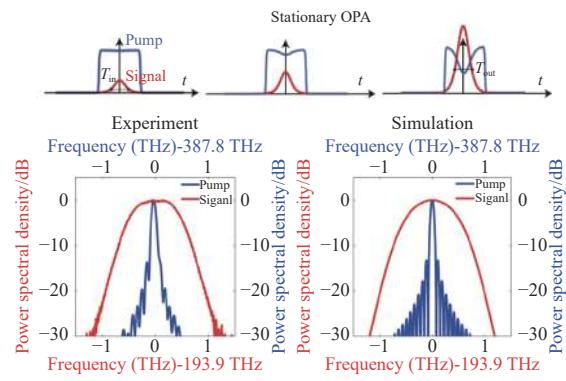
泡克尔斯光梳是一种典型的二阶非线性光梳,其原理是通过微腔内连续的倍频、和频和光参量振荡形成级联的三波混频梳齿,该过程可由图1c描述。研究人员对于泡克尔斯光梳的动态过程进行了数值模拟和理论研究,文献[59]揭示了泡克尔斯光梳中存在类似克尔非线性的调制不稳状态,文献[60]则仿真发现了低噪声的图灵态以及多孤子状态,文献[61]探索了三阶非线性效应对二阶非线性光梳的影响。实验方面,如在周期性极化铌酸锂波导和铌酸锂WGM腔中^[62-64],观察到了较为密集的泡克尔斯光梳,但都是调制不稳的光梳,并非孤子态。直到2020年,文献[65]的研究使用780 nm的连续光泵浦集成氮化铝微腔,得到了1560 nm附近的相干态孤子(如图4a所示),首次实现了泡克尔斯孤子的产生。2022年,文献[66]的研究利用光参量振荡中泵浦光和信号光的走离也成功产生了

孤子态的二阶非线性光梳（图 4b）。由于利用的是效率更高的二阶非线性效应，相较于克尔孤子，

泡克尔斯孤子具有更低的泵浦阈值和更高的能量效率。



a. AlN微腔中产生的泡克尔斯孤子^[65]



b. 利用光参量振荡中泵浦光和信号光的走离产生的相干态二阶非线性光梳^[66]

图 4 二阶非线性光梳

二阶参量频率转换光梳的概念相对简单，其原理是利用和频、倍频以及差频等参量过程，将某一波段的光梳转换到其他波段，如中红外^[67]或可见光波段^[68]，以满足更多应用场景的需求。对于泡克尔斯光梳和二阶参量转换光梳而言，由于二阶参量过程频率跨度较大，一般需要通过优化波导结构参数以调控微腔色散，从而实现相位匹配。此外，由于温度也会影响相位匹配情况，还需采取有效的温控措施维持相位匹配条件，防止光转换效率降低。集成电光梳涉及微波与光场的相互作用，本质上是微波和光子的二阶非线性参量作用，但研究人员习惯将其单独分为一类，详细介绍见第 1.4 节。

1.4 微腔增强电光梳

电光梳的二阶参量过程由微波（外接电极产生）和光子共同参与。外加电场通过电光效应对光场进行相位调制，从频谱上看，电光调制是在原有光学频率两端产生一系列间隔等于微波频率的边带，其强度分布满足一阶贝塞尔函数。电光梳的数量与电场的调制深度有关，即电场强度越大，调制深度越深，产生的梳齿数目越多。早期的电光调制光梳是在体材料介质中产生^[69]，随后出现了基于弱约束波导的电光调制器^[70]，目前成熟商用的相位调制器以弱约束波导式为主，其调制带宽的优化对电极和封装设计要求较高，高带宽（>50 GHz）的商用电光调制器价格高昂。随着半导体薄膜生长和微纳加工技术的成熟，片上集成的电光梳最近几年发展迅速，具有半波电压低、带宽大、梳齿间距可调谐、效率高等诸多优点。

根据原理结构的不同，集成电光梳可分为

3 类：直波导相位调制（Phase Modulation, PM）型、马赫曾德调制（Mach-Zehnder Modulation, MZM）型和微环调制（Microring Modulation, MRM）型^[71]。PM 型中电场对光场直接进行相位调制，结构最简单；MZM 型由于使用了干涉结构，通过调整单臂的相位偏置可以使光谱变得平坦；MRM 型利用了微腔增强效应，光场在微腔内不断循环传播，与电场之间的相互作用大大增强，同等条件下产生的频率梳齿数目最多，光谱最宽。然而，微腔增强的集成电光梳需满足谐振条件，即微波的调制频率与微腔的自由光谱范围（FSR）匹配，导致电光梳的重频无法连续调谐，只能在腔共振频率附近微调。

目前，集成微腔电光梳主要基于 Si、InP 和 LiNbO₃ 这 3 种材料平台产生。其中，Si 的折射率高、损伤阈值高、成本低且与 CMOS 的兼容性较好。尽管 Si 为中心对称材料无本征二阶非线性，但可通过等离子色散效应^[72]产生等效电光调制。如图 5a 所示，文献 [73] 的研究通过对掺杂硅微腔进行电场调制，得到了梳齿间距为 10 GHz 的 5 根平坦电光梳。InP 为非中心对称的直接带隙材料，可通过本征二阶非线性、量子限制斯塔克效应和以及掺杂区域的等离子色散效应实现电光调制。如图 5b 所示，文献 [74] 的研究在 InP 微环中集成两个级联相位调制器、半导体光放大器和移相器，产生了梳齿间距为 6.71 GHz 的 59 根电光梳齿（20 dB 带宽）。LNOI 的二阶非线性系数高、透射谱宽、损耗低、响应时间低至飞秒量级，近年来发展迅速，是性能极佳的电光调制介质。2019 年，文献 [75] 的研究使用片上集成的铌酸锂微腔，通过优化电极

布局 and 缩短电极间距, 得到了梳齿间距 10 GHz、梳齿数量超过 900 根的电光梳, 频谱跨度超过 80 nm, 但由于施加电场调制后的微腔处于欠耦合状态, 其转换效率仅有 0.3%。随后在 2022 年, 文献 [76] 的研究额外增加一个耦合微腔, 通过优化泵浦模式的耦合状态, 将转换效率提升至 30%, 电光梳的单梳齿功率和光谱总宽度得到显著提高

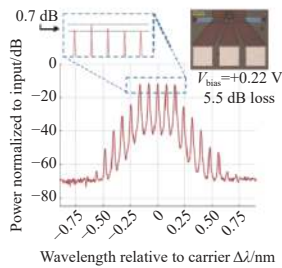
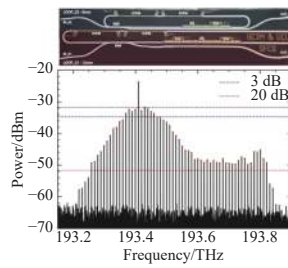
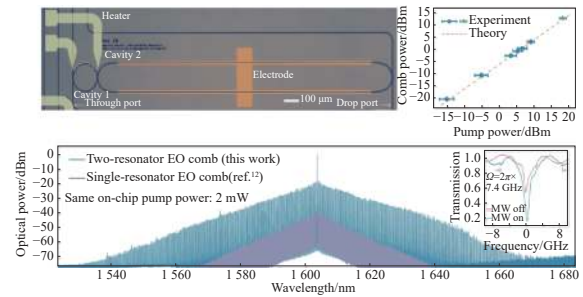
a. Si微腔电光梳^[73]b. InP微腔电光梳^[74]c. LiNbO₃微腔电光梳^[75]

图5 微腔增强集成电光梳

2 关键指标参数

2.1 谱宽

集成相干光源的谱宽指光频梳的频谱跨度。由于色散（主要是二阶色散）的存在，微腔腔模和光梳的失谐量（偏离程度）通常会随着远离泵浦中心而逐渐增加，色散值越大，光梳的谱宽也越窄。除了二阶色散外，更高阶的色散通过色散波扩展微腔光源的光谱范围^[21]，通过优化微腔的色散设计（包括选取合适的微腔介质材料和设计波导横截面尺寸），降低泵浦波长处的二阶色散，并合理利用色散波的产生，可进一步增大光源的谱宽（图 6a）。当光谱达到跨倍频程^[22]时，可使用 $f-2f$ 方法锁定偏频，便于光频梳的绝对频率锁定。集成相干光源的谱宽同样与泵浦功率密切相关，对克尔光频梳、微腔二阶非线性光梳而言，提高泵浦功率可以同步增加所有光梳功率，从而提高可用的光谱宽度；对于腔增强的电光梳而言，提升微波信号功率（增大相位调制深度）可提升梳齿数量，从而提高光源的带宽；对于微腔受激拉曼激光，增大泵浦激光功率，受激拉曼激光在一定范围内同步增加，通过拉曼泵浦四波混频和级联拉曼激光产生更多光梳，进一步增大可用光源的光谱宽度。

实际上，对于光频梳而言，谱宽同时与梳齿间距和梳齿数量有关。微腔的腔长和介质材料的折射率决定了光梳间距，在同等泵浦条件下，微腔腔长

（图 5c）。微腔增强电光梳的光谱在纵轴对数坐标下呈现三角形包络，光谱强度由中心频率向两侧衰减，其 3 dB 带宽与微腔色散有关，可通过有效的色散设计增加可用电光梳齿数量。作为对比，片上集成 MZM 型和 PM 型结合（非腔增强方案）可得到较为平坦的电光梳，目前在 LNOI 平台上已实现 91 根平坦电光梳（驱动功率 38 dBm）^[77]。

越小，梳齿间距越大，并且腔增强作用更强，因此谱宽越宽。随着低噪声微波频率产生和密集波分复用系统的应用需求不断增加，梳齿间距在数十 GHz 的集成相干光源受到较多关注^[28, 78]。

2.2 噪声

集成微腔相干光源的噪声可分为单光梳频率噪声和重频噪声。单光梳频率噪声通常由频率噪声功率谱表征，根据对不同频段偏移频率的噪声贡献，大致可把频率噪声分为 3 类：贡献低频段的技术噪声、贡献中频段的热噪声（ $1/f$ 噪声）、贡献高频段的量子噪声。技术噪声主要来源于半导体激光器或光纤激光器的机械振动、声学噪声、电路电流噪声等与外界环境相关的噪声。中频部分一般由热噪声主导，一方面来源于泵浦源自身的热噪声，如半导体激光器腔介质的热膨胀、热光效应导致激光器腔模发生波动，从而影响输出光频率，另一方面来自于微腔的热噪声，外界的热噪声背景通过热光效应影响折射率以及热膨胀导致腔长变化，导致腔模发生频率抖动。微腔的热噪声主要与光场的模式体积、波导材料的导热系数以及热光系数有关，选择大模式体积微腔、热光系数较低和导热系数较高的微腔介质材料有助于降低热噪声水平。激光器高频段的频率噪声主要来源于自发辐射噪声，它是激光的本征噪声，也叫量子噪声、白噪声或肖洛-汤斯噪声，对应于频率噪声谱高频的平坦部分，是激光频率噪声的下限。

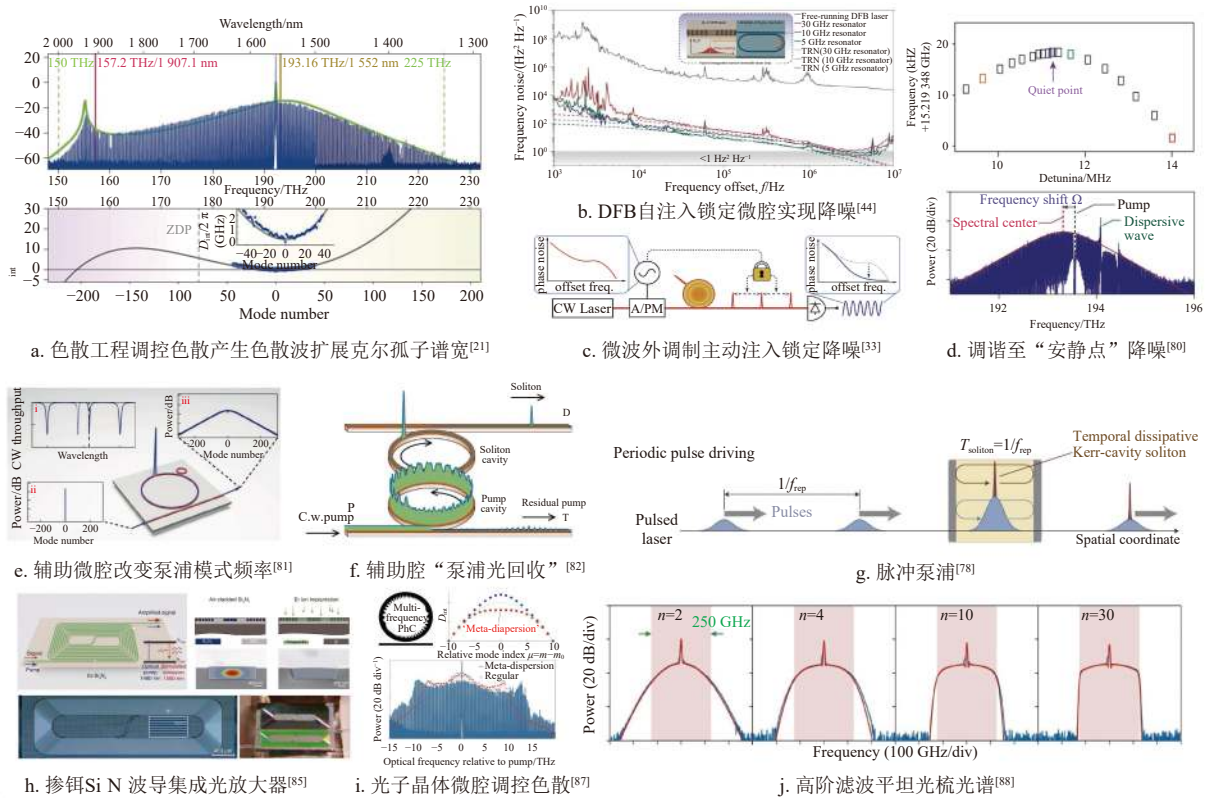


图 6 集成相干光源的关键指标及提升方案

针对克尔孤子和微腔拉曼激光,可使用负反馈手段(如PDH锁定法)或超稳窄线宽激光参考法锁定光梳绝对频率,从而降低单光梳的频率噪声。然而,在以低功耗、微型化为发展方向的集成芯片平台中使用上述传统的方案实现锁频的难度较大,还需另辟蹊径,自注入锁定(Self-injection Locking, SIL)是目前最具竞争力的方案。2020年,文献[44]的研究演示了基于SIL的“一键启动”孤子光梳(图6b),这不仅解决了克尔孤子“自启”困难的问题,还实现了DFB激光器和微腔的片上集成,是迈向片上集成相干光系统之路的重要里程碑。随后,文献[8]的研究在CMOS兼容的硅基平台,将单片集成的DFB激光器自注入锁定到超高Q值薄氮化硅微腔实现了自启的暗孤子光梳,由于微腔极高的Q值,半导体激光器的线宽被压窄至Hz量级,频率稳定度极高。对于微腔集成电光梳而言,其频率噪声的主要来源是驱动相位调制器的微波源,泵浦源噪声、热噪声和技术噪声为次要噪声贡献^[79]。

除单频率噪声外,重频噪声也是微腔相干光源的重要指标,尤其是针对光梳合成微波信号的应用场景^[32]。微腔相干光源的重频噪声不仅会继承泵浦源噪声和微腔热噪声,还因温度、腔内功率等波

动引起的失谐量变化通过拉曼效应和色散波的作用耦合引入。良好的温控、频率和功率负反馈等手段有利于降低重频噪声。此外还可采用注入锁定的方式,如图6c所示,利用相位调制器在泵浦频率两端产生接近梳齿间隔的边带,从而将梳齿锁定在边带频率处^[33],不过该方法的锁定带宽有限,主要针对低频段降噪,且噪声水平受限于驱动相位调制器的微波源。此外对于克尔光孤子而言,还可将泵浦光调谐至失谐变化量对光梳重频影响最小的“安静点”来抑制重频噪声^[80],如图6d所示。但该方法强烈依赖于模式耦合产生的色散波,在氧化硅微腔中适用性较大。

2.3 效率

微腔集成相干光源的效率定义为耦合出微腔的非泵浦光功率与输入微腔的泵浦光的比值。DKS的典型效率仅约1%,这是因为腔内达到DKS态时,泵浦光处于腔模较远的红失谐端,导致大部分的泵浦光并未耦合至腔内。为解决克尔亮孤子效率低的固有缺陷,文献[81]提出一种利用辅助小微腔对泵浦模式进行额外频率调谐的方案,通过特殊设计的频率调谐路径,实现了效率超50%的DKS产生(图6e)。类似的思路也成功运用于提升集成微腔电光梳的效率^[76],与DKS提升效率稍微不

同的是, 这里利用辅助微腔改变的是泵浦模式的耦合速率。此外, 文献 [82] 演示了双耦合腔泵浦功率回收法, 将主腔中未利用的泵浦光在回收腔中循环再泵浦, 理论效率可达 100%, 但该实验是基于光纤环腔, 尚未在集成平台中实现 (图 6f)。克尔暗孤子、微腔孤子晶体等克尔光梳具有更高的效率, 尽管相比 DKS 其可用梳齿数目相对更少, 但在集成微腔平台中的能量效率占优, 已成功演示作为集成光通信系统的光源^[83]。值得一提的是, 由于二阶非线性系数远高于三阶非线性效应, 二阶非线性光梳 (包括泡克尔斯孤子和腔增强的电光梳) 的效率比克尔光梳和微腔拉曼激光更高, 尤其是效率提升至 30% 的腔增强电光梳^[76]得到了学界的广泛关注。良好的微腔耦合设计对于提升集成相干光源的效率也十分重要。

需要说明的是, 脉冲泵浦^[78] (原理如图 6g 所示) 也是提升集成相干光源 (尤其是克尔光孤子) 效率的常见手段, 其高效率的原理可从时域上理解: 产生的孤子脉冲处于宽泵浦脉冲的基座上, 相比连续光泵浦, 泵浦光的能量更集中地供应给孤子。然而对全集成平台而言, 产生性能较好的脉冲源本身较为困难, 一般还需使用集成电光梳进行色散补偿和功率放大^[77], 系统设计更加复杂。

2.4 功率及平坦度

微腔集成相干光源的输出功率取决于泵浦功率和转换效率。集成相干光源发展过程中的重大突破是半导体泵浦激光源与非线性微腔的集成, 这一方面得益于高 Q 值的集成微腔的制备^[8]以及高非线性材料微腔 (如 AlGaAsOI) 的发展^[84]大大降低了非线性泵浦阈值 (低至毫瓦量级), 使得以 DFB 激光器为代表的半导体激光器成为了合适的泵浦源。DFB 激光器的输出功率在几十到百毫瓦量级, 考虑耦合损耗及光路散射损耗, 较佳情况下的实际入腔功率约数十毫瓦。克尔光频梳的转换效率通常约 1%, 其最大单梳齿功率 (非泵浦光) 一般在几十到百微瓦量级。对于效率更高的集成微腔拉曼激光和微腔二阶非线性光梳, 其单梳齿功率比克尔光梳稍高, 可达毫瓦量级。集成微腔电光梳的输出功率与片上插损密切相关, 以 LNOI 平台的集成微腔电光梳为例, 其总插损在 10 dB 左右, 总输出功率通常不超过 10 mW, 腔增强的集成电光梳单梳齿功率在百微瓦量级。值得注意的是, 腔增强的集成光梳优势在于更宽的输出谱宽 (即更多的梳齿), 这意味着单梳齿功率较低, 这显然不利于密

集片上波分复用。2022 年, 文献 [85] 的研究成功实现了片上 Si₃N₄ 波导掺铒放大器 (图 6h), 通过优化掺杂工艺和延长波导长度, 其小信号增益超 30 dB, 总输出功率达 145 mW, 可将单梳齿功率提高 100 倍以上, 极大地推动了集成片上相干光源迈向实际应用的步伐。半导体泵浦源、微腔和掺杂波导放大器的单片集成将是未来的全集成相干光源的重要发展趋势。

除光源的绝对功率外, 光谱平坦度也是重要的指标参数。如波分复用 (WDM) 光通信系统对光谱平坦度要求较高, 其理想光谱包络为矩形。基于集成波导的电光梳可实现较平坦的光梳, 基于该方案的光梳的数量目前最多的为 91 根^[77], 少于微腔增强的光梳数量 (几百根)。但由于二阶色散的存在, 微腔光频梳的光谱从中心向两边滚降, 导致功率较强的光梳数量实际也较少。色散调控可有效平坦微腔集成相干光源的光谱, 如在正常色散区产生克尔暗孤子^[86]、设计微腔结构 (如光子晶体微腔^[87], 见图 6i)、腔内光谱滤波^[88] (图 6j) 都可以产生较为平坦光谱的光梳。值得一提的是, 采用片上放大与均衡技术, 也可在一定谱宽范围内实现对微腔相干光源的光谱平坦化, 提升了微腔相干光源在大容量通信等应用场景的适用性。

3 通信应用

微腔集成相干光源经过十余年的发展, 在加工工艺水平、多器件集成、功耗降低等方面都有了显著的提升, 其发展目标是低功耗、全集成、CMOS 兼容的芯片级相干光源, 其在微波频率合成、精密光谱测量、激光测距、任意波形产生、光原子钟、天文探测、大容量光通信等领域有着极大的应用潜力。微腔集成相干光源可支持定制化设计, 即基于特定的需求在功率、谱宽、效率、噪声等参数选择性突出, 以满足不同应用场景的特定需求。

从目前技术进展和市场需求来看, 微腔集成相干光源最有可能率先在通信领域实现商用化, 应用场景包括基于 WDM 的大容量光传输以及面向数据中心计算集群的高速光互联, 这主要得益于微腔集成相干光源的两大固有优势: 并行多波长、窄线宽 (低相位噪声)。WDM 光通信/光互联的总容量等于信道数乘以单信道容量, 提升总容量的手段一是增加信道数 (波长数), 二是提升单信道的速率。现阶段光通信系统普遍使用集成可调谐激光器阵列 (ITLA) 作为多波长光源, 支持 C 波段和 L 波段

覆盖, 每个信道对应一个可调谐半导体激光器, 单频典型线宽为百 kHz 量级。但 ITLA 由于较大的封装体积和较高的成本, 并不是片上集成光互联系统光源的首选方案。

微腔集成相干光源不仅兼容片上光集成系统, 而且具备提升通信容量的天然优势。一方面, 微腔集成相干光源可提供数百个信道的光源, 单个微腔器件即可输出数百根频率梳齿, 其频率间隔可以通过对腔长的灵活设计, 较好匹配现有的 WDM 波长网格, 相比于 ITLA, 大大降低了器件体积和成本。另外, 以克尔光频梳为代表的微腔相干光源的光谱可完全覆盖 O 波段至 U 波段的全范围, 大大拓展了未来光通信的信道数量, 甚至二阶非线性光梳还可将光谱拓展至可见光波段, 为可见光通信的应用探索提供了潜在的光源方案。另一方面, 微腔集成相干光源支持继续扩大单信道容量, 其相位噪声更低, 单梳齿线宽低至 10 kHz 量级, 远低于现有 ITLA 线宽水平, 同等传输距离下支持更高阶的调制格式, 从而大幅度提升单信道速率, 其较窄的线宽还可有效降低系统为补偿链路噪声和信号恢复的能量消耗^[89]。值得一提的是, 微腔集成相干光源经锁定后其频率稳定性较好, 这意味着可通过在 WDM 传输系统中减小信号频带保护间隔, 获取更多的有效传输信道。此外, 微腔相干光源可作为相干光传输的本征振荡源, 相干传输系统发射机与接收机的克尔孤子可互相锁定频率和相位, 从而降低 DSP 功耗。

微腔集成相干光源用于高速光传输的实验最早

是由德国卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 和瑞典洛桑联邦理工学院 (EPFL) 的研究人员在 2014 年完成的^[90], 他们使用集成氮化硅微腔产生的低噪声态的克尔光频梳 (非 DKS) 实现了高达 1.44 Tbit/s 的数据通信, 传输距离超 300 km。2017 年, 该课题组通过改进技术方案, 采用两套交错的克尔孤子光梳 (系统架构见图 7a), 在跨越 C 波段和 L 波段的 179 个独立信道上实现了超过 50 Tbit/s 的数据流传输^[6], 进一步提升了传输速率。随后, 文献 [86] 的研究采用克尔暗孤子作为光源进行高速光传输 (系统架构见图 7b), 研究人员加载 64QAM 调制格式, 经过 80 km 光纤传输后, 信噪比仍高达 33 dB, 传输速率为 4.4 Tbit/s^[86]。2021 年, 文献 [91] 的研究基于 DKS 并采用超级信道技术, 实现了 80 km 传输距离下 12 Tbit/s 的相干光传输, 在另一个实验中, 传输距离增大到 2 100 km, 传输速率达 8 Tbit/s。2022 年, 文献 [92] 的研究刷新了微腔集成相干光源进行光通信的最高传输速率, 该研究使用微腔克尔暗孤子的 223 根梳齿, 在 7.9 km 长的 37 芯光纤中演示了速率高达 1.84 Pbit/s 的高速光传输^[92] (如图 7c 所示)。

除高速光传输/光互联之外, 微腔相干光源在通信领域的应用还包括无线通信。如文献 [4] 的研究使用高速探测器将微腔克尔孤子转换为 100 GHz 的毫米波 (微波) 信号, 相较于传统的光外差法产生毫米波的方法, 其在微波功率、线宽、集成度等关键参数上均占优 (如图 7d 所示), 可作为 5G 和未来 6G 通信领域的潜在波源方案。

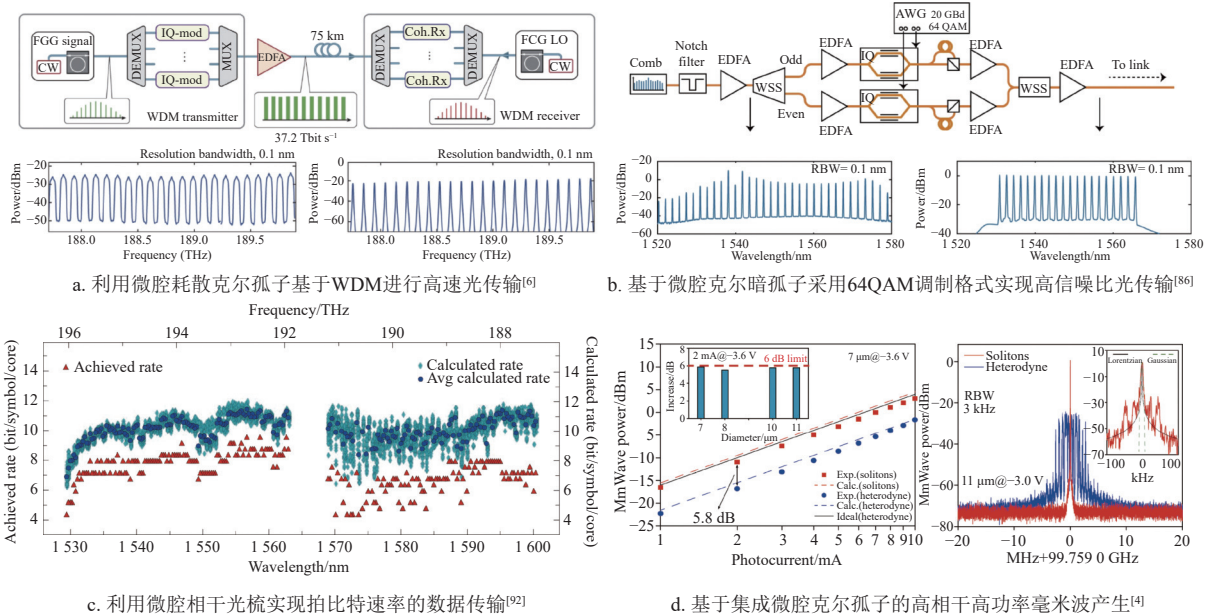


图 7 片上集成相干光梳的通信应用

值得注意的是,前文介绍的通信应用演示使用的实验装置并非严格意义上的集成光传输系统,这是因为除微腔之外,光源、放大器、调制器、探测器等光电器件还尚未实现芯片集成。2022年,文献[83]的研究使用AlGaAs微腔产生的克尔暗孤子,驱动集成了调制器和探测器的硅基片上光子芯片,成功演示了片上高速数据传输和可重构微波滤波,迈出了集成光传输芯片发展的重要一步。

4 未来展望

在微腔集成相干光源十余年发展过程中,学界的研究目标主要有4个。

1) 优化基于各材料平台的低损耗微腔制备工艺,包括高质量材料薄膜生长、半导体刻蚀工艺优化等,微腔集成相干光源目前已在硅、氧化硅、氮化硅、氮化铝、铌酸锂、碳化硅、金刚石、铝镓砷、磷化铟、氧化钽、钽酸锂等多种材料体系得到实验验证。

2) 研究并提出在微腔中实现相干锁定态的各类方法,如快速功率调制、快速扫频、反向扫频、辅助激光器、自注入锁定等,其中自注入锁定法将分布式反馈半导体激光器和微腔进行片上集成,可实现相干态“自启动”,且具有简单的结构和更小的空间尺寸,被认为是光集成芯片首选的光源锁定方案。

3) 设法提升微腔集成相干光源的关键性能参数,通过采取优化结构设计、减小器件内散射和器件间耦合损耗、施加伺服反馈等手段,降低微腔集成相干光源的功耗和插损、提高能量效率、扩展有效谱宽、降低频率噪声等。

4) 探索片上光源、微腔、调制器、放大器等多器件异质集成技术,优化芯片的带宽、功耗、可靠性等,推动集成光子芯片研发进程。

除前文详述的通信应用外,微腔集成相干光源同样有望在精密计量、光计算、光传感等方面实现商业级的规模化应用。如可借助尺寸小重量轻的优势,搭载卫星实现空间站级的天文光谱测量^[93]、大容量激光通信等;利用并行多光梳泵浦片上矩阵运算集群,使光计算的速率实现数量级的提升^[3];利用并行多波长实现空间复用测距,实现三维高速激光雷达成像^[1]等等。应当看到的是,微腔集成相干光源在迈向规模化商用的路途中仍面临一些挑战:一是受限于集成泵浦源功率、能量效率及微腔输出耦合率等,微腔集成相干光源的功率普遍较低,

尤其是面向利用单梳齿的应用场景(如光通信WDM信道光源、空间并行激光雷达测距光源等),芯片直出的单梳齿功率尚难以满足要求,现阶段通常采用后接光放大器的方法实现功率放大,但不符合光芯片小体积、低功耗、低成本的目标。片上掺杂波导放大器是潜在的解决方案,但目前仅在氮化硅平台得到验证^[85],且其制造工艺门槛相对较高。二是微腔集成相干光源运行状态受芯片温度、泵浦频率稳定性等因素影响,且外界环境(如温度变化、震动等)可能导致相干光源锁定状态切换,从而破坏其工作稳定性。尽管可以采用伺服控制等手段来补偿环境变化,但片上集成的伺服负反馈系统尚不成熟。此外微腔集成相干光源的性能参数与材料体系平台、光源技术方案、微腔参数设计、封装效果等密切相关,保持设计、制造和封装工艺的一致性成为批量化生产的前置条件。如何提升微腔集成相干光源的稳定性、一致性和抗干扰性以达到商用标准,成为了下一步发展亟须解决的关键问题。

目前,微腔集成相干光源研究正处于学术前沿到系统级演示的过渡期,借助新一轮光集成工艺的高速发展,国内外研究者正聚焦于前沿理论与技术、高质量半导体材料生长、大批量器件稳定刻蚀、光电集成技术、先进可靠封装等方面持续探索。

学术研究方面,国外科研机构从事微腔相干光源研究起步较早,前沿理论和技术储备较为丰富。如加州理工学院及瑞士洛桑联邦理工学院长期深耕微腔集成相干光源研发,主要基于硅基材料(氮化硅、氧化硅等)进行开拓性技术创新和应用开发;加州大学圣芭芭拉分校凭借深厚的硅基光电子研究基础,在硅基单片集成及多器件异质集成等方面处于国际领先水平;哈佛大学和耶鲁大学分别基于铌酸锂微腔、氮化铝微腔开展克尔光梳及二阶非线性光梳的新理论、新技术研究;美国国家标准与技术研究院致力于推动微腔集成相干光源在航空航天、时间基准等精密测量领域的应用等。国内科研院所持续紧跟国际发展趋势、加强高水平人才引进培养,持续开展核心技术攻关,目前已有十余家研究机构开展微腔集成相干光源相关工作。北京大学基于氧化硅、氮化硅、铝镓砷等平台长期开展微腔非线性理论与相关应用研究;中国科学技术大学致力于探索集成微腔光源在光量子领域的应用;清华大学、华中科技大学相关团队开展基于氮化铝、氮化

镓等 III-V 族半导体材料的微腔集成光源研发等；电子科技大学研究团队结合微腔光梳和二维材料探索其在 WDM 通信及高灵敏度传感方面的应用。除此之外，南京大学、上海大学、浙江大学、中山大学、哈尔滨工业大学等高校及上海光机所、上海微系统所、西安光机所、深圳国际量子研究院等研究机构基于各类材料平台的微腔进行前沿理论和技术研究，部分成果实现国际领先。

集成工艺方面，国外一流课题组主要依托自有微纳加工平台进行流片，其硅基、铌酸锂、III-V 族等材料的生长和刻蚀工艺处于国际领先水平。国内研究机构近年来通过自主研发和国际合作等方式，逐步积累了高质量薄膜生长和低损耗微腔器件制备工艺，整体水平与国际一流水平差距逐渐缩小，甚至在某些领域（如薄膜铌酸锂制备、硫化物微腔制备等）实现全球领先。值得一提的是，类似于集成半导体产业的 Foundry 模式，已有专门的光子集成芯片定制公司开始提供特定材料平台（主要是氮化硅）的微腔等器件流片代工，如瑞士的 Ligentec 和国内的杭州芯傲等，可根据具体应用场景进行定制化参数设计及批量化封装，其微腔 Q 值接近国际顶尖课题组实验室工艺水平，为各行业用户采用批量化生产的微腔相干光源进行系统级集成光芯片研发提供了便利。

展望未来，随着半导体物理、光电子学、材料科学等理论不断丰富，光电融合趋势进一步加速，异质集成技术突破良率和产量瓶颈，微腔集成相干光源有望成为光电集成芯片最具竞争力的光源方案，为精密测量、数据传输、光子计算、新型传感等应用带来颠覆性的技术革命。

5 结束语

本文详细介绍克尔光频梳、微腔受激拉曼激光、二阶非线性光梳、微腔增强电光梳 4 类微腔集成相干光源，阐述其关键性能指标，着重介绍微腔集成相干光源的通信应用，并对其未来发展进行了展望。经过多年的器件研发和系统级原型演示，微腔集成相干光源在加工工艺水平、多器件集成、能量效率提升等方面都有了显著提升，其部分指标参数甚至可与商用仪器相媲美，目前已逐步迈入应用开发阶段，有望推动精密计量、光计算、光传感、数据传输等领域技术变革。微腔集成相干光源面临的主要挑战是如何进一步提升输出功率、能量效率以及噪声性能等关键指标，以及攻克光子集成芯片

中多器件集成等复杂工艺，这是其走向大规模商用的必经之路。

参考文献

- [1] RIEMENSBERGER J, LUKASHCHUK A, KARPOV M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb[J]. *Nature*, 2020, 581(7807): 164-170.
- [2] XU X Y, TAN M X, CORCORAN B, et al. 11 TOPS photonic convolutional accelerator for optical neural networks[J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 44-51.
- [3] FELDMANN J, YOUNGBLOOD N, KARPOV M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core[J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 52-58.
- [4] WANG B C, MORGAN J S, SUN K Y, et al. Towards high-power, high-coherence, integrated photonic mmWave platform with microcavity solitons[J]. *Light, Science & Applications*, 2021, 10(1): 4.
- [5] CORCORAN B, TAN M X, XU X Y, et al. Ultra-dense optical data transmission over standard fibre with a single chip source[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2568.
- [6] MARIN-PALOMO P, KEMAL J N, KARPOV M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications[J]. *Nature*, 2017, 546(7657): 274-279.
- [7] CARLSON D R, HICKSTEIN D D, LIND A, et al. Photonic-chip supercontinuum with tailored spectra for counting optical frequencies[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(1): 014027.
- [8] JIN W, YANG Q F, CHANG L, et al. Hertz-linewidth semiconductor lasers using CMOS-ready ultra-high-Q microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 346-353.
- [9] CAI M, PAINTER O, VAHALA K J. Observation of critical coupling in a fiber taper to a silica-microsphere whispering-gallery mode system[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(1): 74-77.
- [10] LEE H, CHEN T, LI J, et al. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 369-373.
- [11] ARMANI D K, KIPPENBERG T J, SPILLANE S M, et al. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip[J]. *Nature*, 2003, 421: 925-928.
- [12] ILCHENKO V S, GORODETSKY M L, YAO X S, et al. Microtorus: A high-finesse microcavity with whispering-gallery modes[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(5): 256-258.
- [13] DEL'HAYE P, DIDDAMS S A, PAPP S B. Laser-machined ultra-high-Q microrod resonators for nonlinear optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(22): 221119.
- [14] 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.
- [15] DEL'HAYE P, SCHLIESSER A, ARCIZET O, et al. Optical frequency comb generation from a monolithic

- microresonator[J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [16] LI J, LEE H, CHEN T, et al. Low-pump-power, low-phase-noise, and microwave to millimeter-wave repetition rate operation in microcombs[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(23): 233901.
- [17] DEL'HAYE P, BEHA K, PAPP S B, et al. Self-injection locking and phase-locked states in microresonator-based optical frequency combs[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(4): 043905.
- [18] YU M J, OKAWACHI Y, GRIFFITH A G, et al. Mode-locked mid-infrared frequency combs in a silicon microresonator[J]. *Optica*, 2016, 3(8): 854-860.
- [19] KIPPENBERG T J, GAETA A L, LIPSON M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators[J]. *Science*, 2018, 361(6402): eaan8083.
- [20] HERR T, BRASCH V, JOST J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 145-152.
- [21] BRASCH V, GEISELMANN M, HERR T, et al. Photonic chip-based optical frequency comb using soliton Cherenkov radiation[J]. *Science*, 2016, 351(6271): 357-360.
- [22] PFEIFFER M H P, HERKOMMER C, LIU J Q, et al. Octave-spanning dissipative Kerr soliton frequency combs in Si_3N_4 microresonators[J]. *Optica*, 2017, 4(7): 684.
- [23] XUE X X, XUAN Y, LIU Y, et al. Mode-locked dark pulse Kerr combs in normal-dispersion microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 594-600.
- [24] YANG Q F, YI X, YANG K Y, et al. Stokes solitons in optical microcavities[J]. *Nature Physics*, 2017, 13: 53-57.
- [25] COLE D C, LAMB E S, DEL'HAYE P, et al. Soliton crystals in Kerr resonators[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11: 671-676.
- [26] LU Z Z, CHEN H J, WANG W Q, et al. Synthesized soliton crystals[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3179.
- [27] BAO H L, COOPER A, ROWLEY M, et al. Laser cavity-soliton microcombs[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 384-389.
- [28] LIU J Q, 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.
- [29] YI X, YANG Q F, YANG K Y, et al. Soliton frequency comb at microwave rates in a high-Q silica microresonator[J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1078-1085.
- [30] SUH M G, VAHALA K. Gigahertz-repetition-rate soliton microcombs[J]. *Optica*, 2018, 5(1): 65-66.
- [31] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. *Science*, 2020, 369(6501): eaay3676.
- [32] 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): 374.
- [33] WENG W L, LUCAS E, LIHACHEV G, et al. Spectral purification of microwave signals with disciplined dissipative kerr solitons[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(1): 013902.
- [34] YAO L, LIU P, CHEN H J, et al. Soliton microwave oscillators using oversized billion Q optical microresonators[J]. *Optica*, 2022, 9(5): 561-564.
- [35] 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): 063902.
- [36] CARMON T, YANG L, VAHALA K. Dynamical thermal behavior and thermal self-stability of microcavities[J]. *Optics Express*, 2004, 12(20): 4742-4750.
- [37] BRASCH V, GEISELMANN M, PFEIFFER M H P, et al. Bringing short-lived dissipative Kerr soliton states in microresonators into a steady state[J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 29312-29320.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] BRILES T C, YU S P, DRAKE T E, et al. Generating octave-bandwidth soliton frequency combs with compact low-power semiconductor lasers[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1): 014006.
- [41] ZHANG S Y, 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.
- [42] ZHOU H, GENG Y, CUI W W, et al. Soliton bursts and deterministic dissipative Kerr soliton generation in auxiliary-assisted microcavities[J]. *Light, Science & Applications*, 2019, 8: 50.
- [43] 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: 694-698.
- [44] SHEN B Q, CHANG L, LIU J Q, et al. Integrated turnkey soliton microcombs[J]. *Nature*, 2020, 582(7812): 365-369.
- [45] XIANG C, LIU J Q, GUO J, et al. Laser soliton microcombs heterogeneously integrated on silicon[J]. *Science*, 2021, 373(6550): 99-103.
- [46] LIN H B, CAMPILLO A J. Microcavity enhanced Raman gain[J]. *Optics Communications*, 1997, 133(1/2/3/4/5/6): 287-292.
- [47] WU Y, YANG X, LEUNG P T. Theory of microcavity-enhanced Raman gain[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(5): 345-347.
- [48] SPILLANE S M, KIPPENBERG T J, VAHALA K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical

- dielectric microcavity[J]. *Nature*, 2002, 415(6872): 621-623.
- [49] RONG H S, XU S B, KUO Y H, et al. Low-threshold continuous-wave Raman silicon laser[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 232-237.
- [50] LATAWIEK P, VENKATARAMAN V, BUREK M J, et al. On-chip diamond Raman laser[J]. *Optica*, 2015, 2(11): 924-928.
- [51] LIU X W, SUN C Z, XIONG B, et al. Integrated continuous-wave aluminum nitride Raman laser[J]. *Optica*, 2017, 4(8): 893-896.
- [52] YU M J, OKAWACHI Y, CHENG R, et al. Raman lasing and soliton mode-locking in lithium niobate microresonators[J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9: 9.
- [53] LU T, YANG L, CARMON T, et al. A narrow-linewidth on-chip toroid Raman laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(3): 320-326.
- [54] LIU K W, YAO S Y, DING Y L, et al. Fundamental linewidth of an AlN microcavity Raman laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4295-4298.
- [55] WENG H Z, LIU J, AFRIDI A 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.
- [56] GRIFFITH A G, YU M J, OKAWACHI Y, et al. Coherent mid-infrared frequency combs in silicon-microresonators in the presence of Raman effects[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13044-13050.
- [57] YAO S Y, BAO C Y, WANG P, et al. Generation of stable and breathing flat-top solitons via Raman assisted four wave mixing in microresonators[J]. *Physical Review A*, 2020, 101(2): 023833.
- [58] DIDDAMS S A, MA L S, YE J, et al. Broadband optical frequency comb generation with a phase-modulated parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(23): 1747-1749.
- [59] MOSCA S, PARISI M, RICCIARDI I, et al. Modulation instability induced frequency comb generation in a continuously pumped optical parametric oscillator[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(9): 093903.
- [60] HANSSON T, PARRA-RIVAS P, BERNARD M, et al. Quadratic soliton combs in doubly resonant second-harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6033-6036.
- [61] VILLOIS A, KONDRATIEV N, BREUNIG I, et al. Frequency combs in a microring optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4443-4446.
- [62] IKUTA R, ASANO M, TANI R, et al. Frequency comb generation in a quadratic nonlinear waveguide resonator[J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15551-15558.
- [63] HENDRY I, TRAINOR L S, XU Y Q, et al. Experimental observation of internally pumped parametric oscillation and quadratic comb generation in a $\chi^{(2)}$ whispering-gallery-mode microresonator[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1204-1207.
- [64] SZABADOS J, PUZYREV D N, MINET Y, et al. Frequency comb generation via cascaded second-order nonlinearities in microresonators[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(20): 203902.
- [65] BRUCH A W, LIU X W, GONG Z, et al. Pockels soliton microcomb[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(1): 21-27.
- [66] ROY A, NEHRA R, JAHANI S, et al. Temporal walk-off induced dissipative quadratic solitons[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 162-168.
- [67] BAO C Y, YUAN Z Q, WANG H M, et al. Interleaved difference-frequency generation for microcomb spectral densification in the mid-infrared[J]. *Optica*, 2020, 7(4): 309-315.
- [68] HE Y, YANG Q F, LING J W, et al. Self-starting bi-chromatic LiNbO₃ soliton microcomb[J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1138-1144.
- [69] KOBAYASHI T, SUETA T, CHO Y, et al. High-repetition-rate optical pulse generator using a Fabry-Perot electro-optic modulator[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(8): 341-343.
- [70] METCALF A J, TORRES-COMPANY V, LEAIRD D E, et al. High-power broadly tunable electrooptic frequency comb generator[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(6): 231-236.
- [71] ZHANG T, YIN K, ZHANG C X, et al. Integrated electro-optic frequency combs: Theory and current progress[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(6): 2301363.
- [72] SOREF R, BENNETT B. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 123-129.
- [73] DEMIRTZIOGLOU I, LACAVA C, BOTTRILL K R H, et al. Frequency comb generation in a silicon ring resonator modulator[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 790-796.
- [74] TOUGH E J, FICE M J, CARPINTERO G, et al. InP integrated optical frequency comb generator using an amplified recirculating loop[J]. *Optics Express*, 2022, 30(24): 43195-43208.
- [75] ZHANG M, BUSCAINO B, WANG C, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 373-377.
- [76] HU Y W, YU M J, BUSCAINO B, et al. High-efficiency and broadband on-chip electro-optic frequency comb generators[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 679-685.
- [77] YU M J, BARTON III D, CHENG R, et al. Integrated femtosecond pulse generator on thin-film lithium niobate[J]. *Nature*, 2022, 612(7939): 252-258.
- [78] OBRZUD E, LECOMTE S, HERR T. Temporal solitons in microresonators driven by optical pulses[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11: 600-607.
- [79] ZHUANG R J, NI K, WU G H, et al. Electro-optic

- frequency combs: Theory, characteristics, and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(6): 2200353.
- [80] YANG Q F, JI Q X, WU L, et al. Dispersive-wave induced noise limits in miniature soliton microwave sources[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1442.
- [81] HELGASON Ó B, GIRARDI M, YE Z C, et al. Surpassing the nonlinear conversion efficiency of soliton microcombs[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(11): 992-999.
- [82] XUE X X, ZHENG X P, ZHOU B K. Super-efficient temporal solitons in mutually coupled optical cavities[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 616-622.
- [83] SHU H W, CHANG L, TAO Y S, et al. Microcomb-driven silicon photonic systems[J]. *Nature*, 2022, 605(7910): 457-463.
- [84] CHANG L, XIE W Q, SHU H W, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1331.
- [85] LIU Y, QIU Z R, JI X R, et al. A photonic integrated circuit-based erbium-doped amplifier[J]. *Science*, 2022, 376(6599): 1309-1313.
- [86] FÜLÖP A, MAZUR M, LORENCES-RIESGO A, et al. High-order coherent communications using mode-locked dark-pulse Kerr combs from microresonators[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1598.
- [87] LUCAS E, YU S P, BRILES T C, et al. Tailoring microcombs with inverse-designed, meta-dispersion microresonators[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17: 943-950.
- [88] XUE X X, GRELU P, YANG B F, et al. Dispersion-less Kerr solitons in spectrally confined optical cavities[J]. *Light, Science & Applications*, 2023, 12(1): 19.
- [89] 肖滢兰, 杨艳平, 杨郑宇潇, 等. 片上集成克尔光频梳的波分复用光纤通信技术综述(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(5): 71-78.
- XIAO Y L, YANG Y P, YANG Z Y X, et al. Chip-scale Kerr optical frequency comb for wavelength-division multiplexing optical fiber communications (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 71-78.
- [90] PFEIFLE J, BRASCH V, LAUERMANN M, et al. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 375-380.
- [91] MAZUR M, SUH M G, FÜLÖP A, et al. High spectral efficiency coherent superchannel transmission with soliton microcombs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4367-4373.
- [92] JØRGENSEN A A, KONG D, HENRIKSEN M R, et al. Petabit-per-second data transmission using a chip-scale microcomb ring resonator source[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16: 798-802.
- [93] OBRZUD E, RAINER M, HARUTYUNYAN A, et al. A microphotonic astrocomb[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 31-35.

编辑 张莉