

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.01.03

电光频率梳原理及其应用研究

陈彩欣^{1#}, 李思萱^{1#}, 闫明^{1,2*}, 曾和平^{1,2*}

(1. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;

2. 华东师范大学重庆研究院 精密光学重庆市重点实验室, 重庆 401147)

摘要: 介绍了光梳的基本原理与分类, 阐述了电光频率梳的产生机制及典型结构, 系统梳理了基于薄膜铌酸锂、氮化硅等材料平台的电光频率梳实现方式与性能特点, 涵盖马赫-曾德尔调制器、相位调制器以及微环谐振腔等方案。论述了电光频率梳的谱段扩展方法, 总结了电光频率梳在光谱学、精密测距、光通信等领域的应用情况。展望未来电光频率梳技术的发展方向, 指出可通过跨学科的技术融合与协同设计, 进一步降低电光频率梳系统的控制复杂度、噪声敏感性、热漂移, 提升系统的精度、抗环境干扰能力、稳频性能, 推动电光频率梳在精密测距与相干通信等领域向实用化方向发展。

关键词: 电光调制; 电光频率梳; 谱段扩展; 光谱学; 精密测距; 光通信; 技术融合; 协同设计

中图分类号: TB9; O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2026) 01-0033-22

Electro-optic frequency combs: theory and applications

CHEN Caixin^{1#}, LI Sixuan^{1#}, YAN Ming^{1,2*}, ZENG Heping^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Precision Optics, Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401147, China)

Abstract: This paper introduces the fundamental principles and classifications of optical frequency combs, reviews the generation mechanisms and representative architectures of electro-optic frequency combs (EOFCs), and systematically summarizes implementation approaches and performance characteristics of EOFCs on emerging material platforms, including thin-film lithium niobate (TFLN) and silicon nitride (SiN), covering schemes based on Mach-Zehnder modulators, phase modulators and micro-resonator modulator. Methods for spectral extension of EOFCs are discussed, followed by an overview of EOFC applications in spectroscopy, precision ranging, and optical communications. Finally, future development directions are outlined, emphasizing that interdisciplinary integration and co-design can further reduce control complexity, noise sensitivity, and thermal drift, while improving accuracy, environmental robustness, and frequency-stabilization performance, thereby accelerating the practical deployment of EOFCs in precision ranging and coherent communications.

Key words: electro-optic modulation; electro-optic frequency comb; spectral extension; spectroscopy; precision ranging; optical communication; technology integration; co-design

收稿日期: 2025-11-18; 修回日期: 2026-01-18

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项项目(CSTB2022TIAD-DEX0031)

引用格式: 陈彩欣, 李思萱, 闫明, 等. 电光频率梳原理及其应用研究[J]. 计测技术, 2026, 46(1): 33-54.

Citation: CHEN C X, LI S X, YAN M, et al. Electro-optic frequency combs: theory and applications[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(1):33-54.



0 引言

在精密测量科学领域,实现微波频率与光学频率之间的相干链接,是发展高精度频率计量技术的关键^[1]。早期,研究人员采用频率链技术,通过电学倍频方式将微波参考信号传递至光频,以实现光学频率的测量^[2-3]。然而,该方案存在系统复杂、成本高昂、灵活性低等问题,严重限制了实际应用。直至光学频率梳(简称“光梳”)的出现,这一瓶颈才得以突破^[4]。

光梳在时域上对应一系列等时间间隔的光脉冲序列,经傅里叶变换,在频域上表现为一组高度稳定、相位相干且等间距分布的频率谱线梳齿,相邻梳齿之间的频率间隔严格等于脉冲的重复频率。光梳的频率结构由脉冲重复频率决定,同时受到激光腔内群速与相速不匹配所产生的相位差影响。因此光梳可作为连接光学频率与微波频率的桥梁^[5],为绝对光学频率测量提供一种革命性的工具。光梳在精密测量领域具有重要研究价值,该领域的两位突破性贡献者HALL J L和HÄNSCH T W获得了2005年诺贝尔物理学奖^[6-7]。作为超精密的光学频率标尺,光梳的应用已远超频率计量范畴,目前广泛应用于光谱学^[8-9]、天文光谱仪校准^[10-11]、精密测距^[12-14]、光通信^[15-17]以及任意波形发生^[18]等重要领域。

为满足不同应用场景对光源参数的差异化需求,目前光梳的产生方式主要分为锁模激光器、微环谐振腔(克尔光频梳)和电光学调制器3种^[19]。其中,锁模激光器是最早被用于产生光梳的技术,由HARGROVE L E等人于1964年首次在氦氖锁模激光器中实现^[20]。早期锁模激光器主要基于固体激光介质实现,虽能产生高功率、超短脉冲的稳定输出,且噪声性能优异,但存在系统结构复杂、体积庞大、对环境及温度敏感等局限,制约了其在实验室外的广泛应用。随着光纤技术的不断发展,依托于光纤结构的全光纤化锁模激光器逐步发展成熟,其具有良好的空间灵活性、优异的散热特性、高泵浦效率以及易于系统集成的优势,显著提升了光梳系统的实用性。然而,锁模激光器的输出光谱特性受限于增益介质的荧光光谱范

围,制约了其在特定波段的应用。

微腔光频梳是近年来快速发展的一种新型光频梳技术,通过连续激光泵浦高品质因子(Q)微腔,基于腔内四波混频等非线性克尔效应可产生等间隔梳齿频谱。通过对泵浦激光进行频率调谐,使腔内色散与非线性、增益与损耗达到平衡,可形成稳定的克尔孤子态^[21-22]。微腔光频梳无需外部展宽即可实现倍频程光谱^[23],同时具备芯片级集成潜力与低功耗特性,为发展片上集成光子器件提供了重要支撑^[24],但其产生机制较为复杂^[25-26],通常需精细频率调谐^[27],且稳定性易受热光学效应影响。

电光频率梳的产生原理为:基于电光调制效应,通过微波调制信号驱动铌酸锂(LiNbO_3)等电光材料实现对连续激光的相位或强度调制,从而产生频谱等间隔分布的梳状边带。电光频率梳的重复频率可通过电调谐方式连续调节,同时具备梳齿功率高和光谱可灵活重构的优点,且易于实现芯片级集成。电光频率梳在发展初期存在带宽有限、稳定性不足和相位噪声较高等问题,近年来借助新材料平台和新型器件结构已得到显著改善^[28]。基于薄膜铌酸锂(TFLN)的集成电光频率梳器件能够有效降低驱动电压并扩展调制带宽^[29],通过双微环谐振腔级联与谐振增强型调制结构,可进一步提高非线性转换效率和光谱覆盖范围^[30],为集成光子学应用提供了新的可能性。图1展示了电光频率梳的发展脉络,其中,MZM(Mach-Zehnder Modulator)为马赫-曾德尔调制器,DDMZM(Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator)为双驱动马赫-曾德尔调制器,DPMZM(Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator)为双平行马赫-曾德尔调制器,PM(Phase Modulator)为相位调制器,MRM(Micro-Resonator Modulator)为微谐振腔调制器,WGM(Whispering-Gallery Mode)为回音壁模式,OSCAT(Optical Sampling by Cavity Tuning)为通过腔长调谐实现的光学采样。

本文介绍电光频率梳的产生机制与典型结构,讨论基于不同材料平台的电光频率梳实现方式和性能特点,总结电光频率梳技术在光谱学、测距及光通信等领域的应用进展,对电光频率梳领域未来的研究趋势进行分析与展望,为相关领域的科研人员提供借鉴。

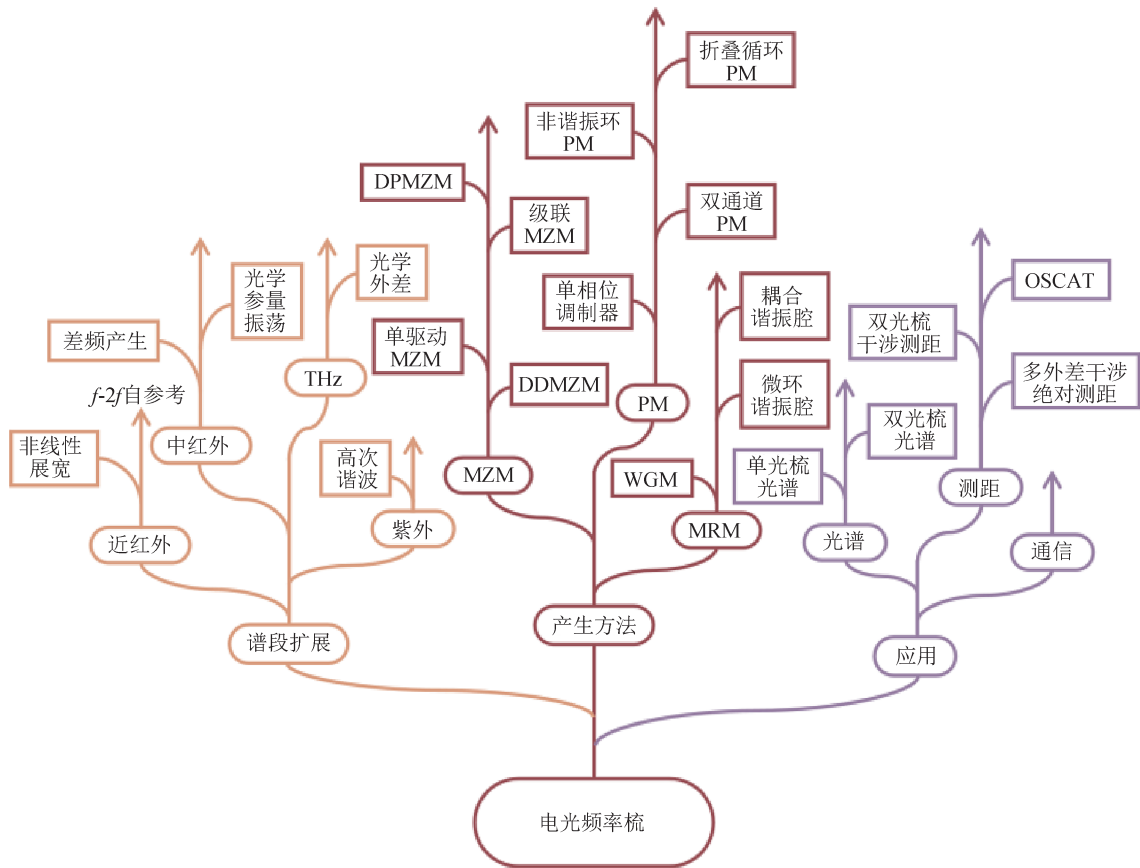


图1 电光频率梳的发展脉络

Fig1 Development venation of electro-optic frequency combs

1 电光频率梳理论

1.1 电光频率梳基本原理

1.1.1 光学频率梳基本原理

光学频率梳在时域上表现为一系列间隔为 τ 的超短脉冲。由于介质的群速度色散，脉冲的群速度和相速度不同，脉冲传播过程中，其载波和包络会随时间积累产生一定相位差，称为载波包络偏移相位 φ_{ceo} 。光频梳的时域表示如图2(a)所示。

光频梳的频域表示如图2(b)所示。在频域上，光频梳是一系列等间隔的相干光谱线，相邻谱线间隔为 f_{rep} ，即光频梳的重复频率。 φ_{ceo} 的存在引入了载波包络偏移频率 f_{ceo} 。重复频率在时域上对应 τ 的倒数；载波包络偏移频率在时域中对应相邻脉冲的载波包络偏移相位。 f_{ceo} 计算公式为

$$f_{ceo} = \frac{\varphi_{ceo} f_{rep}}{2\pi} \quad (1)$$

由此，第 n 条光频梳的频域梳齿可以表示为

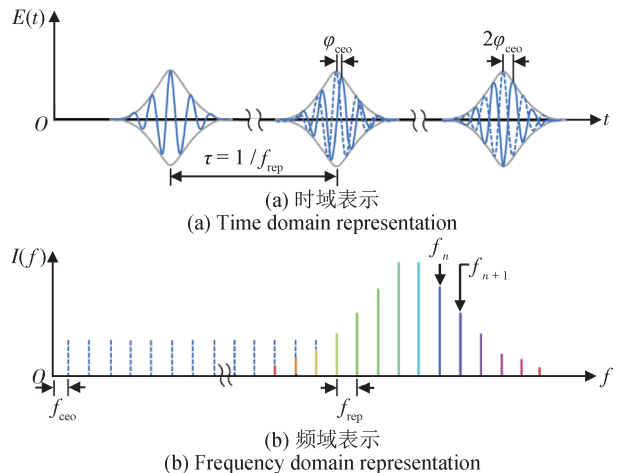


图2 光频梳的时域与频域表示

Fig.2 Time domain and frequency domain representations of optical frequency comb

$$f_n = f_{ceo} \pm n f_{rep} \quad (2)$$

当 f_{ceo} 与 f_{rep} 均参考于射频标准源时，可实现在宽光谱条件下输出绝对频率梳齿的光频梳。2000年，RANKA J K 等人通过光子晶体光纤中的非线性

性效应，成功将锁模激光器的光谱展宽至一个倍频程，该方案成为自参考($f-2f$)光频梳锁定技术发展中的重要里程碑^[31]。若将低频段梳齿频率表示为 $f_n = f_{\text{ceo}} \pm nf_{\text{rep}}$ ，则对该梳齿进行倍频后可得 $2f_n = 2f_{\text{ceo}} \pm 2nf_{\text{rep}}$ 。当光谱覆盖一个倍频程，倍频光会与高频段梳齿(第 $2n$ 条) $f_{2n} = f_{\text{ceo}} \pm 2nf_{\text{rep}}$ 拍频，产生拍频信号 $f_{\text{beat}} = 2f_n - f_{2n} = f_{\text{ceo}}$ 。借助该拍频信号，可提取并调控 f_{ceo} 。基于这一方法，光频梳的 f_{ceo} 和 f_{rep} 能够同时被锁定至射频参考源，从而在光学频率与射频之间建立起双向相干链接，实现频率基准在两者间的相互传递。

1.1.2 电光频率梳产生原理

电光频率梳基于电光调制产生。目前电光调制器主要基于电光效应、等离子体色散效应及电吸收效应实现，其中基于电光效应的电光调制器常用于产生电光频率梳。电光效应是通过对晶体等材料施加静电场来改变其折射率的现象。电光效应引起材料折射率 n_r 随静电场的变化关系可表示为

$$n_r = n_0 + AE + BE^2 + \dots \quad (3)$$

式中： n_0 为无外加静电场的材料折射率， E 为外加静电场， A 和 B 为常数。材料折射率的改变会影响在材料内部传播的电磁场的相位。电光效应可视为电磁场与静电场之间相互作用的波混合现象，其响应时间可短至飞秒量级。

电光效应包括线性电光效应(普克尔斯效应)和非线性电光效应(二次和高阶电光效应)。当外加静电场强度较弱时，电光效应以普克尔斯效应和克尔效应(二次电光效应)为主。作为二阶非线性效应，线性电光效应通常在非中心对称晶体材料中发生^[32]，此时 $B = 0$ ，晶体材料折射率随电场强度线性变化；作为三阶非线性效应，二次电光效应可以出现在任意晶体材料中，此时 $A = 0$ ，晶体材料折射率与电场强度的平方成正比，即克尔效应^[33]。三阶非线性效应显著弱于二阶非线性效应，所以在研究晶体材料的电光效应时，通常忽略克尔效应，只讨论普克尔斯效应。

在各向异性介质中，光线的传播方向可分解为两个相互垂直的分量：一个平行于光轴，另一个垂直于光轴，这两个分量分别影响光在介质中

的传播速度及其振动方向。依据电磁理论，若以介质中平行于晶体光轴的方向为 x 轴，并在垂直于 x 轴的平面内建立 y 轴，则不同方向的折射率与光的传播方向之间的关系可通过折射率椭球方程表示，其一般形式为

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1 \quad (4)$$

式中： n_1 、 n_2 、 n_3 分别为晶体在三个互相正交的主轴 x 、 y 、 z 方向上的主折射率。

对晶体施加静电场后，有

$$\frac{x^2}{n_{11}^2} + \frac{y^2}{n_{22}^2} + \frac{z^2}{n_{33}^2} + \frac{2yz}{n_{23}^2} + \frac{2xz}{n_{13}^2} + \frac{2xy}{n_{12}^2} = 1 \quad (5)$$

式中： n_{11} 、 n_{22} 和 n_{33} 为电场作用后的有效主折射率， n_{23} 、 n_{13} 和 n_{12} 为电光效应引入的折射率耦合项。在外加电场的作用下，折射率主轴与晶体光轴不再保持重合，而是发生了相对偏移。

根据输出光信号因折射率变化而产生的相位、偏振态及振幅的改变，可将电光调制划分为相位调制、偏振调制和强度调制三种类型。

如图3所示，在PM中，起偏器的偏振方向与电光晶体的 x 轴保持一致，进入电光晶体的光线严格沿晶体主轴方向传播。

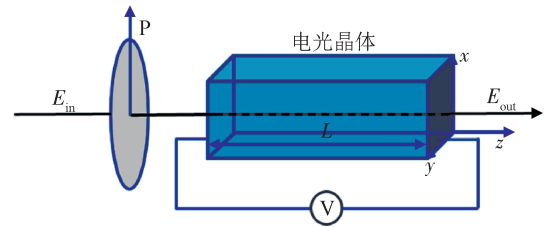


图3 相位调制原理图

Fig.3 Schematic diagram of phase modulation

入射至电光晶体表面的光场 $E_{\text{in}}(t)$ 为

$$E_{\text{in}}(t) = E_0 \exp(i\omega_0 t) \quad (6)$$

式中： E_0 为入射光场的电场强度幅值， i 为虚数符号， t 为时间， ω_0 为入射光场角频率。

施加的外部电场 $V(t)$ 为

$$V(t) = V_0 \cos(\omega_m t) \quad (7)$$

式中： V_0 为外部电场的强度幅值， ω_m 为外部电场角频率。

经过PM处理后输出的光信号 $E_{\text{out}}(t)$ 为

$$E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) \exp(i\phi) \\ = E_{\text{in}}(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{\pi V_0}{V_{\pi}} \right) \exp(in\omega_m t) \quad (8)$$

式中： ϕ 为对光场施加的相位偏移， J_n 为第一类贝塞尔函数， V_{π} 为半波电压。经相位调制的输出光，其频谱中既包含载波信号，也包含无数个呈对称分布的边带分量。由于入射光沿晶体原始主轴传播，输出光的偏振态不变。

偏振调制器基于PM结构，通过使起偏器与晶体原始主轴形成一定夹角实现偏振调制功能。入射光的 x 分量和 y 分量经偏振调制，产生相位差 $\Delta\varphi = \Delta n 2\pi L / \lambda$ (其中， L 为晶体长度， λ 为入射光波长)，从而生成可调偏振光，偏振调制器可以提供任意相位差。特别地，当夹角为 $\pi/4$ 且 $\Delta n \cdot L = \lambda/2$ 时，其效果相当于半波片。

与PM相比，强度调制器(Intensity Modulator, IM)在输出端额外引入了四分之一波片和检偏器(见图4)，以实现光信号透射率的调控。起偏器的偏振方向与晶体原始光轴一致，检偏器的偏振方向则与原始光轴垂直。晶体的感应轴为 x' 和 y' ，与光轴夹角为 α 。

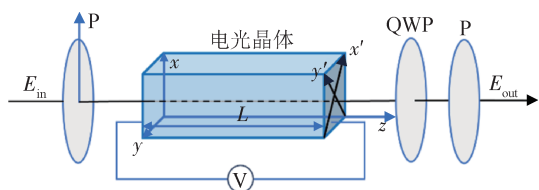


图4 强度调制原理图

Fig.4 Schematic diagram of intensity modulation

入射光在感应轴 x' 和 y' 上的分量可分别表示为

$$E_{x'} = E_0 \cos \alpha \\ E_{y'} = E_0 \sin \alpha \quad (9)$$

经过电光晶体后， x' 和 y' 轴分量由普克尔斯效应引入的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{(n_{x'} - n_{y'}) 2\pi L}{\lambda} = \frac{2\pi n_o^3 r V}{\lambda} \quad (10)$$

式中： $n_{x'}$ 、 $n_{y'}$ 分别为晶体在 x' 、 y' 轴的折射率， n_o 为o光在晶体中的折射率， r 为电光系数， V 为施加的外部电压。

当 $\alpha = \pi/4$ 时，检偏器偏振方向上的分量 E_1 、

E_2 分别为

$$E_1 = E_{x'} \sin \alpha = E_0 \cos \alpha \sin \alpha \\ E_2 = E_{y'} \cos \alpha = E_0 \sin \alpha \cos \alpha \quad (11)$$

输出光的光强为 E ，有

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos \left(\pi + \frac{\pi}{2} + \Delta\varphi \right) \\ = \frac{E_0^2 [1 + \cos(\pi + \pi/2 + \Delta\varphi)]}{2} \quad (12) \\ = E_0^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\Delta\varphi}{2} \right)$$

IM的透射率 T 为

$$T = \frac{E^2}{E_0^2} = \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi V}{4V_{\pi}} \right) \quad (13)$$

式中： V 为电压， $V = V_0 + V_m \sin(\omega t)$ ， V_0 为直流偏置电压， $V_m \sin(\omega t)$ 为交流驱动电压。

当 $V = V_{\pi}$ 时，透射率最大为1，将 V_{π} 设为半波电压。改变施加电压的值，可实现不同程度的强度调制。

综上所述，电光频率梳的产生基于线性及二次电光效应，通过调制连续波光场实现等间隔的频率边带结构。需要指出的是，在传统锁模激光器中，由于脉冲内部群速度与相速度不匹配，相邻脉冲之间会积累固定的载波包络相位差，从而在频域形成额外的 f_{ceo} 。

相比之下，电光频率梳完全依赖连续波光场与单频调制信号之间的频率转换过程，因此，其频率成分由泵浦光频率和调制频率共同决定，即

$$f_n = f_p \pm n f_m \quad (14)$$

式中： f_p 为泵浦光频率， f_m 为调制信号频率。

值得注意的是，近年来还出现了针对电光频率梳开展 f_{ceo} 测量与稳定的研究探索。例如，TRASK LR等人将超稳Fabry-Perot腔同时作为光学与射频参考，对连续波光源与光电振荡器进行频率稳定测试，在此基础上利用非线性放大环境改善脉冲对比度，并通过全光纤压缩链路获得适用于 $f-2f$ 自参考的超短脉冲，最终探测了稳定的信号(约180 MHz)^[34]。该结果表明：在引入非线性展宽与光-微波联合锁定机制后，电光频率梳仍可扩展出与锁模体系相当的 f_{ceo} 自参考能力。

基于此，本文旨在讨论调制型电光频率梳的基本产生机制及其在标准结构下的频率特性，故

仅采用式(14)描述其频率分布，而不将 f_{ceo} 作为独立自由度展开分析。

1.2 电光频率梳的产生方法及进展

利用电信号驱动上述几类电光调制器，即可在单频光两侧产生新的频率边带。常见的产生电光频率梳的装置主要包括单调制器结构、级联结构及MRM调制器结构。

1.2.1 马赫-曾德尔调制

单个IM产生电光频率梳的常见结构是MZM。MZM是一种基于马赫-曾德尔干涉仪原理，结合铌酸锂波导调制技术制作的电光调制器。这种设计通过去除偏振器，避免了电光调制性能依赖偏振器等元件的问题，从而有效降低了驱动电压。系统输入和输出端均为Y分支波导，输入光经分束后传输至两平行波导。在两平行波导处分别设置上、下电极板，通过施加外部电场使两路光分别产生相位变化，并在输出端干涉。利用光的干涉原理，MZM将相位变化转化为强度变化。根据平行波导是否使用相同的电极组，MZM可分为单驱动MZM和双驱动MZM(Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator, DDMZM)，如图5所示。

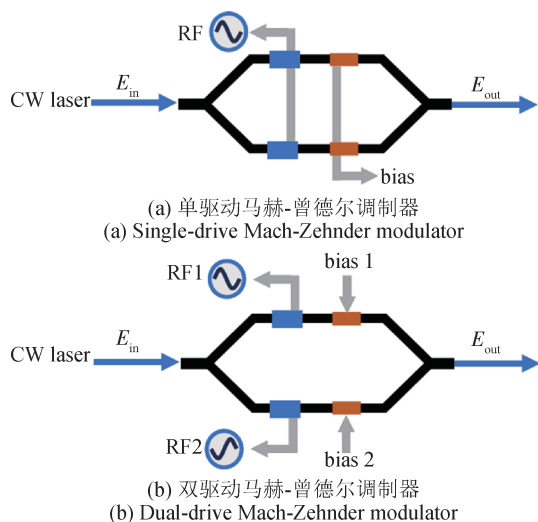


图5 两种最常见的马赫-曾德尔电光调制器示意图
Fig.5 Schematic diagrams of the two most common types of Mach Zehnder electro-optic modulators

单驱动MZM结构简单、成本较低，但其产生的频率分量强度高度依赖于谐波阶数，导致光谱平坦度不足，限制了其在高精度测量中的应用。

为改善这一问题，SAKAMOTO T等人在2007年提出了DDMZM，通过一组具有特定幅度差的同相正弦信号驱动平行波导，并推导出生成光谱平坦的光频梳所需的驱动条件^[35]。2016年，YOKOTA N等人提出并实验验证了一种基于射频信号一阶与二阶谐波驱动单个DDMZM的光频梳生成方法，在二阶谐波幅度较小时，成功获得包含11条谱线且光谱平坦度 < 1 dB的准矩形光频梳^[36]，进一步揭示了实现平坦光频梳的条件，为高性能光频梳的优化提供了参考。

在此基础上，CUI Y H等人在2023提出了基于双平行马赫-曾德尔调制器(Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator, DPMZM)和叠加谐波产生平坦光频梳的新方案^[37]。在基频、二次谐波和三次谐波同时驱动下，实现了包含13条谱线且平坦度为0.58 dB的光频梳。该结构允许更多的调制自由度，使得频谱优化更加灵活，标志着MZM结构在高性能光频梳生成中的又一次重要演进。

然而，调制系统自由度的提升也意味着参数搜索计算量显著增加，从而使系统控制更复杂，并更易受到温度、振动等环境因素的干扰。针对此问题，LIN W等人在2025年提出基于级联MZM和双PM的新方案，并结合残差网络与贝叶斯网络优化算法，实现了包括33条谱线且平坦度为0.5508 dB的电光频率梳^[38]。该研究团队在实验中进一步验证了光通信性能，将产生的光梳信号分为8个宽度为50 GHz的载波，并在40 Gb/s的符号速率下进行16正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)。级联电光调制器产生光频梳方案如图6所示。

综上所述，从单驱动MZM、双驱动MZM到DPMZM以及进一步的级联MZM结构，电光频率梳

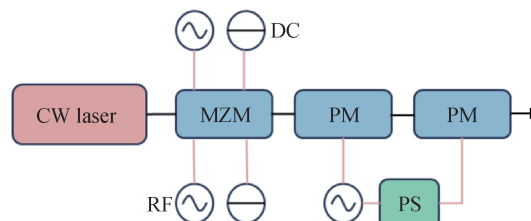


图6 级联电光调制器产生光频梳方案示意图^[38]
Fig.6 Scheme of OFC generated by cascaded electro-optic modulators^[38]

的调制架构持续演进，其核心目标均在于提升有效调制深度、增加可控调制维度，并通过相干调制方式优化频率分量的幅度分布。单级调制受限于调制指数和驱动条件，高阶边带衰减明显，导致可生成的谱宽有限且平坦度不足；而随着调制级数的提升，多级结构能够在不同调制通道间累积相位调制量，扩展可获得的边带数量，从而提升谱宽。同时，通过调节各级偏置点、电压幅度及调制谐波组合，分级调制能够对不同阶次的频率分量实现幅度补偿，使得整体频谱包络更加均匀，实现更高的光谱平坦度。可以看出，调制架构从单级向多级的发展不仅扩大了电光频率梳的可用带宽，也增强了光谱整形能力，是实现高性能电光频率梳的重要技术途径。然而，调制级数与自由度的增加也带来驱动参数优化复杂度的上升与环境稳定性的更高要求，这将影响未来电光频率梳结构的设计与优化方向。

1.2.2 基于波导的相位调制

尽管MZM及其衍生结构在光频率梳生成方面取得了显著进展，但其调制自由度有限，光谱平坦度仍受系统复杂度的制约。随着对宽带和平坦光频梳需求的提升，传统MZM逐渐显现出在高速通信和精密测量中的局限。基于波导的PM凭借低半波电压、宽带响应和优良的集成性逐渐发展，为电光频率梳生成提供了更多方案，并在高速光通信和微波光子雷达等前沿应用中展现出广阔前景。

图7展示了基础的单PM结构，通过外加电场实现对光相位的直接调制，结构简洁且易于实现。但单相位调制器的调制效率有限，半波电压往往偏高，难以兼顾低功耗与宽带高速应用。



图7 单相位调制器示意图

Fig.7 Schematic diagram of single-phase modulator

为了进一步降低驱动电压并提升调制性能，研究者们提出了多种改进方案，以满足对光频率梳的带宽与光谱平坦度的更高要求。2019年，REN

TH等人提出了一种基于薄膜铌酸锂(LNOI)平台的双通道PM^[39]。该调制器采用推挽式双通道结构和行波电极设计，在5~40 GHz条件下实现了3.5~4.5 V的半波电压，片上传播损耗约为1 dB。凭借低半波电压值与较强的射频功率承载能力(高达3.1 W)，该调制器实现了超过40条梳齿、带宽约10 nm的电光频率梳，避免了传统多级级联结构的复杂性与插入损耗。该工作表明LNOI平台在低电压、宽带电光调制方面具有突出潜力。

2022年，HUANG H J等人提出了一种非谐振再循环PM，利用多模模式复用，使光场在调制区多次循环，显著提升调制效率。实现了单环、双环结构下约2~3倍的调制效率提升，同时降低微波功耗。该结构避免了谐振结构的带宽与色散限制，为低功耗片上集成电光频率梳生成提供了新途径^[40]。非谐振循环PM如图8所示^[40]。

2022年，YU M J等人在薄膜铌酸锂光子芯片上首次实现了片上电光时间透镜系统，通过级联幅度调制器和循环PM结合啁啾布拉格光栅(见图9)，实现了重复频率为30.135 GHz、脉宽为532 fs的高平坦度光频梳^[41]。循环相位调制结构在4.4~38.7 GHz条件下实现了约2~2.6 V的最低半波电压，显著优于常规LNPM。相较传统多级相位调制系统，该系统结构更加紧凑高效，为集成化超快光源发展提供了新思路。

在此基础上，DU Y T等人于2024年提出一种新型折叠循环PM^[42]，他们基于薄膜铌酸锂平台，将传统循环PM的光波导折返部分折叠设计，将回程光波导长度缩减至0.12 cm，实现低半波电压带宽的展宽。该折叠循环PM在3.5~50 GHz条件下实现了2~2.9 V的最低半波电压(48.1 GHz时为2.84 V)，低半波电压带宽扩展至2.6 GHz，并将器件尺寸压缩至0.06 cm×1.3 cm。该设计在保持低驱动电压的同时，兼顾了宽带与高集成度。

1.2.3 微谐振腔调制

在非谐振相位调制中，调制为单程作用，半波电压随射频频率升高而增大，为了扩展梳齿数，通常需要加长电极或采用循环复用方法。为突破这一约束，研究人员利用MRM实现谐振增强：光在MRM内多次往返，等效作用长度显著放大，使

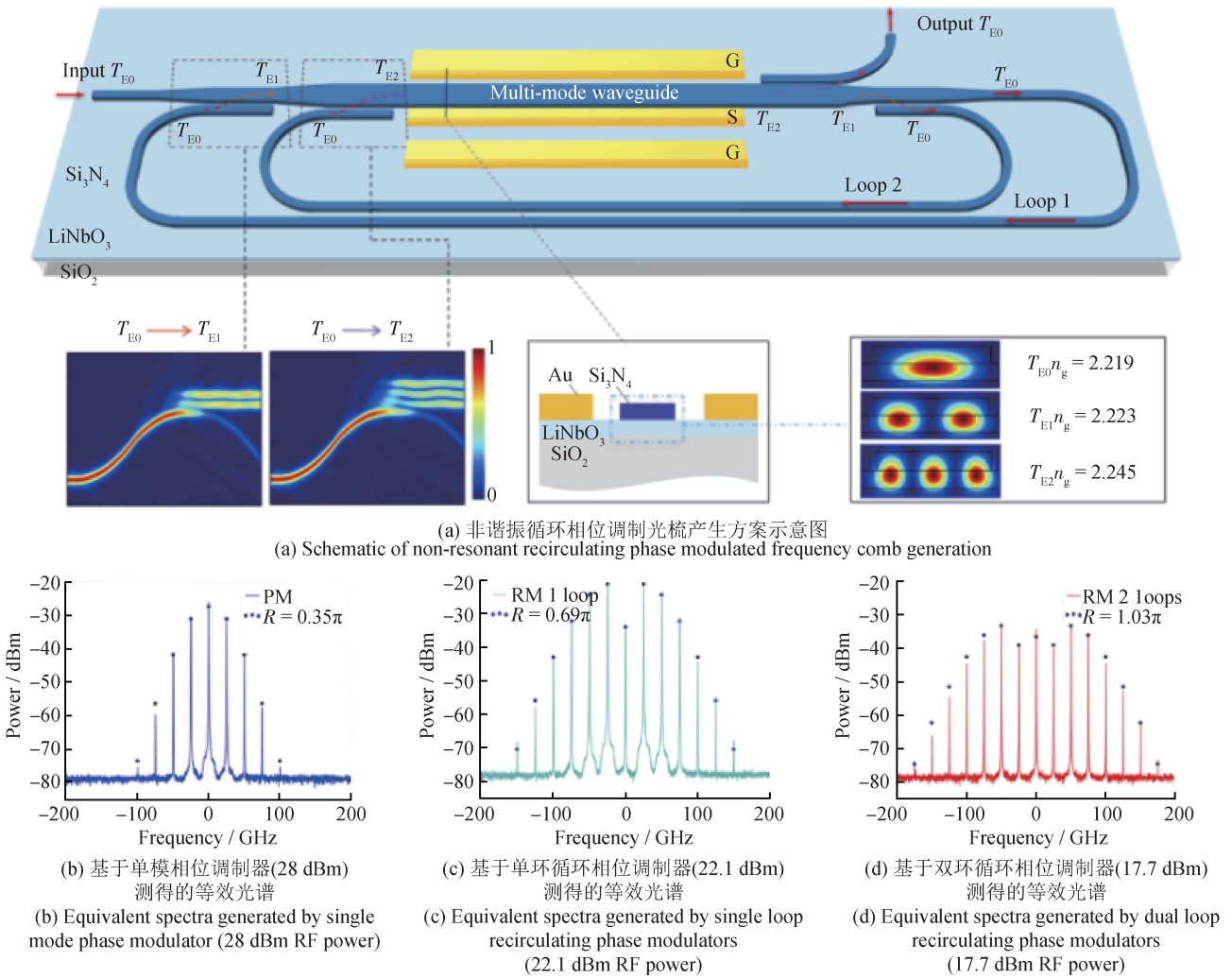


图8 非谐振循环相位调制器示意图^[40]

Fig.8 Schematic diagram of non-resonant recirculating phase modulator^[40]

器件在更紧凑尺度上获得更低的 V_π 、更高调制效率与可观的频谱展宽。

图10展示了基础的MRM结构。MRM通常由环形或盘形波导及邻近的直波导构成。外加射频电场作用于腔区时，电光效应改变腔内折射率，实现相位调制，在入射单频光两侧产生新的频率边带。

2019年，RUEDA A等人在单晶铌酸锂高Q值WGM谐振腔中实现了电光频率梳生成^[43]。该研究团队将铌酸锂盘形谐振腔嵌入铜腔，形成的器件具有超高光学品质因子($Q \approx 1.4 \times 10^8$)，使得在仅需20 dBm微波功率与320 μ W光泵的条件下，即可产生跨越约1.6 THz、覆盖超过180条梳齿的宽带光谱。此外，该系统等效半波电压低至约260 mV，远低于传统非谐振电光调制器。

2019年，ZHANG M等人在传统PM的基础上，通过薄膜铌酸锂微环谐振腔实现集成电光频率梳生成。该微环谐振腔具备超低损耗和高Q值(约为 1.5×10^6)，实现了谱宽超过80 nm的光谱，包含超过900条频率间隔为10.453 GHz的梳齿，覆盖L波段及部分C波段和U波段，相邻梳齿功率差小于0.1 dB，梳齿信噪比最高超过40 dB^[29]。同时，该实验装置具有优异的可调谐性，梳齿的频率间隔在10 Hz至100 MHz可精细控制。

在此基础上，2022年，HU Y W等人基于薄膜铌酸锂平台构建了耦合谐振腔电光频率梳结构，通过满足广义临界耦合条件显著提升能效^[44]，实现了30%的泵浦到梳齿转换效率和132 nm的光谱宽度，在30.925 GHz重复频率下获得533条梳齿。

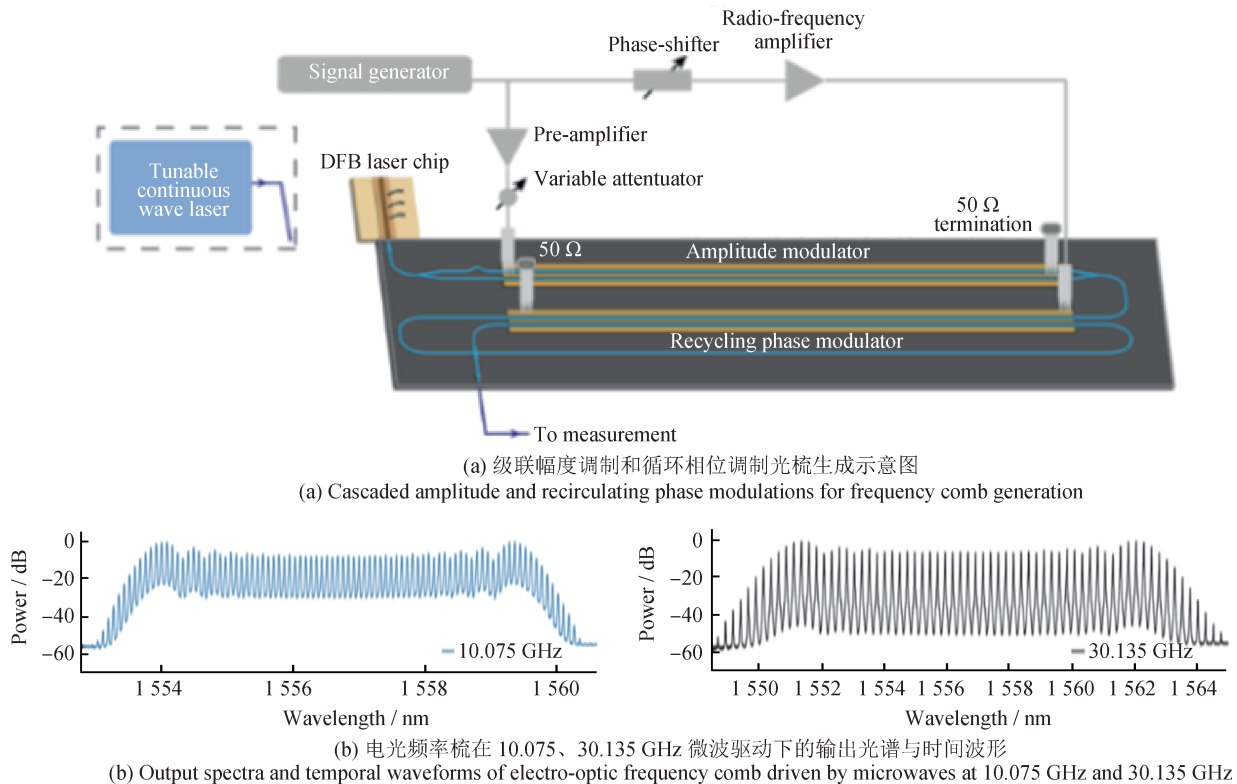


图9 基于薄膜铌酸锂的集成飞秒脉冲生成系统示意图^[41]

Fig.9 Schematic of an integrated femtosecond pulse generation system based on thin-film lithium niobate^[41]

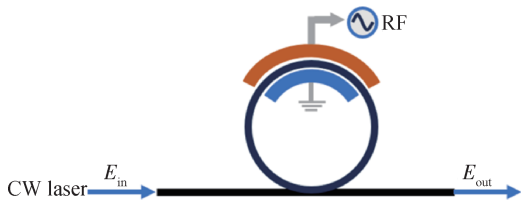


图10 微谐振腔调制器示意图

Fig.10 Schematic diagram of micro-resonator modulator

随着集成调制器性能的持续提升，调制型电光频率梳在脉冲压缩、梳线扩展及光谱平坦度优化方面也取得了关键进展，研究人员利用集成调制器实现 10 GHz 重复频率的皮秒脉冲列生成^[45]，以及通过级联调制器实现覆盖 S/C/L/U 波段、含 148 条梳线的宽带电光频率梳^[46]。这些研究表明：新型材料平台在提升电光频率梳光谱覆盖范围与脉冲整形能力方面具有良好潜力^[47]。

2 电光频率梳的谱段扩展

电光频率梳源于对连续波激光施加相位调制，其直接输出的谱包络由贝塞尔函数决定，边带数目与功率分布受调制深度与器件带宽共同限制，

因而初始带宽通常较窄。而高分辨力光谱学、光通信及天文频谱校准等应用需要光梳具备倍频程或更宽的频谱覆盖，以支持自参考锁定或宽光谱覆盖。基于波导或微环谐振腔的电光频率梳目前难以直接实现所需的宽光谱输出，谱段扩展技术成为提升电光频率梳性能、拓展应用范围的关键研究方向。

2.1 近红外超连续谱($f-2f$ 自参考)

近红外超连续谱是实现 $f-2f$ 自参考的基础，通过该技术能够精确测量并锁定载波包络偏移频率 f_0 ，将离散的梳齿转化为具有绝对频率基准的光学尺子，为光频计量与精密光谱学等应用提供基础支持，因此近红外超连续谱的产生至关重要。

在电光频率梳的谱段扩展中，仅依靠提高调制电压或频率、谐振场增强或级联谐波调制等线性及系统级调控手段，所产生的光谱带宽难以满足倍频程覆盖要求^[48]。为实现 $f-2f$ 自参考的光谱需求，必须借助自相位调制等三阶非线性光谱展宽过程，才能将梳宽有效扩展至倍频程以上。然而，电光频率梳产生的脉冲通常具有低峰值功率与宽

脉宽特性,若直接注入非线性介质,其脉冲峰值功率不足以有效激发强烈的非线性效应,不仅难以实现有效的光谱展宽,也无法维持展宽后光谱的相干性。此外,相位噪声会在梳齿间累积,并随非线性过程进一步放大,导致梳齿信噪比下降与线宽展宽。因此,在实现倍频程覆盖前,需在非线性展宽前进行脉冲压缩提升峰值功率,并通过相位噪声抑制以提升梳齿质量。

近红外波段实现光谱展宽的方法主要分为两个阶段。首先,通过级联调制、放大与色散管理对电光频率梳产生的周期脉冲进行时域压缩,获得皮秒至飞秒量级脉宽的高峰值功率脉冲。随后,将压缩后的脉冲注入高非线性介质中,如高非线性光纤(Highly Nonlinear Optical Fiber, HNLF)、光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF),或在集成平台上采用氮化硅(Si_3N_4)、氮化铝(AlN)等波导材料,借助三阶非线性效应实现光谱展宽。这种展宽方式可以得到数百纳米量级的带宽,但受限于电光频率梳本身的低脉冲能量,难以覆盖一个完整的倍频程。

CARLSON D R等人提出了基于前端滤波与两级展宽的改进方案^[49],进一步解决了电光频率梳单脉冲能量有限和相位噪声累积放大的问题。首先通过级联相位与IM结合色散补偿,将10 GHz重复频率的脉冲压缩至约600 fs,随后引入与光梳重复频率匹配的高精细度法布里-珀罗腔(Fabry-Pérot cavity),从源头滤除电光调制过程中引入的宽带热噪声,显著提升了梳齿相干性。滤波后的脉冲经

HNLF进一步压缩至100 fs,并实现初步非线性展宽,然后注入 Si_3N_4 波导生成覆盖750~2750 nm的超连续谱,成功实现倍频程相干展宽,最终在PPLN晶体中完成 $f-2f$ 自参考。CARLSON D R等人首次实现了基于电光频率梳的完整倍频程展宽与 $f-2f$ 自参考,展示了前端噪声抑制与两级非线性展宽相结合的有效性。

SEKHAR P等人提出一种基于全保偏光纤集成的电光频率梳的近红外超连续谱扩展方案,使用反常色散单模光纤替代传统的自由空间光栅进行色散补偿,实现了全光纤化的色散管理,显著增强了鲁棒性和环境适应性,见图11^[50]。针对低脉冲能量、高重复频率的电光频率梳系统,成功将20 GHz和10 GHz电光频率梳脉冲分别压缩至57 fs和50 fs,峰值功率提升至千瓦级。利用压缩后的高峰值功率脉冲,研究团队在分段色散裁剪的高非线性光纤中产生了覆盖1150~1700 nm的平坦超连续谱,每条梳齿功率超过20 μW ,适用于天文光谱校准;同时,在 Si_3N_4 波导中成功获得了倍频程跨度光谱,为 $f-2f$ 自参考提供了关键条件。SEKHAR P等人的研究成果为天文光谱校准等精密应用提供了高稳定性、高性能的电光频率梳谱段扩展技术路径。

2.2 中红外及太赫兹

电光频率梳的输出波长受限于其核心电光调制器材料的透明窗口和调制效率,通常处于近红外波段,若要拓展至中红外或太赫兹波段,则需借助非线性频率转换或光电混频等技术。输出波

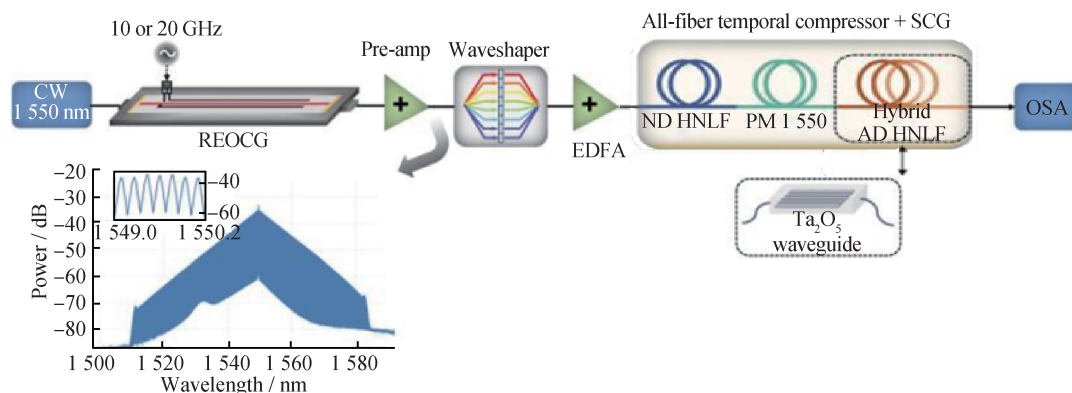


图11 谐振电光频率梳非线性脉冲压缩及超连续谱生成实验装置^[50]

Fig.11 Experimental setup for nonlinear temporal compression and supercontinuum generation of the resonant electro-optic frequency comb^[50]

长扩展后的电光频率梳在高灵敏度分子识别、环境监测、材料分析、生物医学成像、无损检测等领域展现出广阔应用前景。

在中红外波段扩展中，基于二阶非线性效应的差频产生(Difference-Frequency Generation, DFG)和光学参量振荡(Optical Parametric Oscillation, OPO)是两类主流方案。DFG的基本原理是：将两束不同频率的光共同入射至二阶非线性晶体，通过非线性极化产生频率满足 $\omega_{\text{idler}} = \omega_{\text{Pump}} - \omega_{\text{Signal}}$ (其中， ω_{idler} 为闲频光频率， ω_{Pump} 为泵浦光频率， ω_{Signal} 为信号光频率)的差频光。若其中一束为电光频率梳，另一束为连续波泵浦激光，则每一条梳齿均与泵浦光发生差频，从而在中红外波段生成一组与原始光梳间隔一致的新频率梳，实现光谱转移。YAN M等人利用电光调制在1 530 ~ 1 620 nm波段生成两组近红外光梳^[51]，并将其与1 063.8 nm连续波泵浦光共同注入MgO:PPLN晶体中进行差频，见图12(a)。通过准相位匹配调控，在3 150 ~ 3 500 nm波段成功获得两个高互相干性的中红外光

梳，在300 MHz重复频率下包含1 200条谱线，见图12(b)，其平均功率超500 μW 。利用这一光源，实现了甲烷、乙烯等分子在中红外“指纹区”的多普勒极限吸收光谱测量，为痕量气体快速检测奠定了基础。

脉冲内差频(Intra-pulse DFG)利用同一超短脉冲中不同频率成分实现差频，无需外部泵浦光源，显著提升了系统紧凑性与相位稳定性。KOWLIGY A S等人利用电光调制器产生10 GHz近红外频率梳，通过氮化硅波导实现非线性光谱展宽和脉冲压缩，得到小于15 fs的超短脉冲，随后在PPLN与取向图案化磷化镓(OP-GaP)波导中实现了脉冲内差频，分别获得3.1 ~ 4.8 μm 与7 ~ 11 μm 的中红外梳输出，平均功率达毫瓦量级^[52]。

OPO是一种利用光学谐振腔增强二阶非线性效应的激光频率下转换技术，其核心原理是：将泵浦光入射至谐振腔内的非线性晶体中，通过参量下转换过程产生信号光和闲频光，当泵浦光功率超过振荡阈值时，谐振腔为信号光或闲频光提

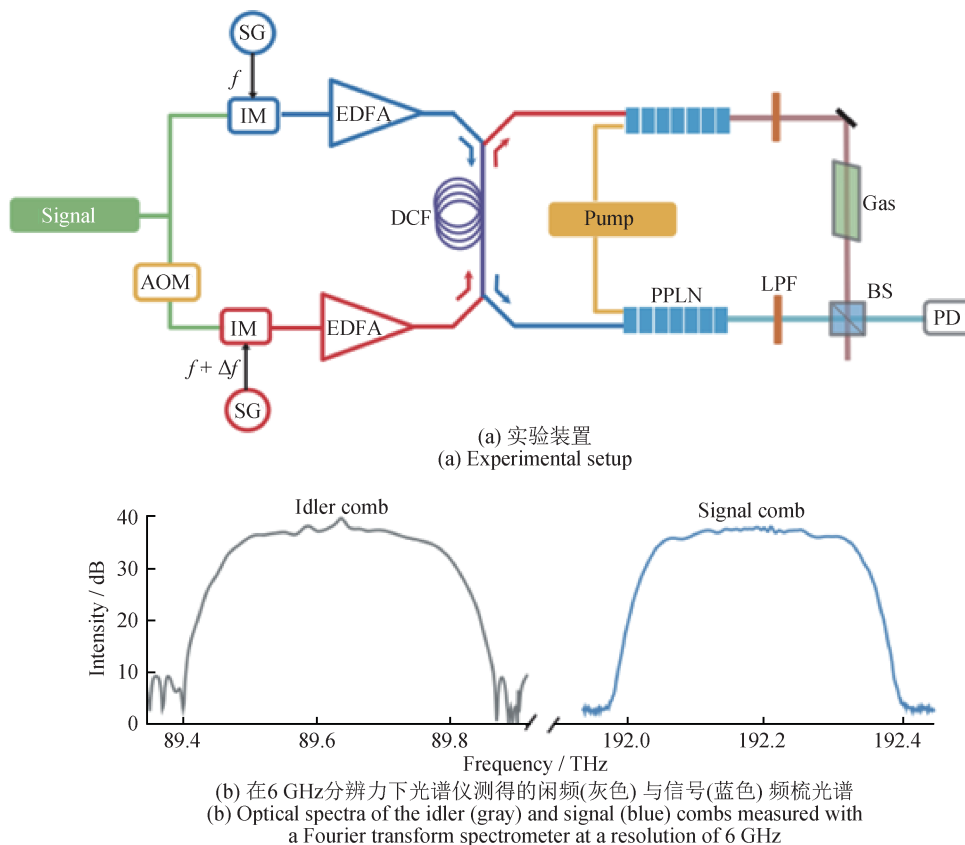


图12 中红外平坦频率梳的产生装置及其输出光谱^[51]

Fig.12 Generation setup and output spectra of a mid-infrared flat-topped optical frequency comb^[51]

供反馈并使其持续振荡放大，从而输出高功率、高相干性的可调谐激光，且可通过调节晶体参数或泵浦光特性实现宽谱调谐输出。相较单次通过晶体的DFG，OPO通过谐振效应可获得高出多个量级的转换效率与输出功率。ROY A等人利用纳米铌酸锂光子芯片实现了高集成度OPO^[53]，该方案采用非共振泵浦结构，通过调节泵浦波长实现了1.5~3.3 μm的信号光/闲频光调谐，经和频过程输出620 nm的可见光频梳，首次在单片平台上覆盖可见光至中红外波段。HEINIGER A T等人则通过啁啾调制电光频率梳泵浦连续波OPO，实现了瓦级功率的中红外光梳输出^[54]。其在2.19~4.00 μm条件下达到每条梳齿450 μW的功率水平，较传统差频产生方案显著提升。该研究团队利用此系统实现了高灵敏度的甲烷光谱探测，展现了其在精密分子传感测量中的应用潜力。

近年来，基于电光频率梳的太赫兹波产生技术也取得了显著进展。MARTÍN-MATEOS P等人提出了电光双梳方案，将两套重复频率存在微小偏

移的光梳共同入射至一个光电探测器，利用光学外差原理，实现了多频点太赫兹信号的同步产生（见图13）^[55]。该方法利用光学注入锁定技术确保双梳相干性，在260~340 GHz条件下产生9条梳齿的太赫兹信号，动态范围达到55 dB，已成功应用于高速太赫兹光谱成像系统。KRAUSE B L等人研究了基于边带选择与光电混频的太赫兹频率梳生成方法，并对其相位噪声特性进行定量分析^[56]。通过电光调制产生光学边带，选择特定阶数边带进行外差混频，实现了10~40 GHz范围的频率调谐。实验表明：在40 GHz输出频率下，1 MHz偏移处相位噪声仅有-108.7 dBc/Hz，展现了优异的噪声特性。ABDOLLAHI S等人提出一种基于多波长激光器的光谱倍增新技术^[57]，将窄线宽电光频率梳注入多波长激光器中，利用模式竞争和非线性耦合效应，成功将光梳频谱扩展至更大的频率间隔。该技术实现了最高1.3 THz的梳齿间隔和纳秒量级的频率切换速度，突破了传统边带选择方法的频率调谐范围限制，为太赫兹通信提供了新途径。

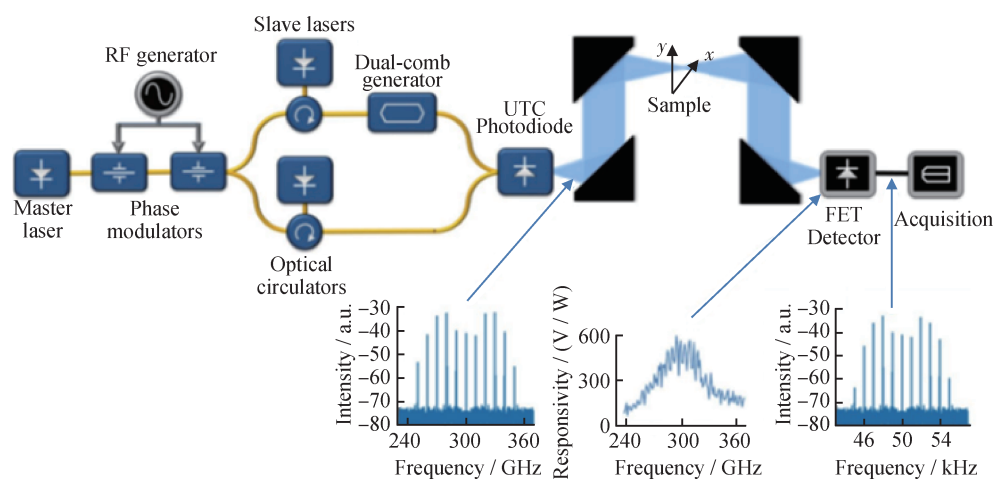


图13 基于电光双梳的太赫兹成像系统原理图^[55]

Fig.13 Schematic of the electro-optic dual-comb THz imaging system^[55]

2.3 紫外及深紫外

紫外光谱包含天体物理学、精密计量学和量子操控等领域的关键信息。宇宙学红移的测量、基本物理常数的检验以及冷原子分子操控等，均需要应用在紫外波段具备高精度、高分辨力的频率基准。然而，受限于材料色散、光子能量损失和非线性转换效率等因素，实现高重复频率、高

相干性的紫外光梳始终是一项重要挑战。

目前，研究人员主要以高重复频率、高稳定度的近红外电光频率梳作为光源，基于级联的高次谐波产生过程，将光谱逐步转换至紫外波段。该方法的核心在于利用具有高非线性系数的光学介质，并通过精确的相位匹配技术，高效地产生二次乃至更高阶次的谐波，最终实现紫外甚至深

紫外波段的覆盖。

在具体研究中，KASHIWAGI K等人利用 PPLN 波导同时产生二次至四次谐波，将 1 550 nm 电光频率梳扩展至 387.5 nm 紫外波段，获得了 10 GHz 间隔的稳定梳状谱，验证了电光频率梳作为紫外频梳源的可行性^[58]。LUDWIG M 等人优化了纳米铌酸锂波导的准相位匹配设计，在 18 GHz 重复频率下实现了覆盖至 387 nm 的紫外频率梳，并成功

应用于 SOPHIE 光谱仪的校准实验，展示了其在天文观测中的实际应用^[59]。基于铌酸锂波导的紫外天文频率梳产生系统与光谱如图 14 所示，其中，图 14(d)上方数据图为极化图案，中间数据图为在不同入射脉冲能量下实验获得的光谱，下方数据图为仿真结果。文献[58-59]展现了电光调制与非线性频率转换结合在紫外频率梳研究中的重要潜力。

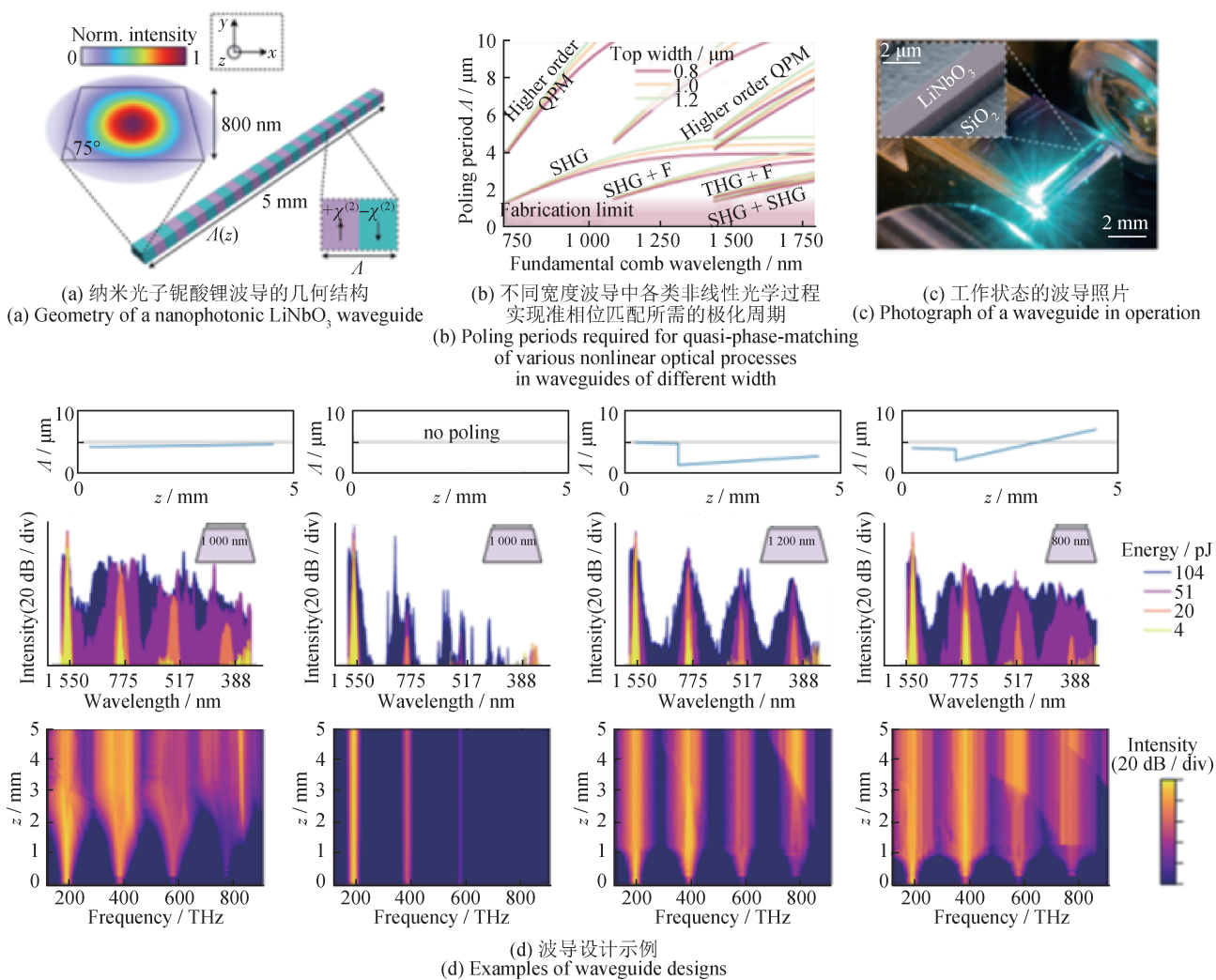


图 14 基于铌酸锂波导的紫外天文频率梳产生系统与光谱^[59]

Fig.14 Ultraviolet astrocomb generation system using lithium niobate waveguides and resulting spectra^[59]

3 电光频率梳的应用

3.1 光谱应用

光谱学已在材料科学、生物医学等领域得到广泛应用^[60]。双光梳光谱(Dual-Comb Spectroscopy, DCS)因具备宽光谱覆盖、高灵敏度、快速响应和

高精度等优势^[9]，成为近年来光谱学研究的前沿，其基本工作原理是：产生两个重复频率存在微小差异的光梳，其中一个光梳作为参考梳，另一个光梳通过待测样品携带“指纹”信息，二者拍频，通过光电探测器记录干涉信号，实现高效的光谱重建。与锁模激光器及微腔光梳不同，电光频率

梳的重复频率不受限于腔长，仅取决于电光调制器的驱动频率，因此，基于集成电光频率梳的双光梳系统不仅具有紧凑的尺寸和较低的成本，还在重复频率可调谐性、带宽和分辨力方面有显著提升。依据所采用的光源形式，电光频率梳光谱应用可划分为单光梳光谱应用与双光梳光谱应用两类。

单光梳光谱的实现方式是：将连续波光源分为两路，其中一路经电光调制器产生频率梳，另一路经声光调制器移频后，与前一路光在探测器处拍频，实现外差探测。2016年，HÉBERT N B等人利用采样频率为9.78 MHz的单电光频率梳，实现了对光学泵浦后铯原子光谱快速变化的监测(见图15)，通过差频探测将光谱信息映射到射频域^[61]。该研究展示了低重复频率电光频率梳在解析原子精细与超精细结构方面的应用潜力。

双光梳光谱与单光梳光谱类似，只是将其中一路光源由连续光替换为具有微小重复频率差的光梳。2022年，SHAMS-ANSARI A等人基于薄膜铌酸锂平台实现了集成微环电光双梳光谱系统^[62]。所制备的微环具有约 10^6 的 Q 值和低损耗波导结构，在10.45 GHz射频驱动下可生成线间隔为10 GHz的电光频率梳。实验中，通过两个独立的微环分别产生双梳(见图16)。由于电光频率梳的频率调

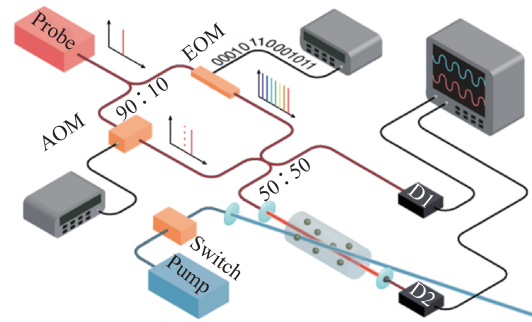


图15 单电光频率梳探测原子光谱装置图^[61]

Fig.15 Experimental setup of a single electro-optic comb for atomic spectroscopy^[61]

节捷变性，两路光梳的重复频率差可在0.01 ~ 0.8 MHz变化。SHAMS-ANSARI A等人利用该系统对12 cm光程的乙炔气池(9.86×10^4 Pa)进行探测，结果显示：系统在191.5 THz附近实现了1.6 THz的光谱覆盖，解析得到160根清晰可辨的梳齿，信噪比约 10^5 。

2024年，YUAN Z C等人提出并验证了一种基于注入锁定的高分辨力中红外双光梳光谱系统。首先在近红外波段生成梳齿间隔为13 GHz的电光频率梳，并利用注入锁定技术将分布反馈激光器依次锁定至其中的34条梳齿，作为后续调制的种子光源^[63]。随后，通过任意波形发生器驱动的单同相与正交马赫-曾德尔调制器实现双射频梳源

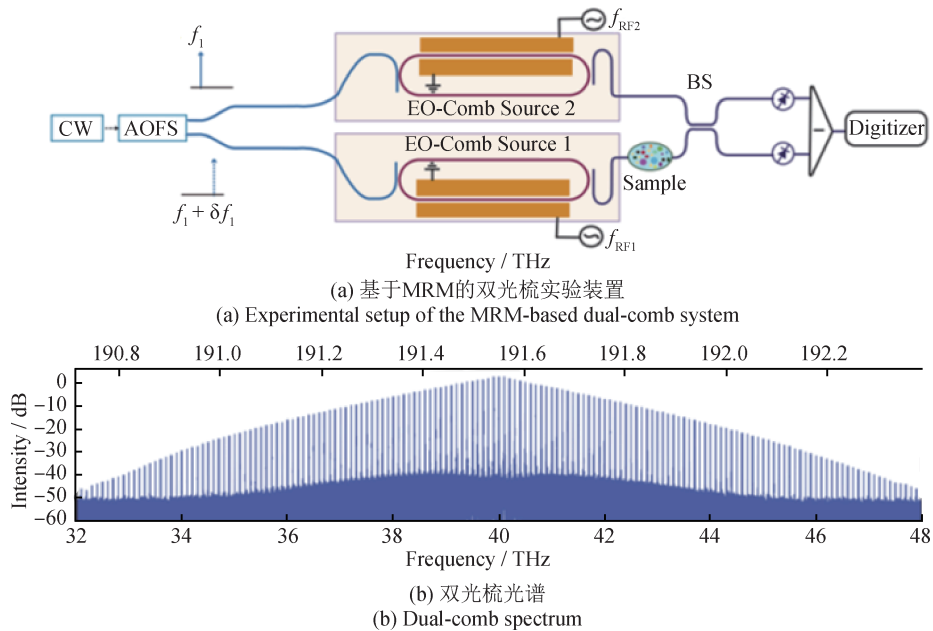


图16 用于双光梳光谱探测的基于铌酸锂微环谐振腔电光频率梳^[62]

Fig.16 Electro-optic frequency combs based on lithium niobate microring resonators for dual-comb spectroscopy^[62]

的单边带调制,得到线间隔 50 MHz、带宽 13 GHz 的双光梳输出,具备良好的光谱平坦性。进一步地,结合差频产生过程,将光谱下变频至 3.3 μm 中红外波段,采用光谱拼接技术,最终获得总计 8 840 条梳齿,在 183.6 ms 测量时间内,其性能指标 (figure of merit) 达到 $2.94 \times 10^6 \text{ Hz}^{1/2}$ 。YUAN Z C 等人基于该方案成功解析出甲烷的吸收光谱,验证了其在高分辨力光谱分析中的潜力。

3.2 测距应用

测距技术在航空航天、工业检测、自动驾驶等领域中发挥着至关重要的作用,其性能直接影响系统的定位精度、操作安全与运行可靠性^[64]。在各类测距技术中,激光测距凭借其高精度、高速度和非接触性等特性,已成为高精度距离测量的主要技术手段。

为满足不同应用场景对测量参数的多样化需求,目前已发展出多种激光测距技术,主要包括脉冲飞行时间法、相位飞行时间法、三角测量法、激光干涉测量法 4 种主要方法。脉冲飞行时间法通过直接测量激光脉冲的往返传播时间计算距离,可实现千米级的大范围测量,且测量速度极快。然而受限于光电探测器的时间分辨能力,该方法的测量精度通常仅限于米量级,且易受环境因素干扰。相位飞行时间法通过检测调制激光的相位延迟计算距离,在百米量程内可实现微米级测距精度。该方法需要采用多频率测量方案来解决相位周期性带来的模糊距离问题,这增加了系统的复杂度和成本。三角测量法基于光学几何关系进行距离计算,在近距离测量场景中能够实现微米级精度,且成本较低,但其测量范围受基线长度限制,且长距离测量时外界环境会显著影响测量的准确性。激光干涉测量法通过干涉条纹计数实现位移测量,具有纳米级精度,但其本质上是基于参考点的相对位移测量方式,需要保持光路连续,无法直接获得绝对距离值。

尽管上述激光测距方法在不同应用场景中得到了广泛应用,但进行高精度、长距离和高速测量时仍存在一定局限。2000 年,MINOSHIMA K 等人首次使用飞秒光梳进行测距,在地下隧道进行了 240 m 的绝对长度测量^[65],为精密测距技术提供

了全新的解决方案。2009 年, CODDINGTON I 等人提出并实验验证了双光梳干涉测距,在 60 ms 采样时间内,系统的测距误差不高于 5 nm,同时具备 30 km 的模糊距离^[66]。两台光梳的重复频率差通常在 kHz 至 MHz 范围,它们在射频域产生拍频,将原本难以直接探测的光学干涉信号下变频至射频范围,无需机械扫描即可实现快速且高精度的测量。

电光频率梳具有较好的可调谐性,且系统复杂度相对较低,为双梳测距提供了重要手段。WU H Z 等人于 2017 年首次将电光频率梳应用于室外长距离绝对距离测量,在户外基线上实现了最长约 1.2 km 的绝对测距^[67]。该系统基于双光梳干涉测距原理,以窄线宽连续激光器作为共同种子源,通过两个独立的电光 PM 分别产生重复频率为 10 GHz 与 10.001 GHz 的光梳,重复频率由外部射频源精确控制并锁定至铷钟,从而保证了两光梳之间的同步与相干性。区别于早期基于宽带锁模光梳的全谱相位斜率拟合方法,WU H Z 等人针对电光频率梳带宽有限的特点,提出基于合成波长的多级测距策略,通过提取不同梳齿对的射频相位差构建一系列等效合成波长,先利用较大合成波长进行粗测,再采用较小合成波长实现精测,从而完成绝对距离的逐级解算,减少了电光频率梳模式数量有限对测距精度的影响。实验中,1 180 m 条件下测量值与参考值偏差 $\leq 379 \mu\text{m}$,长时测量 350 s 以上 Allan 偏差 $< 600 \text{ nm}$,同时实现 1 μs 单次测量速度,兼顾长距离、高精度与室外复杂环境适用性。WU Z L 等人进一步将电光频率梳测距技术拓展至复杂非合作目标的三维轮廓测量^[68],结合环境不敏感的光路设计,该方案实现了百万像素级的三维轮廓重建,测量硬币、玩具车轮及集成电路板等样品时精度达到微米量级,展示了电光频率梳在工业在线检测等复杂工程场景下的应用潜力。

2023 年,XIE J D 等人提出了一种基于双动态电光频率梳的多外差干涉绝对距离测量方法,对两个电光频率梳的调制频率进行同步跳频控制,动态生成一组可调的合成波长链,从而使模糊距离增大^[69]。应用该方法时,仅需单一连续波激光源和一对电光 PM,无需外部测距预估值,有效克服了传统电光频率梳因合成波长与线间距绑定导

致的无模糊范围受限问题(见图17)。实验结果表明:该系统在45 m条件下,10 min长期测量的标准偏差为 $3.2 \mu\text{m}$,10 s短期测量的标准偏差仅为 $0.8 \mu\text{m}$,与He-Ne参考干涉仪的比对残差不超过 $\pm 8.6 \mu\text{m}$,精细测量阶段更新速率达10 Hz,展现了电光频率梳在中长距离、高精度绝对测距领域的应用潜力。

基于电光频率梳的重复频率可调特性,研究人员提出了OSCAT,其原理是:将电光频率梳接入非平衡马赫-曾德尔干涉仪,该干涉仪由含待测距离的测量臂与固定长度的参考臂组成,两臂存在固定光程差,当 f_{rep} 满足式(15)时,两臂传输的脉冲产生相长干涉,形成可探测的干涉峰。

$$L = m \frac{c_0}{f_{\text{rep}} n_g} \quad (15)$$

式中: L 为待测距离, m 为脉冲数整数, c_0 为真空中光速, n_g 为群折射率。通过记录干涉峰对应的 f_{rep} 变化规律,可反推两臂光程差,进而实现绝对距离测量。该方法避免了传统干涉法对参考点连续性的依赖,可在无需复杂系统的情况下实现绝对测距。LE FLOCH S等人基于OSCAT技术开展实验,在1~24 m条件下测量误差不超过 $\pm 10 \mu\text{m}$ ^[70]。KAYES M I等人进一步优化了系统参数,扩展了测量范围,且测量误差不超过 $\pm 5 \mu\text{m}$ ^[71]。与双电光频率梳干涉架构相比,OSCAT方案结构的复杂度更低,尤其适合中短距离的高精度测量。

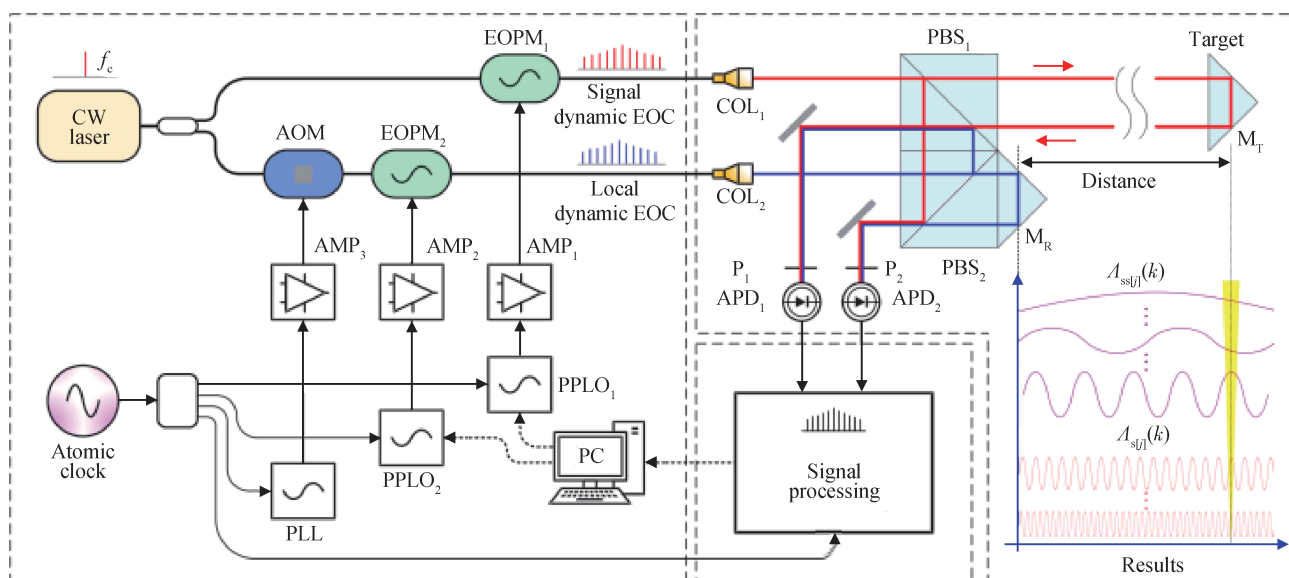


图17 基于双动态电光频率梳的多外差干涉绝对距离测量原理图^[69]

Fig.17 Schematic of multi-heterodyne interferometric absolute distance measurement based on dual dynamic EOFCs^[69]

3.3 通信应用

在大数据、自动驾驶及5G等新兴应用推动下,光通信系统向更高传输速率和更低时延的方向发展。光梳因其等间隔的梳齿结构及优良相干性,被认为是波分复用的理想多波长光源。近年来,集成电光频率梳凭借低功耗、高集成度和捷变频等优异特性,在光通信中展现出突出优势:其超窄线宽支持先进调制格式;高梳齿功率可提升光学信噪比并扩展传输距离;平坦的频谱包络保证并行信道一致性;同时覆盖C波段乃至C+L波段。依托这些特性,集成电光频率梳已实现Tbit/s级大

容量传输、多波段并行通信,为构建新一代大容量、低噪声光通信网络奠定了坚实基础。

2014年,WEIMANN C等人报道了一种基于硅-有机混合(SOH)材料电光调制器的集成电光频率梳,如图18所示。该装置利用DDMZM在40 GHz频率间隔下生成了7根功率起伏约2 dB的梳齿,并在25 GHz与40 GHz驱动频率下实现了梳齿间隔可调的频率梳^[72]。在25 GHz间隔条件下采用18 Gb/s符号率的Nyquist脉冲,并结合16QAM与正交相位键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制,实现了1.152 Tbit/s的传输速率和 $4.9 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$

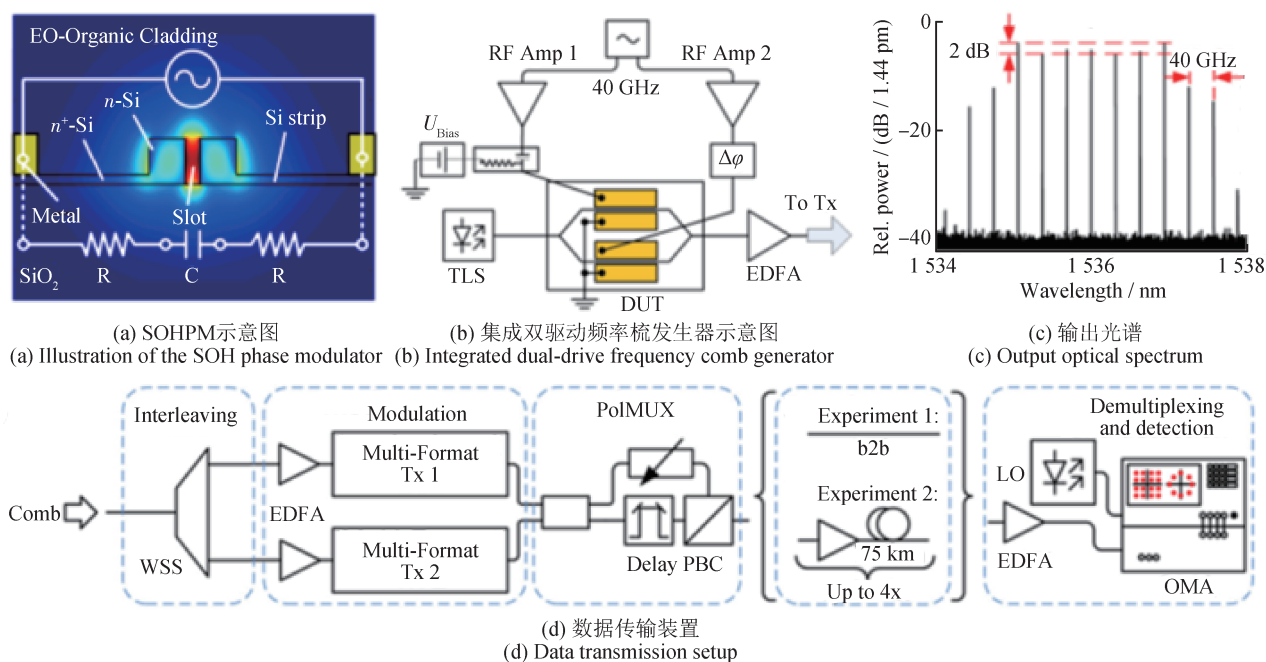


图 18 用于 Tbit/s 数据传输的基于 SOH 材料的频率梳示意图^[72]
 Fig.18 Schematic of an SOH-based frequency comb for Tbit/s data transmission^[72]

的净光谱效率，同时，通过在 7 个信道上采用 QPSK 调制以降低系统复杂度，进一步实现了最长 300 km 的传输。在 40 GHz 间隔条件下，系统以 28 Gb/s 符号率实现了 1.008 Tbit/s 的总传输速率，同样支持最长 300 km 的传输。

2018 年，XU Y L 等人提出一种基于硅光子平台，通过级联 MRM 实现的可调谐 WDM 传输模块，其中一个 MRM 作为频率间隔可调的光频梳发生器，在梳齿间隔为 20 GHz 时，所生成的三条梳齿谱线的信噪比达到 56 dB，谱形平坦度为 2 dB；当梳齿间隔调谐至 25 GHz 时，梳齿信噪比约为 54 dB，平坦度约为 4 dB^[73]。其余 MRM 对不同梳齿分别调制，在低串扰条件下同时实现 10 Gbits/s 的二进制数字整形开关按键 (On-Off Keying, OOK) 数据传输。除此之外，该研究团队开展实验，验证了增加级联 MRM 的个数可以增加梳齿数目，并展现了 5 条梳齿、10 GHz 间隔的扩展能力，最高信噪比高达 64 dB，验证了该方案在低功耗、可扩展和片上集成的灵活光通信系统中的应用潜力。

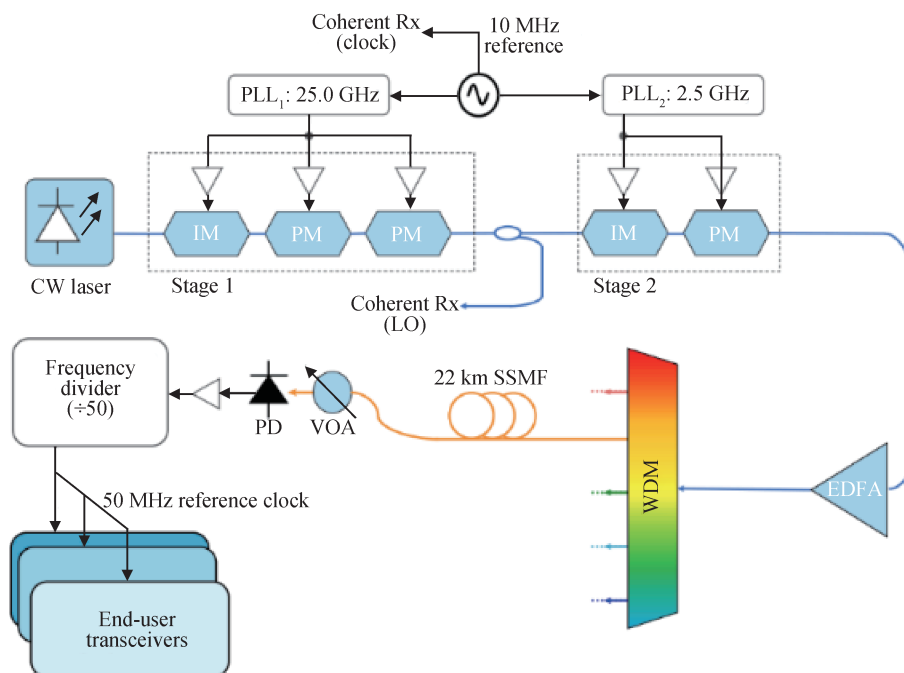
2023 年，ZHOU Z C 等人提出了一种基于频率参考复用的光接入方法。基于级联 IM 和 PM，该系统在 25 GHz 与 2.5 GHz 射频驱动下生成了带宽 1.25 THz、间隔 2.5 GHz 的稳定频率梳；其中射频

源被锁定到 10 MHz 参考时钟，确保梳齿间隔的长期稳定^[74]。梳齿经放大与 WDM 解复用后，被划分为多个 200 GHz 波段 (每段约 70 条梳齿)，并通过 22 km 单模光纤传输。在用户端，窄线宽激光器经注入锁定与选定梳齿同步，再通过电吸收调制实现频分接入。该系统在 200 GHz 带宽内支持 64 个用户并行接入，单用户速率 2.14 ~ 4.3 Gb/s，总容量达到 240 Gb/s。该研究首次展示了电光频率梳接入网中的潜力，在不改造现有光纤基础设施的条件下，为大规模、低时延云接入提供了可扩展方案。基于级联 IM 和 PM 的 WDM 模块如图 19 所示。

XU M Y 等人基于薄膜铌酸锂调制器实现了一种片上平顶光梳^[75]，该器件展现出低片上损耗、低驱动功耗与大电光带宽等特性，能在 31 GHz 的梳齿间隔下，产生 13 条平坦度优于 1.2 dB 的梳线。这种兼具良好平坦度、可调谐性与低功耗的片上光源，为波分复用系统研发提供了重要支撑。

3.4 其他应用

电光频率梳在微波光子学、任意波形生成、精密频率测量及低相位噪声微波信号生成等领域同样展现出显著优势。凭借其梳齿严格的等间距特性和卓越的相干性，电光频率梳已成为连接光学领域与微波领域的关键技术之一，在多个前沿

图19 基于级联IM和PM的WDM模块^[74]Fig.19 Schematic of an WDM based on cascaded IM and PM^[74]

应用中表现出巨大潜力。

电光频率梳在天文光谱仪的高精度波长校准中具有重要应用价值。OBRZUD E等人利用电光频率梳作为频率标尺，在位于西班牙拉帕尔马天文台的GIANO-B近红外高分辨力光谱仪上完成了现场实验验证^[76]。该系统以窄线宽连续波激光器作为泵浦源，通过级联PM与IM生成重复频率为14.5 GHz的电光频率梳，并借助非线性光纤实现光谱展宽，最终获得覆盖约400 nm带宽的梳状谱，并使其梳齿间隔与光谱仪分辨力相匹配。实验结果表明：该电光频率梳系统能够在实际天文观测环境中实现长期稳定的波长校准，其标定误差不高于10 cm/s。这项研究证实，经非线性展宽和稳频处理后的电光频率梳可作为紧凑型天文光梳，适用于高分辨力天文观测中的精密波长定标。

在低相位噪声微波信号生成方面，电光频率梳同样展现出显著优势。KUSE N Y等人报道了一种全稳定化电光频梳系统，将窄线宽激光器通过Pound-Drever-Hall技术锁定于高稳定性光学参考腔，并采用低噪声射频源驱动电光调制器以产生光学频梳，再通过光电探测直接提取与梳齿间隔对应的微波信号^[77]。实验中，系统在10 GHz频段

实现了相位噪声低于-140 dBc/Hz的微波输出，频率稳定度达到 10^{-12} 量级。与传统的电子振荡器相比，这种基于电光频率梳的光子微波源在降低相位噪声和提升频率稳定性方面均具备显著优势，为高精度时频传递、相干雷达系统及高速采样等应用提供了新的解决方案。

4 总结与展望

本文综述了电光频率梳的发展现状，介绍了电光频率梳的产生机制及典型结构，探讨了基于不同材料平台的电光频率梳实现方式与性能特点，对比了不同技术路径的优势与不足。总体而言，电光频率梳的研究方向沿两条相互支撑的主线展开：①通过引入更高自由度的调制结构和更高效的物理增强机制，优化频谱性能，如谱宽、平坦度等；②依托新型材料平台与集成工艺，推动器件与系统向片上化、封装化方向发展，从而提升系统的实用化潜力与长期运行可靠性。

推动电光频率梳进一步走向“高性能、实用化”的过程中，仍需要解决若干共性问题，例如：在通过增加调制自由度以提升性能的同时，需要降低系统控制复杂度以及对环境扰动的敏感性；

将电光频率梳应用于高精度与高分辨测量领域时,需要提升系统的长期相位相干性、抗噪声性能、稳频与频率溯源能力;在片上集成层面,需要提升系统封装耦合效率、抑制热漂移、优化协同设计方案等。

展望未来,跨学科的前沿研究与技术融合将持续拓展电光频率梳的应用边界,加速其在科学研究与工程实践中的发展。随着新型材料与器件的不断发展,集成电光频率梳将在数据通信、微波光子学和量子光子学等领域展现更广阔的应用前景^[78-82]。结合高效的脉冲压缩技术,集成电光频率梳将作为非线性光子系统中的关键种子泵浦,用于倍频程光梳^[83-84]、光学参量振荡器^[85]及拉曼散射显微成像^[86-87]。此外,依托薄膜铌酸锂等平台在电光调制与二阶非线性方面的优势,将电光频率梳与非线性频率转换及光谱展宽链路进行一体化集成,有望显著提升中红外、太赫兹等谱段覆盖方案的紧凑性。同时,电光调制与克尔孤子微腔频梳等方案的深度协同,将为解决宽带覆盖与微波间隔可调性之间的矛盾提供新路径,有望推动电光频率梳在精密测距与相干通信等领域向实用化、高效化方向发展。

参考文献

- [1] UDEM T, HOLZWARATH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology [J]. *Nature*, 2002, 416 (6877): 233-237.
- [2] UDEM T, HUBER A, WEITZ M, et al. Phase-coherent measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 79(14): 2646-2649.
- [3] SCHWOB C, JOZEFOWSKI L, DE BEAUVOIR B, et al. Optical frequency measurement of the 2S-12D transitions in hydrogen and deuterium: Rydberg constant and lamb shift determinations [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82: 4960-4963.
- [4] DIDDAMS S, JONES D, YE J, et al. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femto-second laser comb[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84 (22): 5102-5105.
- [5] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum [J]. *Science*, 2020, 369(6501): 3676.
- [6] HALL J L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78 (4): 1279-1295.
- [7] HÄNSCH T W. Nobel lecture: passion for precision [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1297-1309.
- [8] HOLZWARATH R, UDEM T, HÄNSCH T W, et al. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(11): 2264-2267.
- [9] CODDINGTON I, NEWBURY N, SWANN W. Dual-comb spectroscopy [J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414.
- [10] OBRZUD E, RAINER M, HARUTYUNYAN A, et al. A microphotonic astrocomb [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13 (1): 31-35.
- [11] PROBST R A, MILAKOVIĆ D, TOLEDO-PADRÓN B, et al. A crucial test for astronomical spectrograph calibration with frequency combs [J]. *Nature Astronomy*, 2020, 4(6): 603-608.
- [12] ZHU Z B, WU G H. Dual-comb ranging [J]. *Engineering*, 2018, 4(6): 772-778.
- [13] REN X Y, XU B, FEI Q L, et al. Single-photon counting laser ranging with optical frequency combs [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(1): 27-30.
- [14] SHEN Q, GUAN J Y, REN J G, et al. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km [J]. *Nature*, 2022, 610(7933): 661-666.
- [15] HU H, DA ROS F, PU M H, et al. Single-source chip-based frequency comb enabling extreme parallel data transmission [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12 (8): 469-473.
- [16] 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: 2568.
- [17] GENG Y, ZHOU H, HAN X J, et al. Coherent optical communications using coherence-cloned Kerr soliton microcombs [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1070.
- [18] CUNDIFF S T, WEINER A M. Optical arbitrary waveform generation [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(11): 760-766.
- [19] PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Frequency comb spectroscopy [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 146-157.
- [20] HARGROVE L E, FORK R L, POLLACK M A. Locking of He - Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 5(1): 4-5.
- [21] KIPPENBERG T J, HOLZWARATH R, DIDDAMS S A. Microresonator-based optical frequency combs [J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555-559.
- [22] KIPPENBERG T J, GAETA A L, LIPSON M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators [J]. *Science*, 2018, 361(6402): 8083.

- [23] 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.
- [24] STERN B, JI X C, OKAWACHI Y, et al. Battery-operated integrated frequency comb generator[J]. *Nature*, 2018, 562(7727): 401–405.
- [25] 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.
- [26] COLE D C, LAMB E S, DEL'HAYE P, et al. Soliton crystals in Kerr resonators[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(10): 671–676.
- [27] WANG W Q, WANG L R, ZHANG W F. Advances in soliton microcomb generation[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 1.
- [28] MURATA H, MORIMOTO A, KOBAYASHI T, et al. Optical pulse generation by electrooptic - modulation method and its application to integrated ultrashort pulse generators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1325–1331.
- [29] 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.
- [30] HU Y, YU M, BUSCAINO B, et al. High-efficiency and broadband electro - optic frequency combs enabled by coupled micro-resonators[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(9): 679–686.
- [31] RANKA J K, WINDELER R S, STENTZ A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(1): 25–27.
- [32] RÖNTGEN W C. Ueber die durch elektrische kräfte erzeugte aenderung der Doppelbrechung des Quarzes[J]. *Annalen der Physik*, 1883, 254(4): 534–551.
- [33] KERR J. A new relation between electricity and light: dielectric media birefringent[J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1875, 50(332): 337–348.
- [34] TRASK L R, PERICHERLA S V, DELFYETT P J. Self-oscillating, self-stabilizing, and self-referenced electro-optic comb[J]. *Optics Express*, 2025, 33(2): 3429–3437.
- [35] SAKAMOTO T, KAWANISHI T, IZUTSU M. Asymptotic formalism for ultraflat optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1515–1517.
- [36] YOKOTA N, ABE K, MIEDA S, et al. Harmonic superposition for tailored optical frequency comb generation by a Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1026–1029.
- [37] CUI Y H, WANG Z X, ZUO X H, et al. Flat optical frequency comb generation by using one DPMZM and superposed harmonics[J]. *Optics Communications*, 2023, 531: 129223.
- [38] LIN W, ZHU B W, CAO K Q, et al. Generation of flat optical frequency comb using cascaded electro-optic modulators[J]. *Photonics*, 2025, 12(3): 246.
- [39] REN T H, ZHANG M, WANG C, et al. An integrated low - voltage broadband lithium niobate phase modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 889–892.
- [40] HUANG H J, HAN X, BALČYTIS A, et al. Non-resonant recirculating light phase modulator[J]. *APL Photonics*, 2022, 7(10): 106102.
- [41] 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.
- [42] DU Y T, ZOU X H, ZOU F, et al. Novel folded structure recycling phase modulator for ultralow V_{π} and enhanced low - V_{π} bandwidth[C]// 2024 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Pisa, Italy. IEEE, 2024: 1–3.
- [43] RUEDA A, SEDLMEIR F, KUMARI M, et al. Resonant electro - optic frequency comb[J]. *Nature*, 2019, 568(7752): 378–381.
- [44] 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(10): 679–685.
- [45] WANG X H, LI Z K, CHEN J J, et al. Integrated thin-film lithium niobate electro-optic frequency comb for picosecond optical pulse train generation[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 124(20): 201101.
- [46] WANG J Y, WANG Q, XU M Y, et al. Highly tunable flat-top thin-film lithium niobate electro-optic frequency comb generator with 148 comb lines[J]. *Optics Express*, 2025, 33(11): 23431–23439.
- [47] 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.
- FENG L S, LI W, CHEN S W, et al. Progress in application research of microresonator frequency combs[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(2): 13–23. (in Chinese)
- [48] MOROHASHI I, SAKAMOTO T, SOTOBAYASHI H, et al.

- Widely repetition - tunable 200 fs pulse source using a Mach-Zehnder-Modulator-based flat comb generator and dispersion-flattened dispersion-decreasing fiber[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(11): 1192–1194.
- [49] CARLSON D R, HICKSTEIN D D, ZHANG W, et al. Ultrafast electro-optic light with subcycle control [J]. *Science*, 2018, 361(6409): 1358–1363.
- [50] SEKHAR P, FREDRICK C, CARLSON D R, et al. 20 GHz fiber-integrated femtosecond pulse and supercontinuum generation with a resonant electro-optic frequency comb[J]. *APL Photonics*, 2023, 8(11): 116111.
- [51] YAN M, LUO P L, IWAKUNI K, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with electro-optic modulators [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(10): e17076.
- [52] KOWLIGY A S, CARLSON D R, HICKSTEIN D D, et al. Mid-infrared frequency combs at 10 GHz[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3677–3680.
- [53] ROY A, LEDEZMA L, COSTA L, et al. Visible-to-mid-IR tunable frequency comb in nanophotonics [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6549.
- [54] HEINIGER A T, CICH M J, LONG D A. High power, frequency agile comb spectroscopy in the mid-infrared enabled by a continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2024, 32(13): 23536–23546.
- [55] MARTÍN-MATEOS P, ČIBIRAITĖ-LUKENSKIENĖ D, BARREIRO R, et al. Hyperspectral terahertz imaging with electro-optic dual combs and a FET-based detector [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 14429.
- [56] KRAUSE B L, LAVRIČ A, TEBART J, et al. Phase noise of an electro-optic terahertz comb [J]. *Optics Express*, 2024, 32(12): 20948–20958.
- [57] ABDOLLAHI S, LADOUCE M, MARIN-PALOMO P, et al. Agile THz-range spectral multiplication of frequency combs using a multi-wavelength laser[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 1305.
- [58] KASHIWAGI K, OKUBO S, INABA H. High repetition rate visible frequency comb generation from electro-optic modulation in the 1 550 nm region[C]// 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA. IEEE, 2019.
- [59] LUDWIG M, AYHAN F, SCHMIDT T M, et al. Ultraviolet astronomical spectrograph calibration with laser frequency combs from nanophotonic lithium niobate waveguides [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 7614.
- [60] SCHLIESSER A, PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Mid-infrared frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440–449.
- [61] HÉBERT N B, MICHAUD-BELLEAU V, PERRELLA C, et al. Real-time dynamic atomic spectroscopy using electro-optic frequency combs [J]. *Physical Review Applied*, 2016, 6(4): 044012.
- [62] SHAMS-ANSARI A, YU M J, CHEN Z J, et al. Thin-film lithium-niobate electro-optic platform for spectrally tailored dual-comb spectroscopy [J]. *Communications Physics*, 2022, 5: 88.
- [63] YUAN Z C, FAN X Y, XU B X, et al. Digitally generated high-resolution mid-infrared dual-comb spectroscopy system based on electro-optic modulation [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(20): 5711–5714.
- [64] 黄博航, 姜廷皓, 赵春播, 等. 基于微腔光频梳的精密测距技术研究进展综述 [J]. *计测技术*, 2025, 45(6): 10–28.
HUANG B H, JIANG T H, ZHAO C B, et al. Research progress review on precision ranging technology based on microcombs [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2025, 45(6): 10–28. (in Chinese)
- [65] MINOSHIMA K, MATSUMOTO H. High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(30): 5512–5517.
- [66] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 351–356.
- [67] WU H Z, ZHAO T, WANG Z Y, et al. Long distance measurement up to 1.2 km by electro-optic dual-comb interferometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(25): 251901.
- [68] WU Z L, SHI H S, SUN P, et al. high-precision 3D optical profilometry of non-cooperative targets by time-domain dual-comb coherent averaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(14): 141101.
- [69] XIE J D, YAN L P, CHEN B Y, et al. Multi-heterodyne interferometric absolute distance measurements based on dual dynamic electro-optic frequency combs [J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 13472–13485.
- [70] LE FLOCH S, LLERA M, SALVADÉ Y. Sub-ppm absolute distance measurements using an optical frequency comb generated by a conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII*, 2011, 8082: 80823S.
- [71] KAYES M I, ROCHELETTE M. Fourier transform spectroscopy by repetition rate sweeping of a single electro-optic frequency comb [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 967–970.
- [72] WEIMANN C, SCHINDLER P C, PALMER R, et al. Sili-

- con - Organic Hybrid (SOH) frequency comb sources for terabit/s data transmission[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3629-3637.
- [73] XU Y L, LIN J C, DUBÉ-DEMERS R, et al. Integrated flexible-grid WDM transmitter using an optical frequency comb in microring modulators[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1554-1557.
- [74] ZHOU Z C, WEI J L, LUO Y, et al. Communications with guaranteed bandwidth and low latency using frequency-referenced multiplexing[J]. *Nature Electronics*, 2023, 6(9): 694-702.
- [75] XU M Y, HE M B, ZHU Y T, et al. Flat optical frequency comb generator based on integrated lithium niobate modulators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(2): 339-345.
- [76] OBRZUD E, RAINER M, HARUTYUNYAN A, et al. Broadband near-infrared astronomical spectrometer calibration and on-sky validation with an electro-optic laser frequency comb[J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34830.
- [77] KUSE N Y, SCHIBLI T R, FERMANN M E. Low noise electro-optic comb generation by fully stabilizing to a mode-locked fiber comb [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16884.
- [78] WANG Z J, MA H, LUO J W, et al. High-precision time-domain stereoscopic imaging with a femtosecond electro-optic comb[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 6839.
- [79] WAN Z R, CHEN Y, ZHANG X X, et al. Quantum correlation-enhanced dual-comb spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 257.
- [80] MA X S, LV T J, ZHU D X, et al. Ultra-rapid broadband mid-infrared spectral tuning and sensing [J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2025, 4(3): 036008.
- [81] REN X Y, PAN J, YAN M, et al. Dual-comb optomechanical spectroscopy[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5037.
- [82] LV T J, HAN B, YAN M, et al. Ultrahigh-speed coherent anti-stokes Raman spectroscopy with a hybrid dual-comb source[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(8): 2964-2971.
- [83] OKAWACHI Y, YU M J, DESIATOV B, et al. Chip-based self-referencing using integrated lithium niobate waveguides[J]. *Optica*, 2020, 7(6): 702.
- [84] ANDERSON M H, BOUCHAND R, LIU J Q, et al. Photonic chip-based resonant supercontinuum via pulse-driven Kerr microresonator solitons[J]. *Optica*, 2021, 8(6): 771.
- [85] JANKOWSKI M, LANGROCK C, DESIATOV B, et al. Ultrabroadband nonlinear optics in nanophotonic periodically poled lithium niobate waveguides[J]. *Optica*, 2020, 7(1): 40.
- [86] HEUKE S, RIGNEAULT H. Coherent Stokes Raman scattering microscopy (CSRS) [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 3337.
- [87] YAN M, ZHANG L, HAO Q, et al. Surface-enhanced dual-comb coherent Raman spectroscopy with nanoporous gold films [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(9): 1800096.

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 陈彩欣(2001—), 女, 硕士, 主要研究方向为单腔双梳激光器、中红外光梳。



共同第一作者: 李思莹(2001—), 女, 硕士, 主要研究方向为单腔双梳激光器测距成像。



通信作者: 闫明(1984—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为红外光梳、高分辨分子光谱测量与红外光梳成像。曾主持国家自然科学基金委优秀青年项目(青年科学基金项目B类)、国家重点研发项目课题等科研项目。研究成果曾获上海市技术发明奖一等奖、重庆市科技进步奖一等奖等。



通信作者: 曾和平(1966—), 男, 华东师范大学教授、教育部长江特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、新世纪百千万人才工程国家级领军人物, 先后担任教育部“长江学者”创新团队、国家自然科学基金委创新群体、国家自然科学基金委科学仪器、国家自然科学基金委重点项目负责人。主要研究方向为超快激光物理与量子精密测量。